

Ю. А. КОВАЛЬ, д-р техн. наук, В. В. ОБЕЛЬЧЕНКО канд. техн. наук,
С. Г. КУНДЮКОВ, канд. техн. наук, А. А. КОСТЫРЯ, канд. техн. наук, С. Ф. СЕМЕНОВ,
Е. А. ИВАНОВА

ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ КАФЕДРЫ ОРТ ХНУРЭ ПО ВЫСОКОТОЧНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

Задача частотно-временной синхронизации территориально разнесенных пунктов. Основные методы синхронизации

Синхронизация¹ территориально разнесенных стандартов (в частном случае эталонов) времени и частоты – основа для реализации современных частотно-временных методов, позволяющих решать актуальные научно-технические и оборонные задачи в области метрологии времени и частоты, при создании систем координатно-временного обеспечения (включая спутниковые радионавигационные системы – СРНС), радиоастрономии, радиолокации, радиопеленгации, цифровой синхронной связи. Успешное решение таких задач определяется как стабильностью стандартов времени и частоты, так и точностью их сравнения. Высокие темпы совершенствования стандартов наивысшей точности – эталонов (относительная нестабильность современных эталонов составляет 10^{-13} – 10^{-15} , а в перспективе – 10^{-16} – 10^{-18}) определяет актуальность задачи повышения точности методов сравнения. Современные требования к точности частотно-временной синхронизации некоторых потребителей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Области применения	Задачи	Требования	
		По времени, нс	По частоте, $\Delta f / f_0$
Метрология времени и частоты	Хранение и воспроизведение размеров единиц времени и частоты, а также шкал времени	1–10	10^{-13} – 10^{-14}
Радиоастрономия и фундаментальные исследования	Синхронизация пунктов радиointерферометров со сверхдлинными базами (РСДБ); определение параметров вращения Земли	10–50	
СРНС (ГЛОНАСС, GPS, ГАЛИЛЕО)	Синхронизация шкал времени наземных и космических объектов СРНС	1–10	
Цифровые системы связи	Синхронизация частоты опорных генераторов в узлах связи	–	10^{-11} – 10^{-12}

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), где находится государственный эталон времени и частоты США. 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 [3, 4].

¹ Близкими по смыслу являются также термины *сличение, сравнение и привязка*.

Для постановки задачи синхронизации времени и частоты определяющим является понятие шкалы времени $H(t)$ и сдвига шкал ΔT . Для аналитической записи идеальной шкалы времени предложено выражение с применением аппарата дельта-функций [5]. Измерения сдвига шкал времени позволяет оценить отклонение стандартов по частоте

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

где $\Delta T(t)$ – временная аппроксимация дискретных значений ΔT_n .

Под методами синхронизации принято понимать совокупность технических средств и приемов их использования для синхронизации территориально разнесенных эталонов и стандартов времени и частоты (ДСТУ 2681–94).

Первые методы синхронизации были предложены А. Эйнштейном в работах по 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 ретрансляционный алгоритм – РА). Упоминается и вариант использования возимых часов (реализуется в настоящее время в виде перевозимых квантовых часов – ПКЧ).

К настоящему времени арсенал методов синхронизации и варианты их технической реализации существенно расширились. В основе всех методов синхронизации, кроме ПКЧ, лежит передача информации о шкалах времени. Для этого используются различные диапазоны частот и системы.

Методы синхронизации можно условно 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 – СДВ и ДВ каналы; СРНС; сигналы ТВ; односторонний радиометеорный канал (РМК); кабельные, лазерные и волоконно-оптические линии. Поскольку в этих методах излучаются сигналы только из одного пункта, методы первой группы принято называть односторонними.

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 относят к активным. Активные методы реализуются в РМК, спутниковых и оптических каналах связи с применением различных алгоритмов – упомянутый выше РА, встречный алгоритм (ВА), опорно-ретрансляционный алгоритм (ОРА).

В методах третьей группы используется общий источник, сигналы которого принимаются в сверяемых пунктах, а сдвиг шкал определяется с учетом известной разности задержек сигналов между шкалой общего источника и синхронизируемыми пунктами. Этот метод принято называть алгоритмом общего охвата (АОО) и он реализуется в СРНС в дифференциальном режиме, а также в РСДБ.

Основным критерием качества методов синхронизации является погрешность измерения сдвига шкал. Сопоставление методов синхронизации 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 невзаимность (для активных методов) задержки сигналов в канале; нестабильности аппаратных задержек; внутренние шумы и помехи канала связи; динамика измеряемой величины из-за нестабильности стандартов. 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, – ПКЧ, СРНС, связные ИСЗ и РМС (табл. 2).

Таблица 2

Метод	Достоинства	Общие недостатки	Недостатки для Украины
ПКЧ	Прямые измерения	Низкая оперативность; высокая стоимость	Отсутствие собственных ПКЧ
СРНС	Глобальная зона действия	Селективный доступ (GPS); низкая оперативность.	Зависимость от зарубежных систем
Связные ИСЗ	Глобальная зона действия; оперативность	Излучение в пунктах	
РМС	Оперативность; скрытность; автономность	Ограниченная дальность (2000 км)	–

Учитывая высокую стабильность сигналов квазаров и пульсаров (не хуже 10^{-14}), можно сказать, что перспективным методом является РСДБ, который в перспективе может стать основой нового типа эталонов времени и средства синхронизации. Каждый из современных высокоточных методов синхронизации (табл. 2) обладает определенными преимуществами и недостатками, которые необходимо учитывать при выборе метода.

В связи с тем, что к началу 70-х годов СРНС еще не были созданы, а ИСЗ связи использовались для синхронизации только в экспериментальном порядке, начатые на каф. ОРТ ХПИ по инициативе проф. Кашеева Б.Л. работы по РМС носили не только приоритетный характер в СССР, но и были актуальными для решения стратегических задач Министерства обороны (МО) СССР.

Основы РМС

В основе РМС лежат высокая стабильность и обратимость задержки сигналов в РМК. При этом РМС превосходит другие методы по таким показателям, как производительность измерений (на получение единичного измерения требуется время порядка 0,1 с), автономность, оперативность, экономичность, скрытность, устойчивость к ионосферным возмущениям. К недостаткам РМС относится ограниченная дальность действия (до 2000 км без дополнительных ретрансляторов) и необходимость излучения радиосигналов в синхронизируемых пунктах.

Работы по РМС были начаты в Харькове (ХПИ) под руководством проф. Кашеева Б.Л. вскоре после первых публикаций по этому вопросу [6]. В период 1969–1970 г. были разработаны первые экспериментальные образцы аппаратуры «МЕТКА–1» для МО СССР (см. табл. 3), а в 1971 г. проведены экспериментальные сеансы сличения шкал эталонов времени Госстандарта СССР на трассе Харьков–Москва [7]. При этом были получены погрешности сличения 0,2–0,3 мкс. Позднее к данному направлению подключился Казанский государственный университет (КГУ) [8].

В дальнейшем работы проводились в следующих направлениях:

- 1) теоретические и экспериментальные исследования возможностей повышения точности РМС (исследования характеристик метеорного радиоканала синхронизаций, анализ и синтез алгоритмов сравнения, поиск путей снижения сигнальных и аппаратурных погрешностей, совершенствование методик обработки результатов измерений);
- 2) разработка, изготовление и внедрение образцов аппаратуры для сравнения эталонов времени и частоты Госстандарта;
- 3) разработка, изготовление и испытания макетов аппаратуры в рамках ОКР совместно с Ленинградским научно-исследовательским радиотехническим институтом (ЛНИРТИ);
- 4) расширение областей применения радиометеорной аппаратуры синхронизации (РМАС).

Головными организациями, представляющими интересы потребителей в СССР, были: НИИ Госстандарта – Всесоюзный (ныне Всероссийский) НИИ физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), а в Украине – Харьковский Государственный НИИ метрологии – ХГНИИМ (ныне Национальный Научный центр "Институт метрологии" – ННЦ ИМ); от промышленности в интересах МО – Ленинградский научно-исследовательский радиотехнический институт (ныне Российский институт радионавигации и времени – РИРВ, С.-Петербург). Основными потребителями аппаратуры являлись: службы времени Госстандарта СССР (Государственный эталон во ВНИИФТРИ и вторичные эталоны в Харькове, Ужгороде, Новосибирске, Иркутске, Хабаровске); АН СССР (обсерватории в Пулкове и Николаеве); МО СССР. После распада СССР радиометеорная аппаратура использовалась для синхронизации Государственного первичного эталона времени и частоты Украины (ННЦ ИМ) со вторичными эталонами Украины (Киев, Ужгород), а также стандартом Наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами (НАКУ КА) на территории Украины по заказу и при участии Научно-исследовательского института радиотехнических измерений (НИИРИ).

Результаты теоретических исследований РМС

При исследовании метеорного радиоканала основное внимание было обращено на параметры, определяющие потенциал РМС: полоса пропускания; нестабильность, оцениваемая скоростью изменения задержки сигналов $V_{\tau} = d\tau / dt$; невязимость 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_{τ} 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 табл. 5. 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 [9, 10].

Результаты экспериментального исследования кратковременной фазовой нестабильности задержки сигналов в метеорном радиоканале позволили обосновать фазовый принцип построения высокоточной радиометеорной аппаратуры синхронизации [11, 12].

Анализ теоретических и экспериментальных исследований источников невязимости задержки канала показал, что измерения с использованием современной метеорной аппаратуры сравнения пока не позволяют подтвердить модельные оценки невязимости. При этом можно согласиться с верхней теоретической оценкой (менее 1 нс) [9, 13].

Результаты исследования метеорного радиоканала были положены в основу линейной параметрической модели метеорного канала синхронизации (ЛПМ МКС) [9], состоящей из каскадного соединения линейного четырехполюсника с постоянными параметрами, идеальной линии с управляемой величиной задержки, идеального амплитудного модулятора и генераторов модулирующих функций. Анализ прохождения сигналов в ЛПМ 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.

Проведенный комплексный анализ основных алгоритмов сравнения (ВА, РА и ОРА) показал преимущества ВА и позволил синтезировать новые более совершенные комбинированные и модифицированные алгоритмы [9, 14]. Новые алгоритмы запатентованы [15–17].

Для выбора вида и параметров сигналов решены теоретические задачи: анализ пороговых отношений сигнал/помеха; оценка потенциальных точностных характеристик основных типов простых и сложных сигналов; анализ влияния коррелированных помех [18–22]. Показаны преимущества сложных сигналов для уменьшения сигнальных погрешностей: увеличе-

ние базы сигналов; усреднение результатов измерений по всем импульсам кода; переход к фазовым измерениям.

Анализ потенциальной точности фазовых измерений проводился применительно к универсальному случаю когерентного дискретного составного частотного сигнала (КДСЧС), частным случаем которого является двухчастотный сигнал (ДЧС). 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 результирующих погрешностях измерения сдвига шкал в РМС имеют аппаратурные 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. АСП не зависят от алгоритмов сравнения. 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 [25], реализованный в РМКС «МЕТКА-3» (см. табл. 4) и получивший название "сквозной канал". Однако эти способы не позволили контролировать и учитывать второй и третий источники АСП (невзаимности задержек сигналов в общих устройствах и изменения задержек сигналов при вариации амплитуд принимаемых сигналов).

Невзаимность задержек АФУ в РМС была впервые обнаружена 1991 г. при "локации друг на друга" двух полукомплектов аппаратуры МЕТКА-8 [9, 11]. 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 и излучении. Поскольку идеальное согласование АФУ, что явилось бы наиболее простым решением этой задачи, невозможно, было предложено измерять полную величину АСП в каждом из пунктов для сигналов с симметричной формой с помощью имитатора метеорного радиоканала (ИМР) с зеркальной ретрансляцией сигналов (рис. 1) и запатентовано устройство для этого [26].

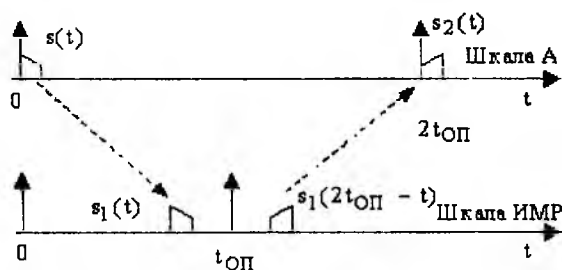


Рис. 1

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 [27–29]. Предложены единые критерии оценки погрешностей и обобщенный показатель качества [30]. Предельное значение обобщенного показателя качества было оценено на основе информационной теории измерений [31].

Аппаратура и системы РМС

Результаты теоретических исследований привели к созданию РМАС трех типов:

- 1) экспериментальные образцы РМАС типа «МЕТКА» для регулярного сравнения эталонов и стандартов времени Госстандарта и НАКУ КА на территории Украины;
- 2) специальные макеты РМАС («МЕТКА», «ФАЗА») для научных исследований и ОКР, проводимых ХНУРЭ совместно с РИРВ и НИИРИ;

3) промышленные образцы РМАС.

В разработке первого поколения промышленной аппаратуры 17-Н-91, принятой в эксплуатацию постановлением правительства № 815-242 от 27.08.85 г. (главный конструктор С. Н. Плужников, ЛНИРТИ) участвовали научные коллективы кафедры ОРТ ХНУРЭ и КГУ. По мере расширения задач, решаемых МО СССР с помощью РМС при создании СРНС ГЛОНАСС, ЛНИРТИ совместно с ХНУРЭ (макеты «МЕТКА-4» и «ФАЗА») провели в период 1989–1998 гг. два НИОКР, в результате чего было разработано второе поколение промышленной аппаратуры 17-Н-830 (прошла автономные испытания).

Макеты РМАС, разработанные в КГУ, получили название «КАМА».

Основные характеристики разработанной в ХНУРЭ РМАС приведены в табл. 3–5 (табл. 3 – аппаратура с применением простых сигналов; табл. 4 – аппаратура с применением сложных сигналов; табл. 5 – фазовая аппаратура).

В службе времени Госстандарта СССР, а позднее Госстандартов России и Украины применялись не промышленные, а экспериментальные образцы аппаратуры («МЕТКА-6» и «МЕТКА-6М»), отличающиеся высокой точностью и небольшими габаритами. В 1993 г. разработан и внедрен в Киеве (УкрЦСМ), НАКУ КА (Евпатория) и НИЦ ИМ комплекс «МЕТКА-6М» (рис. 2), сопряженный с ЭВМ для оперативной статистической обработки результатов измерений, их хранения и вывода на печать.

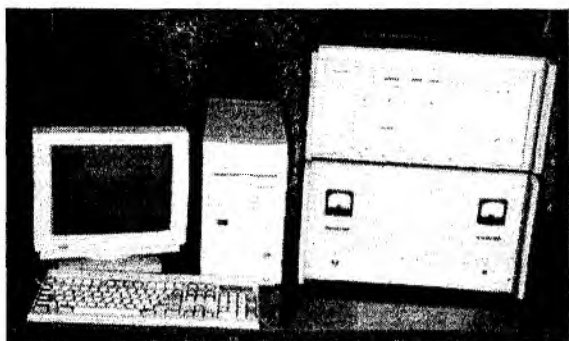


Рис. 2

Отличительными особенностями комплексов «МЕТКА-6» и «МЕТКА-6М» 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 ± 90 нс с дискретностью 10 нс; внутренний цифровой имитатор для диагностики измерительной части аппаратуры.

Метрологические характеристики аппаратуры типа «МЕТКА-6» и «МЕТКА-6М» оценивались: в режимах "локация сам на себя" и "локация 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 года; при сравнении между собой результатов измерений в обоих пунктах. Диапазон изменений случайной погрешности и АСП, оцениваемой с помощью ПКЧ, не превышал 20 нс.

В 1985 г. введена в эксплуатацию многопозиционная радиометеорологическая система сличения (МРМСС) Государственного эталона СССР с эталоном-копией (Иркутск) и вторичными эталонами (Харьков, Новосибирск, Ужгород, Хабаровск) (рис. 3) [34]. МРМСС была оснащена образцами аппаратуры типа «МЕТКА-6» и «МЕТКА-6М». Аттестация Государственной службы времени и частоты СССР в 1988 г. подтвердила высокие метрологические характеристики МРМСС.



Рис. 3

В состав МРМСС также входили эталон Пулковской обсерватории АН СССР (С.-Петербург) и ретрансляционный пункт (Екатеринбург). На рис. 3, помимо пунктов МРМСС, показаны трассы экспериментальных сравнений: "треугольник" Познань – Киев – С.-Петербург (1989 г.); "треугольник" Харьков – Киев – Москва (1993 г.); ст. Зеленчукская (РАТАН АНСССР) – Харьков (ретрансляционный пункт) – С.-Петербург (ЛИПА); ННЦ ИМ (Харьков) – НАКУ КА (Евпатория) [9, 33].

Таблица 3

Параметры	Наименование РМАС			
	«МЕТКА-1»	«МЕТКА-5» – «МЕТКА-7»	«МЕТКА-9»	«МЕТКА-8»
Алгоритм	РА ($n = -1$)	ОРА ($n = 1$)		ВА
Рабочая частота, МГц	57,3			
Импульсная мощность, кВт	50	20–40	80	20–40
Вид сигнала	Код из 6-ти импульсов	Код из 16-ти импульсов		Код из 128 импульсов
Длительность сигнала, мкс	5	16x2		128x2
Погрешность, нс	200–300	15–30	5	5–10
Ширина спектра, МГц	0,4			
Период разработки	1969–1970	«МЕТКА-5..7 – 1980–1986; «МЕТКА-6М» – 1988–1999	1982	1990
Период эксплуатации	1970–1973	1980–2003	1985	1992
Цели разработки, внедрение	МО СССР; ОКР в РИРВ (аппаратура 17-Н-91)	Госстандарты Украины и России, НАКУ КА (Евпатория)	Исследование нестабильности задержки сигналов в РМК	Как вариант для ОКР в РИРВ

Обозначения в табл. 3: n – коэффициент ретрансляции

Применение для измерений огибающих как простых сигналов (например «МЕТКА-6»), так и сложных сигналов (табл. 4) не позволило достичь погрешностей существенно меньших, чем 10 нс. Поэтому были рассмотрены возможности использования фазовых методов построения РМАС, для чего был создан макет аппаратуры «ФАЗА» порядке выполнения ОКР по заказу РИРВ (табл. 5). Испытания РМАС «ФАЗА» показали возможность реализации фазовых принципов построения радиометеорной аппаратуры [12].

В аппаратуре «ФАЗА» использованы: составной сигнал, содержащий код из 15 фазоманипулированных (ФМ) по коду Баркера импульсов и когерентный ДЧС; комбинированный алгоритм сравнения – ОРА для ФМ сигнала и ВА 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. Основные технические решения аппаратуры «ФАЗА» защищены авторским свидетельством на изобретение [32].

Таблица 4

Параметры	Наименование РМАС			
	«МЕТКА-2»	«МЕТКА-3»	«МЕТКА-4»	«МЕТКА-10»
Алгоритм	ОРА ($n=2$)		ОРА ($n=1$)	ВА
Рабочая частота, МГц	57,3			
Импульсная мощность, кВт	5	20	3	20
Вид сигнала	Код из 2-х ЛЧМ импульсов	Код из 4-х ЛЧМ импульсов		Код из 17-ти ЛЧМ импульсов (один из них V-образный)
Длительность сигнала, мкс	2x70	4x50		17x24
Погрешность, нс	50	50	10-30	10
Ширина спектра, МГц	3,5	0,7	2,5	1
Период разработки	1975-1977	1977-1982	1975-1984	1987-1991
Испытания	Трасса Балаклея – Балта, 1977-1978	Трасса Харьков – Москва, 1982-1983	Трасса Харьков – Пулково, 1984	Локационные испытания, 1991
Цель разработки; внедрение	Как вариант для ОКР в РИРВ	Планировалось внедрение в Госстандарте СССР	Как вариант для ОКР в РИРВ	Планировалось внедрение в Госстандарте СССР

Обозначения в табл. 4: ЛЧМ – линейно-частотно модулированный

Таблица 5

Параметры	Наименование РМАС	
	«ФАЗА»	«МЕТКА-11»
Алгоритм	ОРА ($n=1$)+ВА	ВА
Рабочая частота, МГц	57,3	45,5
Импульсная мощность, кВт	10	2-4
Вид сигнала	ФМС+ДЧС	ФМС+ДЧС
Длительность сигнала, мкс	15x26 – ФМС, 2x500 – ДЧС	10x13-ФМС, 5x265-ДЧС
Погрешность, нс	≈1	
Ширина спектра, МГц	1	0,2
Период разработки	1985-1991	1995-2000
Период испытаний	1992	2000-2001
Цель разработки; внедрение	НИР и ОКР совместно с РИРВ (аппаратура 17-Н-830)	НИР с НИЦ ИМ и НИИРИ; ОКР совместно с РИРВ

Обозначения в табл. 5: ФМС – фазоманипулированный сигнал; ДЧС – двухчастотный сигнал

Аппаратура «ФАЗА» послужила прототипом не только для промышленной аппаратуры 17-Н-830, но и последнего экспериментального образца аппаратуры «МЕТКА-11» [33].

Основным отличием комплекса «МЕТКА-11» является наличие двух режимов – сравнения шкал времени и передачи 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 имитатора. Указанные особенности РМАС «МЕТКА-11» позволили уверенно достичь погрешности измерений порядка 1 нс, облегчили 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 – огибающие и когерентные несущие ДЧС. При этом

по-иному реализован ДЧС – в виде бинарной ФМ по закону меандра несущей частоты. В состав аппаратуры «МЕТКА–11» включена ЭВМ, которая выполняет функции: формирование грубой части шкалы времени с дискретностью 1 с; управление работой устройств цифрового блока; вычисление точной части значения временного положения сигнала по его цифровым отсчетам; накопление и статистическая обработка результатов сравнения, приема и передачи информации; помехоустойчивое кодирование и декодирование информации; обмен информацией с оператором, включая отображение данных на экране дисплея и ввод данных с клавиатуры. Аппаратура «МЕТКА–11» испытывалась в локационном режиме ($\Delta T = 0$). Поэтому среднее за сеанс $\Delta \bar{T}$ является оценкой АСП, Результаты двух сеансов измерений сдвига шкал» приведены в табл. 6, а гистограммы распределения погрешностей – на рис. 4.

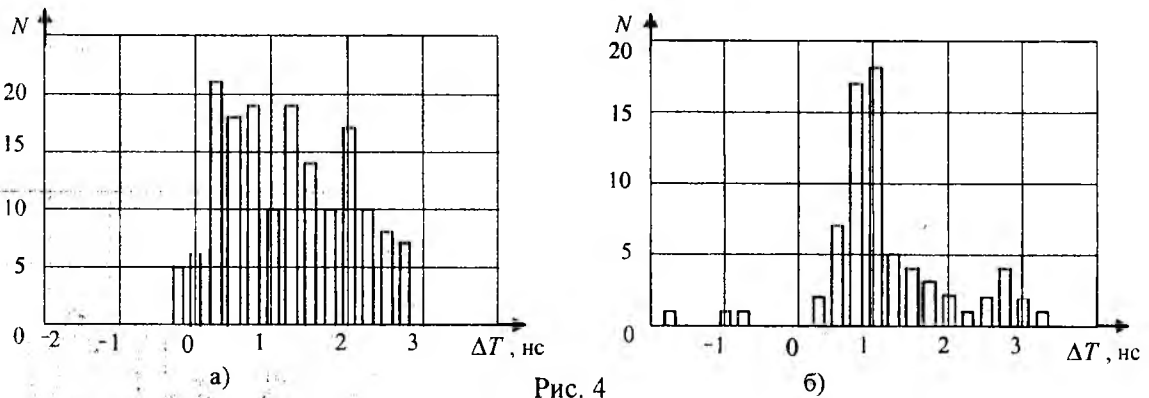


Рис. 4

Таблица 5

Дата	6.02.98	20.02.98
Количество единичных измерений	167	71
Среднее за сеанс $\Delta \bar{T}$, нс	1,35	1,22
СКО единичного измерения, нс	0,84	0,93
Гистограмма	рис. 4, а	рис. 4, б

После 1992 г. в соответствии с Соглашением о сотрудничестве стран СНГ по обеспечению единства измерений времени и частоты (Бишкек, 09.10.92г.) проводились регулярные сличения Государственных эталонов Украины (ННЦ ИМ) и России с применением РМАС. В 2003 г. сличения были прекращены. С применением аппаратуры «МЕТКА–6М» осуществлялось сличение Государственного (ННЦ ИМ, Харьков) и вторичного (УкрЦСМ, Киев) эталонов Украины и в 1995 г. была проведена аттестация службы времени Украины [35].

По результатам годичных сличений эталонов Украины и России в течение 2000 и 2001 гг. выполнен регрессионный анализ, выявивший относительный взаимный ход эталонов $5 \cdot 10^{-14}$ при среднеквадратической погрешности остатков 40 нс [36]. Результаты обработки измерений в 2001 г. приведены на рис. 5. Сравнительные результаты измерений сдвига шкал эталонов, выполненные совместно РМС и GPS в 2003 г., показаны на рис. 6 [37].

Разработка и изготовление экспериментальных образцов и макетов РМАС выполнялись сформированным проф. Кащеевым Б.Л. высококвалифицированным коллективом во главе с заведующим Проблемной НИЛ кафедры ОРТ к.т.н. Дудником Б. С. Ведущими разработчиками аппаратуры являлись: к.т.н. Нестеренко Г. В., Семенов С. Ф. (приемные устройства); Леман Ю. А., к.т.н. Кундюков С. Г., Байдак В. М. (измерительная часть); к.т.н. Дудник Б. С., Татарец Л. П., Смирнов А. Н. (передающие устройства); к.т.н. Дудник Б. С., Соляник О. А.

(антенно-фидерные устройства). В теоретических и экспериментальных исследованиях, а также в испытаниях РМАС принимали участие преподаватели кафедры ОРТ – д.т.н. Коваль Ю. А., к.т.н. Бавыкина В. В., к.т.н. Моисеев В. П., к.т.н. Гарбузов Ю. В., д.т.н. Антипов И. Е.

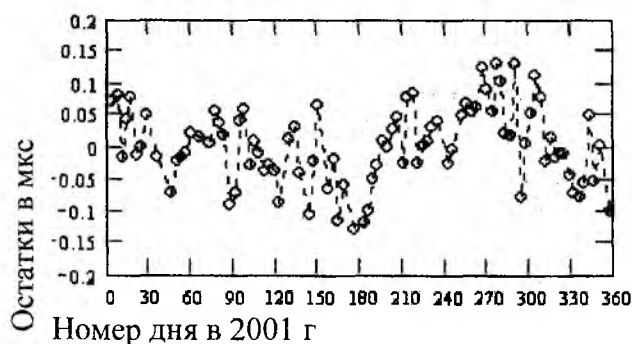
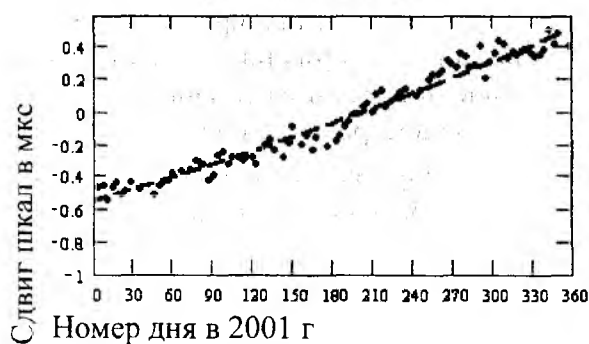


Рис. 5

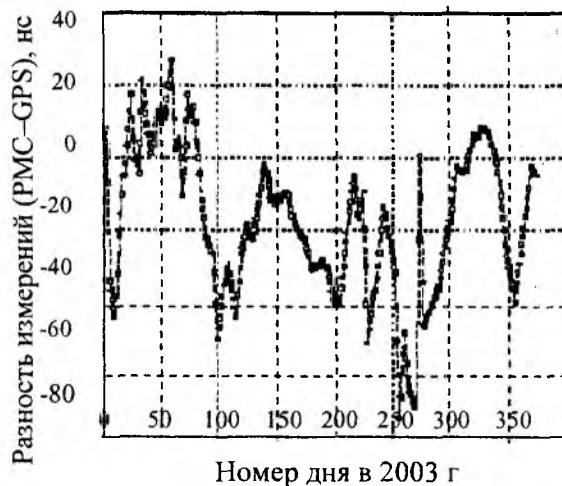
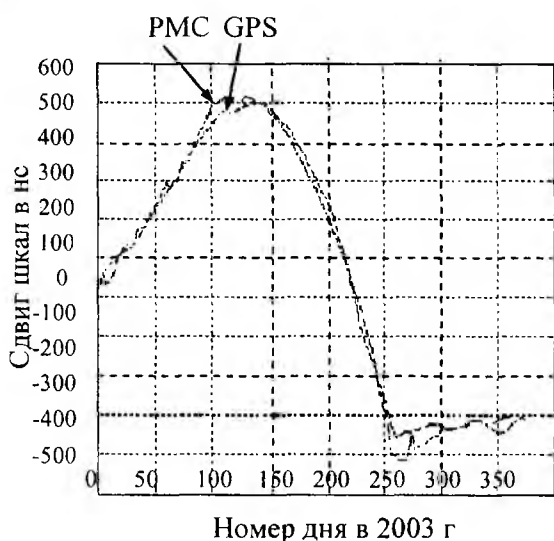


Рис. 6

Всего по работам, связанным с РМС, опубликовано 4 монографии [9, 33, 37, 38], более 100 статей, защищены 2 докторские и 7 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 на конференциях и симпозиумах (Всесоюзные 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 (1983–1985; 1987; 1988 гг.), специализированных выставках, где удостоивались дипломов и медалей. Результаты работы используются в учебном процессе и подготовке научных кадров. Подготовлено учебное пособие [39] и специальный учебник для высших учебных заведений.

На разных этапах становления и развития РМС руководимый проф. Кашеевым Б. Л. коллектив активно и плодотворно сотрудничал с коллегами из КГУ, работавшими в данном направлении под руководством проф. Сидорова В. В.

В ходе выполнения и внедрения работ по РМС, а также при решении организационных вопросов имело место сотрудничество с представителями ряда ведомств и организаций: Госстандарт и АН СССР – Пушкин С. Б., Ильин В. Г., Тельпуховский Н. А., Вытнов В. А.; МО – Кузнецов В. П., Гладских А. И., Белов Л. Я., Еремин Е. В., Жуков Е. Т.; НИЦ ИМ – Лейкин А. Я., Сопельников М. Д., Ткачук А. А., Соловьев В. С., Клейман А. С., Романько В. Н.; Госстандарт и вторичные эталоны Украины – Дудич И. И., Ахмадов А. А., Величко О. Н.; РИРВ – Плужников С. Н., Ильин Г. М., Геворкян А. Г., Болотов И. М., Кошелев В. К.; НАНУ –

Современное состояние и перспективы РМС

К сожалению, после 2003 г. практическое применение РМС было прекращено. К этому времени подразделения РИРВ во главе с зам. директора Новиковым Г. Д., специализирующиеся в разработке РМАС, образовали ЗАО "СИМЕТА" (синхронизация метеорная) и, хотя сотрудники ЗАО неоднократно подымали вопрос об использовании РМС в Государственной системе единого времени и эталонных частот "Цель", работы по созданию РМАС в России были приостановлены. Госстандарт Украины, хотя и включил работы по РМС в программу создания Государственной службы единого времени и эталонных частот, фактически эти работы не финансирует. В то же время 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 [40].

Выполненные в последние годы исследования показали:

- 1) РМАС позволяет осуществлять сличения в пределах прямой видимости [41];
- 2) реальные возможности снижения погрешностей РМАС «МЕТКА-6М» до 10 нс [42];
- 3) перспективы полуактивного РМС [38];
- 4) РМС может быть использован для синхронизации сети связи Украины [43, 44].

Возможности применения РМАС для синхронизации пунктов в пределах прямой видимости была проверена в 2002 г. на линии ННЦ ИМ (Государственный эталон и РМАС «МЕТКА-6М») – ХНУРЭ (ИМП с ЗРС и стандарт СЧВ-74). Результаты эксперимента приведены в табл. 7 и на рис. 7 (гистограмма остатков после линейной аппроксимации результатов измерений сеанса №4).

Рассматривая перспективы применения РМС для решения задачи синхронизации цифровой сети связи Украины, можно отметить следующие преимущества РМС перед СРНС [43, 44]:

а) существенно более высокая оперативность РМС, о чем наглядно иллюстрирует рис. 8, на котором приведены семейство графиков для ряда значений относительной нестабильности частот генераторов $\Delta f/f_0 = \Delta f/t$ и графики зависимости погрешностей сравнения шкал времени от времени накопления результатов $\sigma(t_i)$ для системы GPS и двух РМАС («МЕТКА-6» и «МЕТКА-11»);

б) более предпочтительные экономические показатели РМС;

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

Примером оперативности РМС может служить сеанс сравнения водородного генератора пункта НАКУ КА с первичным эталоном Украины продолжительностью около трех часов. В течение сеанса была выявлена нестабильность частоты генератора пункта НАКУ КА $\Delta f/f_0 \approx 10^{-11}$. Оценивая возможности применения РМС для синхронизации сети связи Украины, следует учитывать, что первичный и вторичные эталоны времени и частоты Украины (Харьков, Киев) оснащены РМАС «МЕТКА-6М». Для синхронизации пунктов в пределах прямой видимости от этих эталонов, можно использовать ИМП с ЗРС.

Исследования альтернативных пассивных методов синхронизации

В настоящее время основными для синхронизации времени и частоты являются методы, основанные на использовании сигналов СРНС GPS и ГЛОНАСС. Учитывая ряд недостатков этих методов (малое соотношение сигнал/шум; недостаточная оперативность; низкая помехоустойчивость; зависимость от работоспособности зарубежных систем) монопольное положение в Украине, которое занимает СРНС в области синхронизации, играет отрицательную роль. В связи с этим актуальным стал поиск альтернативных пассивных методов синхронизации, основанных на АОО.

Таблица 7

Номер сеанса	Число измерений		$\Delta T / t \cdot 10^{-8}$	СКО, нс
	всего	с $\Delta T_i > 3\sigma$		
1	150	4	5,67	15,1
2	254	8	5,62	14,7
3	254	9	5,53	15,7
4	254	5	5,66	16,0
5	254	4	5,57	15,5

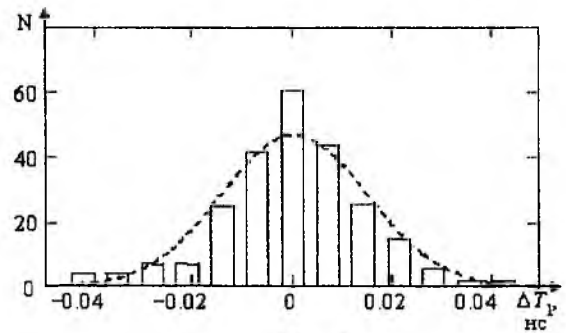


Рис. 7

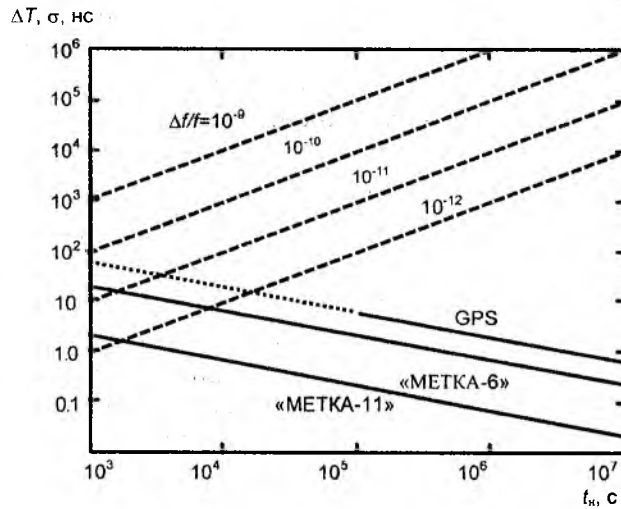


Рис. 8

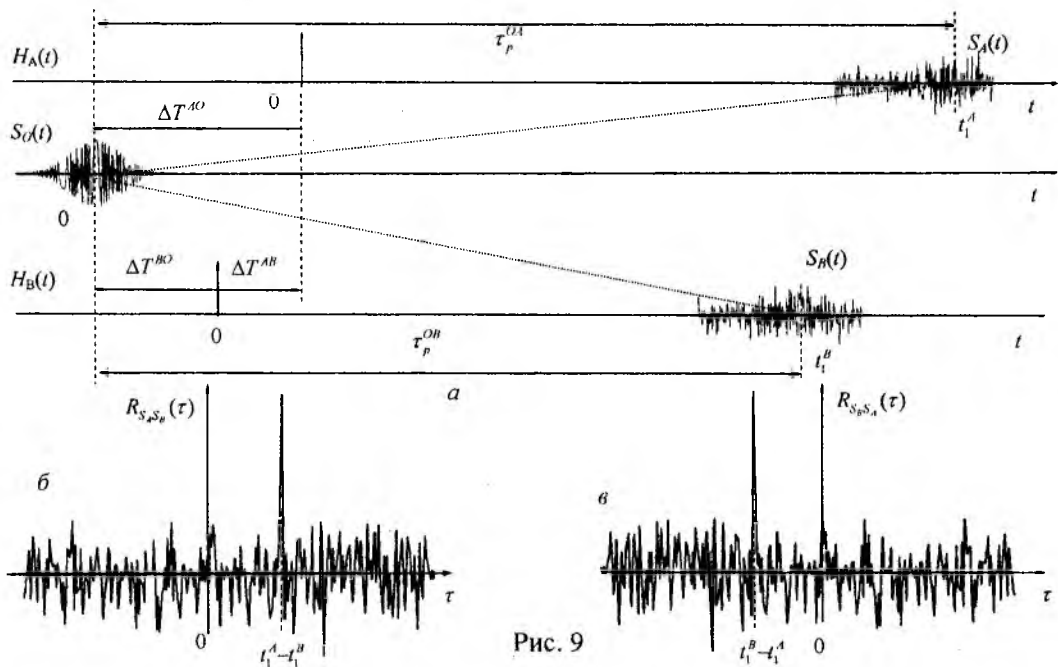


Рис. 9

Принципиальными отличиями разработанных на кафедре ОРТ предложений по реализации АОО являются: применение в качестве общего источника сигналов наземного (в пределах прямой видимости) и спутникового (в глобальных масштабах) ТВ в сочетании с взаимокорреляционной обработкой принимаемых в пунктах сигналов (рис. 9).

Применение сигналов спутникового ТВ для этой цели запатентовано [45] и оценено с теоретической точки зрения [46].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований по применению сигналов наземного ТВ для синхронизации пунктов в пределах прямой видимости приведены в работах [47, 48]. В качестве общего сигнала в этом случае предложено использовать измерительный многочастотный сложный сигнал для измерения АЧХ трактов. Оценка нестабильности времени задержки сигналов при РРВ в пределах прямой видимости, определяющая основную погрешность синхронизации, выполнена в работе [49].

Теоретические и предварительные экспериментальные исследования возможностей применения для синхронизации времени и частоты сигналов ТВ в сочетании с АОО показывают, что такой метод позволит обеспечить наносекундные погрешности и сможет конкурировать с СРНС.

Список литературы: 1. Мангелл А. Дж. Национальные эталоны времени и частоты // ТИИЭР. 1986. Т.74, № 1. 2. Болотов И. М., Геворкян А. Г. Развитие научно-технических 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. 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.9–18. 6. Lattorre V., Jonson G. Time synchronisation techniques // "IEE INT. Conv. Rec.". 1964. Part 6. P. 422–428. 7. 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.38–42. 8. Сидоров В. В., Кардоник Г. С., Плеухов А. Н. Высокоточная синхронизация разнесенных радиотехнических систем. Казань: Изд-во КГУ, 1978. 9. Коваль Ю. А., Кащеев Б. Л., Горбач В. И., Бондарь Б. Г. Метеоры сегодня. Киев: Техника, 1996. 196 с. 10. Кащеев Б. Л., Бавыкина В. В., Коваль Ю. А. и др. Оценка кратковременной нестабильности времени задержки сигналов при метеорном распространении радиоволн // Радиотехника. 2001. Вып. 120. С.25–32. 11. 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. 12. Коваль Ю. А., Кащеев Б. Л., Кундюков С. Г. Фазовая радиометеорная аппаратура сличения шкал времени // Измерительная техника. 1998. N 5. С.27-30. 13. Сидоров В. В., Курганов А. Р., Плеухов А. Н. и др. Экспериментальное исследование фазовой нестабильности и относительной фазовой невзаимности при метеорном и E_s РРВ // Метеорное распространение радиоволн. Казань: 1981. Вып.17. С. 30–39. 14. Коваль Ю. А., Бавыкина В. В., Трощин О. Л. Анализ путей совершенствования алгоритмов измерения сдвига шкал в системах синхронизации времени и частот // Радиотехника. 2001. Вып. 118. С. 85–91. 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: Изд-во 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: Изд-во ХГУ, 1981. Вып. 59. С.50–57. 20. Бавыкина В. В., Коваль Ю. А. О влиянии формы огибающей ЛЧМ- сигналов на погрешность сличения шкал хранителей времени // Радиотехника. Харьков: Изд-во ХГУ, 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: Изд-во 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.15–16. 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 України 20380 А, G 04 C 11/02. Спосіб обробки сигналів при зв'язанні шкал часу та пристрій для його реалізації / Коваль Ю. О., Дудник Б. С., Кащеев Б. Л., Кундюков С. Г., Нестеренко Г. В., Макаренко Б. І., Леман Ю. О., Семенов С. Ф. № 95094289; заявл. 26.09.1995. Оpubл. 15.07.1997. 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: Изд-во 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 метеорологического сличения шкал времени // Радиотехника. 1999. Вып. 109. С. 75–82; 2000. Вып. 113. С. 47–52. 30. *Дудник Б. С., Коваль Ю. А., Пушкин С. Б.* Критерии оценки точностных показателей радиометеорологических комплексов для синхронизации шкал времени // Измерительная техника. 1986. №1. С.16–18. 31. *Коваль Ю.А., Бавыкина В.В., Нестеренко Г.В.* О применении информационного подхода к анализу метеорологических систем сличения эталонов времени // Радиотехника. Харьков: Изд-во ХГУ, 1984. Вып. 71. С.57–62. 32. *А.С. 1741096 СССР, МКИ G 04 C 11/02.* Устройство для сличения эталонов времени / Ю.А. Коваль, Кашеев Б.Л., Дудник Б.С., Моисеев В.П., Семенов С.Ф., Леман Ю.А., Плужников С.Н., Александров А.М., Васильев В.Д. № 4701164/09 заявл. 6.06.89. Опубл. 15.06.92. Бюл. № 22. 33. *Кашеев Б. Л., Дудник Б. С., Коваль Ю. А., Бондарь Б. Г., Нестеренко Г. В., Ткачук А. А., Бавыкина В. В., Антипов И. Е., Леман Ю.А., Семенов С. Ф., Кундюков С. Г., Горбач В. И., Татарец Л. П., Моисеев В. П., Байдак В. М., Трамбовецкий С. В.* Радиометеорологический канал передачи информации и практические приложения // Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под ред. Кашеева Б.Л., Лагутина М.Ф., Прошкина Е.Г. 418 с. Харьков: ХНУРЭ, Бизнес информ, 2002. С. 219–305. 34. *Кашеев Б.Л., Коваль Ю.А., Пушкин С.Б., Семенов С.Ф.* Высокоточная радиометеорологическая система синхронизации эталонов времени Госстандарта СССР // Измерительная техника. 1989. № 4. С. 22–24. 35. *Величко О. М., Макаренко Б. І., Камінський В. Ю., Кашеев Б. Л., Сафронов Ю. І., Сидоренко Г. С., Яцків Я. С.* Державна служба єдиного часу і еталонних частот – необхідний елемент розвитку наземної космічної інфраструктури України // Космічна наука і технологія. 1997. Т. 3, № 1/2. С. 7–15. 36. *Бавыкина В. В., Коваль Ю. А., Ткачук А. А.* Исследование радиометеорологического канала синхронизации // Український метрологічний журнал. 2002. Вип. 2. С. 18–23. 37. *Коваль Ю.А.* Радиометеорологическая синхронизация эталонов времени // Харьков: Харьк. ин-т радиоэлектроники, 1992. 156 с. Деп. в УкрИНТЭИ 17.08.92, № 1251 – Ук. 92. 38. *Антипов И.Е., Коваль Ю.А., Обельченко В.В.* Развитие теории и совершенствование радиометеорологических систем связи и синхронизации. Харьков: Коллегиум, 2006. 308 с. 39. *Кашеев Б. Л., Коваль Ю. А., Дудник Б. С., Жуков Е. Т.* Метеорологическая синхронизация шкал времени: Учеб. пособие, МО СССР, 1989. 142 с. 40. *Кашеев Б. Л., Коваль Ю. А., Кундюков С. Г., Бавыкина В. В., Нестеренко Г. В., Антипов И. Е.* Расширение областей применения и перспективы совершенствования радиометеорологического метода синхронизации шкал эталонов времени // Прикладная радиоэлектроника. 2005. Т. 3. № 1. С.2–15. 41. *Коваль Ю.А., Кундюков С.Г., Бавыкина В.В., Ткачук А.А., Нестеренко Г.В.* Применение радиометеорологической аппаратуры для оперативной синхронизации стандартов времени и частоты в пределах прямой видимости // Радиоэлектроника и информатика. 2004. № 1. С.14–19. 42. *Ткачук А.А., Коваль Ю.А., Нестеренко Г.В., Обельченко В.В., Миях М.В., Иванова Е.А.* Пути повышения точности радиометеорологической аппаратуры синхронизации «МЕТКА-6М» // Метрологія та прилади. 2008. № 4. С. 22–26. 43. *Кашеев Б. Л., Коваль Ю. А., Кундюков С. Г.* О возможности использования радиометеорологического канала для синхронизации национальной сети связи Украины // Зв'язок. 1999. №5. С.32–36. 44. *Коваль Ю. А., Антипов И.Е., Крючкова Л.П., Кундюков С.Г., Нестеренко Г.В.* Радиометеорологический метод синхронизации в сетях электросвязи // Сборник научных трудов НГА Украины. № 11, том 2. Днепропетровск, 2001. С.53–57. 45. *Патент України на корисну модель № 38167 (зарєєстровано 25.12.2008).* Спосіб частотно-часової синхронізації просторово рознесених еталонів і стандартів часу й частоти / Коваль Ю.О., Нестеренко Г.В., Иванова О.О. 46. *Коваль Ю.А., Иванова Е.А., Костыря А.А., Ткаченко А.А., Ямницький В.А., Ушаков С.И.* Погрешности частотно-временной синхронизации при использовании сигналов телекоммуникационных геостационарных спутников с учетом модели их перемещения // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2009. Вып. 4/10 (40). С. 25–29. 47. *Коваль Ю.А., Костыря А.А., Обельченко В.В., Иванова Е.А., Бондарь Е.Ю., Ермолаев Е.П., Миях М.* Анализ возможностей метода общего охвата для высокоточной синхронизации стандартов времени и частоты в пределах прямой видимости // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. 2009. Вип. 1(20). С. 21–30. 48. *Костыря А.А., Коваль Ю.А., Иванова Е.А., Ермолаев Е.П., Миях М.В., Носов С. И., Бондарь Е.Ю.* Оценка потенциальной точности синхронизации стандартов времени и частоты при использовании измерительного телевизионного сигнала // Системи управління, навігації та зв'язку. 2009. Вип. 2(10). С. 40–45. 49. *Антипов И.Е., Бондарь Е.Ю., Костыря А.А., Иванова Е.А.* Анализ времени распространения метровых волн в приземном слое для задач высокоточной синхронизации времени и частоты // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2009. Вып. 2/3 (38).