



ДИСТАНЦИОННАЯ КАЛИБРОВКА (ПОВЕРКА) МЕР ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

В.Н. Романько, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, директор научного центра ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков



Проведен анализ современного состояния вопросов дистанционной калибровки (поверки) и рассмотрен новый подход к созданию измерительных комплексов, использующих разработанный метод двойной дифференциальной коррекции

фазы и обеспечивающих решение проблемы дистанционного измерения существующего перечня метрологических параметров прецизионных мер времени и частоты.

The analysis of the current state of the remote calibration was carried out, a new approach of development of measurement complexes was considered. These complexes use the developed double differential phase correction method and provide the problem solution of remote measurement of the existing list of metrological parameters of precision measures of time and frequency.

Введение

В настоящее время одним из перспективных и развивающихся направлений автоматизации метрологических исследований является дистанционная калибровка (поверка) средств измерительной техники (СИТ), которая дает возможность оперативного контроля метрологических характеристик (МХ) СИТ и находит все большее распространение благодаря уменьшению времени проведения метрологических исследований, снижению их стоимости, решению проблем, связанных с необходимостью вывода из эксплуатации и перевозкой СИТ [1–4]. Возможность передачи сигналов времени и частоты на расстояние (с 1920 г.) с помощью разнообразных средств связи способствовала выпуску приемников-компараторов, которые обеспечивали оценку отклонения от номинального действительного значения частоты исследуемых мер времени и частоты. При этом вопросу прослеживаемости измерений, в современном понимании этого термина, надлежащего внимания не уделялось. В период с 1980 по 1983 гг. в Национальном институте стандартов и технологий (The National Institute of Standards and

Technology (NIST)), США, была рассмотрена возможность использования сигналов навигационной системы LORAN-C для создания СИТ, которые решали бы задачу дистанционной калибровки стандартов частоты и автоматической передачи результатов калибровки в NIST для обработки и постоянного мониторинга [5]. С 1994 г., когда была полностью развернута группировка навигационных спутников глобальной спутниковой системы позиционирования GPS и когда Министерство обороны США официально открыло доступ для использования системы гражданским потребителям [6], NIST приступил к поставке потребителям СИТ, входящих в сервисную систему FMAS (Frequency Measurement and Analysis Service), которые стали широко использоваться для дистанционной калибровки мер времени и частоты. В качестве источника эталонных сигналов для FMAS используется приемник сигналов GPS. Целый ряд оригинальных технических решений позволяет получить действительное значение частоты калибруемой меры с расширенной неопределенностью на уровне $2 \cdot 10^{-13}$ за сутки непрерывных измерений [7, 8].

Следует отметить, что с опозданием почти в 20 лет дистанционную калибровку начали использовать для других видов измерений, например, с февраля 2001 г. Национальная физическая лаборатория Великобритании проводит дистанционную калибровку автоматических анализаторов цепей и становится службой калибровки, которая предоставляет возможность оперативного контроля измерений с использованием национального эталона простым подключением к сети Интернет [9].

В ННЦ "Институт метрологии" работы по дистанционному определению МХ рубидиевых мер времени и частоты с использованием Интернет активно проводятся с 1997 г. [10–13]. При этом в качестве эталонных сигналов использовались сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) с частотой 1 Гц, а измерение разницы шкал времени производилось компаратором с разрешающей способностью 1 нс. Это давало возможность получить действительное значение частоты меры, которая калибруется (поверяется), с неопределенностью на уровне $1 \cdot 10^{-12}$ за сутки измерений. Однако задача определения кратковременной нестабильности частоты (за 0,1; 1; 10; 100;

1000 с) высокостабильных генераторов (рубидиевых, цезиевых, водородных) оставалась нерешенной.

В настоящее время в научном центре ведутся работы по созданию СИТ, которые позволят реализовать возможность проведения дистанционной калибровки (поверки) мер времени и частоты с определением всех видов метрологических параметров. Исследуется возможность использования принципов, алгоритмов и отдельных модулей, которые заложены во введенный в эксплуатацию в 2011 г. вторичный эталон единиц времени и частоты [14], для разработки и изготовления измерительного комплекса для проведения дистанционной калибровки (поверки) мер времени и частоты с неопределенностью измерений не хуже, чем $1 \cdot 10^{-14}$ за сутки наблюдений. Особенностью таких приборов является использование процессорной техники и оригинального программного обеспечения (ПО), что позволяет управлять данными СИТ в реальном масштабе времени с использованием стандартных линий связи (Интернет), отображать результаты измерений и дистанционно влиять на процессы калибровки и обработки результатов измерений.

Целью статьи является анализ современного состояния вопросов проведения дистанционной калибровки (поверки) и рассмотрение нового подхода к созданию измерительных комплексов, обеспечивающих решение проблемы дистанционного измерения всей номенклатуры метрологических параметров прецизионных мер времени и частоты в соответствии с требованиями, заложенными в техническую документацию.

Общие принципы проведения дистанционной калибровки

Развитие автоматизированных измерительных приборов и компьютерных сетей, рост стандартов качества в промышленности и научно-исследовательских приложениях в последние годы привели к реализации Интернет-поддержки систем калибровки (поверки) СИТ, особенно специально для средств промышленного применения [15–17]. При этом термин “Интернет-поддержка” метрологической деятельности трактуется как широкое понятие, описывающее использование телекоммуникационных систем для обеспечения удобного доступа к целому ряду измерений и калибровочных (поверочных) услуг [15].

Эти услуги обычно включают в себя следующие элементы [18]:

- наличие пульта дистанционного управления и контроля измерительного оборудования (рабочих приборов и эталонов);
- прослеживаемость измерений, которые проводятся на рабочем месте у клиента, но управляются удаленно из измерительной лаборатории при проведении калибровки (поверки), что терминологически и является Интернет-поддержкой калибровки (поверки);
- доступ к задокументированной истории измерений при проведении периодических калибровок (поверок) и другим данным, связанным с эксплуатацией СИТ;
- доступ к библиотекам метрологических тестов программного обеспечения и алгоритмов измерений [19, 20].

Дистанционная калибровка СИТ, как правило, осуществляется по схеме, приведенной на рис. 1 [4].

Основными компонентами системы являются калибруемые СИТ, специализированное ПО, эталонные СИТ. Для проведения дистанционной калибровки лаборатория клиента, использующая СИТ, подает заявку в метрологическую службу (МС) и оплачивает затраты, связанные с проведением калибровки (поверки), затем по почте получает эталонные средства измерительной техники (ЭСИТ), необходимые для проведения калибровки (поверки). Сотрудник лаборатории с помощью персонального компьютера (ПК) клиента обращается к Web-странице МС, загружает специализированное ПО, подключается к серверу системы. Сотрудник МС с помощью специализированного ПО управляет калибруемым СИТ и ЭСИТ и проводит дистанционные измерения. По полученной измерительной информации рассчитывается неопределенность измерения, после чего выдается свидетельство о калибровке (поверке).

Очевидно, что дистанционная калибровка не может быть реализована для всех СИТ, а только для тех, которые имеют возможность подключения к ПК. В простейшем случае Интернет действует как средство передачи данных.

Наиболее удобным является проведение дистанционной калибровки в случаях, когда:

в качестве используемых ЭСИТ применяются эталонные меры (например, аттенюаторы, согласованные и несогласованные нагрузки, меры времени и частоты);

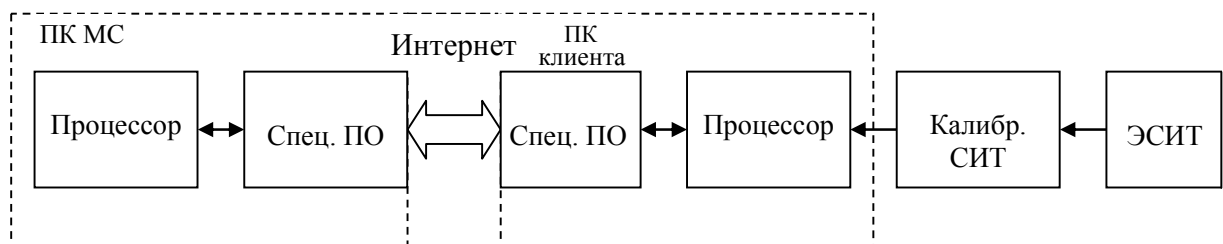


Рис. 1. Схема проведения дистанционной калибровки

лаборатория, нуждающаяся в калибровке СИТ, обладает собственными ЭСИТ;

ЭСИТ входят в состав калибруемого СИТ.

Рассмотрим способ реализации дистанционной калибровки на примере Службы измерения частоты и анализа FMAS (Frequency Measurement and Analysis Service) NIST [21].

FMAS представляет собой сеть отдельных систем измерения частоты (FMS), расположенных в лаборатории заказчика и связанных телефонными (ТЛФ) линиями (или Интернет) с лабораторией анализа, расположенной в NIST в Боулдере, Колорадо. Каждая система включает в себя GPS-приемник со спутниковой антенной, измеритель интервалов времени и компьютер, который управляет измерениями (рис. 2). Данные, собранные со всех сайтов клиентов, хранятся и архивируются в NIST, а отчеты по калибровке каждый месяц высылаются всем клиентам.

Таким образом, NIST может непрерывно следить за стабильностью частоты тестируемого оборудования каждого клиента. Подписчики службы NIST получают полную систему для измерения частоты, которая включает в себя все необходимое, чтобы обеспечить точность измерения частоты и прослеживаемость к эталонной базе NIST.

В Службе FMAS реализована сетевая технология «клиент-сервер», позволяющая: организовать одновременное управление и проведение независимых измерений на нескольких удаленных измерителях с одного компьютера; организовать обмен измерительной и калибровочной информацией; построить на базе средств измерений, поддерживающих данную технологию, широкую измерительную сеть.

ПО и алгоритмы отдельных подпрограмм разработаны таким образом, чтобы исключить неверные действия оператора. ПО измерителя, реализующее алгоритм функционирования измерителя и различные сервисные функции, входит в комплект поставки измерителя.

Управление работой измерителя, выбор режимов измерения и калибровки, а также выбор формы представления и регистрации результатов измерения осуществляются с клавиатуры ПК сервера в диалоговом режиме.

Система использует GPS-сигналы для формирования опорного сигнала с частотой 1 Гц. Именно через GPS-сигналы обеспечивается прослеживаемость к эталонам NIST, так как те же самые сигналы GPS, полученные абонентами, получают в NIST для сравнения с национальным стандартом частоты.

NIST оценивает качество предоставления услуг службой FMAS на соответствие требованиям ISO 17025 каждые пять лет. Калибровочные и измерительные возможности службы FMAS получили международное признание, опубликованы в базе данных ключевых сличений BIPM (KCDB). При этом относительная расширенная неопределенность измерения действительного значения частоты удаленной меры при коэффициенте охвата $k=2$ с уровнем доверия $p=0,95$ составляет $2 \cdot 10^{-13}$ за сутки [22].

Дистанционная калибровка мер времени и частоты в Украине

По результатам международных сличений CCTF-K001.UTC в KCDB на сегодняшний день от

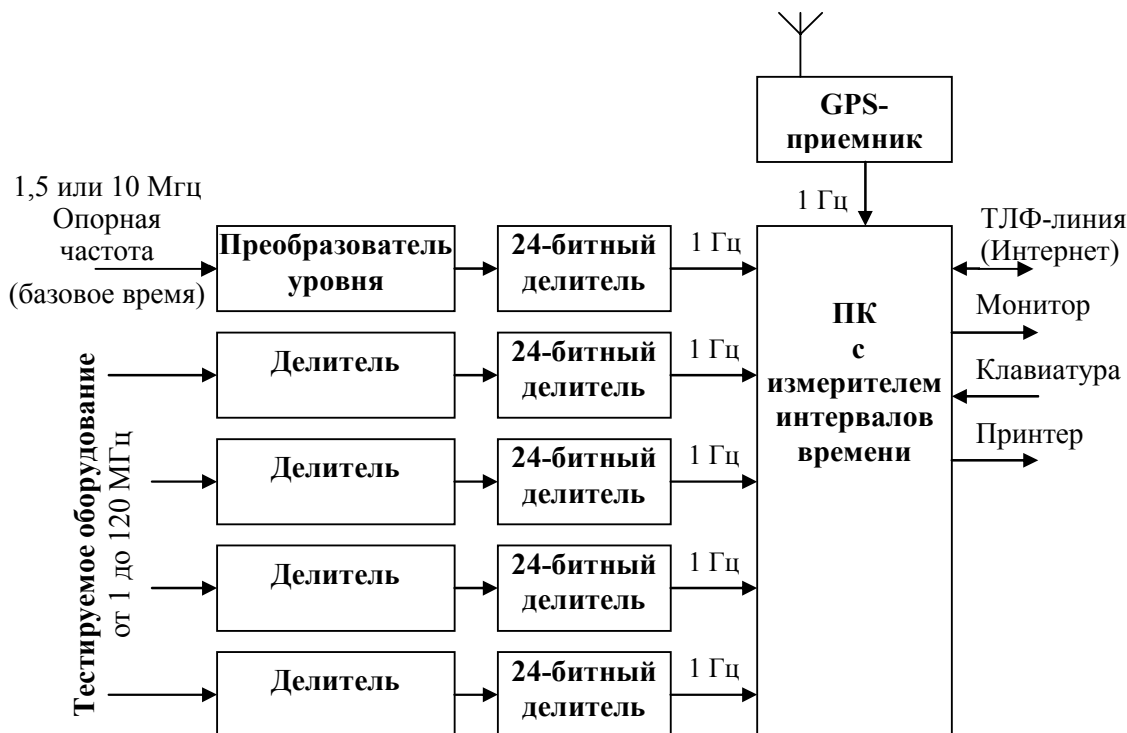


Рис. 2. Структурная схема FMS

Украины опубликовано 17 строк [23]. Еще 13 строк проходят межрегиональную экспертизу с привлечением экспертов EURAMET, AFRIMETS, APMP, SIM.

Вопросы дистанционной калибровки мер времени и частоты (МВЧ) представлены двумя строками:

- часы, удаленные по отношению к национальной шкале координированного времени Украины UTC(UA);
- часы, удаленные по отношению к международной шкале координированного времени UTC.

Калибровка часов, удаленных по отношению к UTC(UA), проводится для определения действительного значения разности шкал времени калибруемого прибора (удаленные часы, Time and Frequency Calibration Services of NSCIM (Ukraine), строка 3), размещенного удаленно по отношению к государственному первичному эталону единиц времени и частоты (ДЕТУ 07-01-97) [23].

Калибровка выполняется методом косвенного дифференциального сравнения с помощью компараторов (измерителей интервалов времени) шкалы времени, которая воспроизводится калибруемым прибором, и шкалы времени UTC(UA), которая воспроизводится ДЕТУ 07-01-97, с использованием сигналов ГНСС. Измерения проводятся в соответствии с Методикой калибровки МКУ 07-28:2010 [24].

Комплекс аппаратуры, необходимой для проведения калибровки удаленных часов, состоит из аппаратуры потребителя и аппаратуры государственного первичного эталона единиц времени и час-

тоты. Структурная схема комплекса аппаратуры приведена на рис. 3.

Измерение разности хода национальной шкалы времени Украины UTC(UA) и шкалы времени $T_{\text{ГНСС}}$ глобальной навигационной спутниковой системы производится на ДЕТУ 07-01-97 каждую секунду непрерывно в течение суток:

$$\Delta T_{\text{UTC(UA)}} = \text{UTC(UA)} - T_{\text{ГНСС}}.$$

С помощью специализированного программного обеспечения производится статистическая обработка результатов измерений, определяется математическое ожидание $\Delta \bar{T}_{\text{UTC(UA)}}$ разности хода шкалы времени UTC(UA) и шкалы $T_{\text{ГНСС}}$ навигационного приемника сигналов ГНСС. Результаты измерений публикуются в Бюллетене Т на сайте ННЦ “Институт метрологии”.

В месте расположения калибруемого прибора при помощи измерителя интервалов времени (в составе электронно-счетного частотомера) осуществляется измерение интервала времени между передним фронтом импульса частоты 1 Гц шкалы времени МВЧ, которую калибруют, и импульсом частоты 1 Гц внутренней шкалы времени приемника сигналов ГНСС. На частотомер должен быть подан сигнал внешней синхронизации с частотой 5 МГц от эталонной МВЧ или от МВЧ, которую калибруют.

Информация с выхода частотомера (значение интервала времени) передается в ПЭВМ для дальнейшей обработки и хранения. ПЭВМ должна быть оборудована интерфейсом “канал общего пользо-



Рис. 3. Структурная схема комплекса аппаратуры для проведения калибровки удаленных часов

вания” (КОП) и иметь соответствующее программное обеспечение.

Массив данных с результатами измерений, в котором указываются время начала и продолжительность серий измерений, доставляется (пересылается по линии связи) на ДЕТУ 07-01-97 для дальнейшей обработки.

После получения массива данных с результатами измерений при помощи специализированного программного обеспечения вычисляется среднесуточное значение разности между шкалой времени МЧВ $\Delta\bar{T}_{\text{кп}}$, которую калибруют, и шкалой времени, формируемой приемником ГНСС $T_{\text{ГНСС}}$:

Далее вычисляют действительное значение разности шкал времени калибруемого прибора $T_{\text{кп}}$ и национальной шкалы координированного времени Украины UTC(UA):

$$\Delta\bar{T}_{\text{кп-UTC(UA)}} = \Delta\bar{T}_{\text{кп}} - \Delta\bar{T}_{\text{UTC(UA)}}.$$

Проведенные расчеты и экспериментальные исследования показывают, что расширенная неопределенность измерения действительного значения разности шкал времени калибруемого прибора и национальной шкалы координированного времени Украины при коэффициенте охвата $k=2$ с уровнем доверия $p=0,95$ составляет 15 нс при времени усреднения одни сутки [23].

Калибровка часов, удаленных по отношению к UTC, проводится для определения действительного значения разности шкал времени калибруемого прибора (удаленные часы, Time and Frequency Calibration Services of NSCIM (Ukraine), строка 4), размещенного удаленно по отношению к ДЕТУ 07-01-97, и международной шкалы координированного времени UTC [23].

Калибровка выполняется методом дифференциального сличения шкалы времени UTC (рассчитывается Международным бюро мер и весов) и калибруемого прибора со шкалой времени ГНСС. Измерения проводятся с использованием оборудования, структурная схема которого представлена на рис. 3, в соответствии с Методикой калибровки МКУ 07-29:2010 [25].

После получения массива данных с результатами измерений при помощи специализированного программного обеспечения вычисляется среднесуточное значение разности между шкалой времени МВЧ, которую калибруют, $\Delta\bar{T}_{\text{кп}}$, и шкалой времени, формируемой приемником сигналов ГНСС, $T_{\text{ГНСС}}$.

Далее вычисляют действительное значение разности шкал времени калибруемого прибора $T_{\text{кп}}$ и международной шкалы координированного времени UTC:

$$\Delta\bar{T}_{\text{кп-UTC}} = \Delta\bar{T}_{\text{кп}} - \Delta\bar{T}_{\text{UTC(UA)}} + \Delta T_{\text{UTC}},$$

где ΔT_{UTC} , с, – поправка на расхождение национальной шкалы времени Украины UTC(UA) и шкалы международного координированного времени UTC.

Необходимо отметить, что ввод поправки ΔT_{UTC} выполняется после публикации ВРМ Циркуляра Т (Circular T), содержащего информацию о разности хода национальной шкалы времени Украины UTC(UA) и международной координированной шкалы времени UTC на момент времени проведения калибровки. Для определения поправки ΔT_{UTC} необходимо получить Циркуляр Т (Circular T) с FTP сервера ВРМ, адрес ссылки: ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/publication/cirt.*** (где *** – цифры номера Циркуляра Т); или с WEB сервера ВРМ, строка запроса в таблице секции 1 Циркуляра Т (Coordinated Universal Time UTC and its local realizations UTC(k). Computed values of [UTC-UTC(k)] and uncertainties valid for the period of this Circular) www.bipm.org/jsp/en/TimeFtp.jsp?TypePub=publication#nohref. Необходимо выбрать из строки UA (Kharkov) значение поправки ΔT_{UTC} на расхождение национальной шкалы времени Украины UTC(UA) и шкалы международного координированного времени UTC, соответствующее дате проведения калибровки MJD . В том случае, если даты поправок в Циркуляре Т не совпадают с датой проведения калибровки, необходимо выбрать поправки $\Delta T_{\text{UTC(UA)-}}$ и $\Delta T_{\text{UTC(UA)+}}$ на ближайшие дни, предшествующие (MJD_-) и последующие (MJD_+) за датой проведения калибровки. Далее проводится расчет поправки $\Delta T_{\text{UTC(UA)}}$ на дату проведения измерений методом линейной аппроксимации.

Расширенная неопределенность калибровки рассчитывается по формулам, приведенным в Методике [25]. Проведенные расчеты и экспериментальные исследования показывают, что расширенная неопределенность измерения действительного значения разности шкал времени калибруемого прибора $T_{\text{кп}}$ и международной шкалы координированного времени UTC при коэффициенте охвата $k=2$ с уровнем доверия $p=0,95$ составляет 50 нс при времени усреднения одни сутки [23].

По результатам калибровки приборов при определении действительного значения разности шкал времени для калибруемого прибора выдается сертификат с логотипом CIPM MRA и COOMET.

Таким образом, при проведении калибровки измерительных приборов, формирующих шкалу времени, обеспечивается прослеживаемость как к государственному первичному эталону единицы времени – секунды, единицы частоты – герца и национальной шкалы координированного времени Украины UTC(UA), так и к международному эталону, который воспроизводит всемирную координированную шкалу времени UTC.

Следует заметить, что, как правило, в эксплуатационной документации меры времени и частоты, подлежащей поверке, указываются метрологические параметры, подлежащие определению не только за сутки, но и за короткие интервалы времени (1000 с и менее). На этих измерительных интервалах ход шкалы ГНСС-приемников может достиг-

нать значительной величины (в зависимости от типа приемника, это могут быть десятки наносекунд). Методики калибровки, как используемые сервисом FMS, так и приведенные в [24, 25], не позволяют определять такие параметры нестабильности частоты прецизионных мер, как среднеквадратическое относительное отклонение частоты и среднеквадратическую относительную случайную вариацию частоты (среднеквадратическое относительное двувыворочное отклонение частоты) за короткие интервалы времени выборки.

В связи с этим в ННЦ “Институт метрологии” было предложено в состав аппаратуры потребителя (рис. 3) ввести синхронизируемую по сигналам ГНСС с поправками, формируемыми ДЕТУ 07-01-97, рубидиевую меру частоты (так называемый метод двойной дифференциальной коррекции фазы), а измерения при определении метрологических параметров поверяемой меры вести с помощью специально разработанного при создании вторичного эталона фазового компаратора [14].

Теоретические принципы синхронизации мер частоты методом двойной дифференциальной коррекции фазы

Для обеспечения синхронизации мер частоты, которые входят в состав аппаратуры потребителя, с государственным первичным эталоном единиц времени и частоты (ГПЭВЧ) предлагается применять метод двойной дифференциальной коррекции фазы (МДДКФ) сигнала управляемой меры частоты (УМЧ) с использованием приемников сигналов ГНСС.

Следует отметить, что разработке МДДКФ способствовал целый ряд достижений науки и техники в области измерения времени и частоты [26–28]:

- повышение точности формирования групповой шкалы времени ГНСС;
- создание приемников сигналов ГНСС с фазовым управлением частотой опорных генераторов;

разработка малогабаритных управляемых рубидиевых модулей с относительным дискретным шагом подстройки частоты менее чем $1,5 \cdot 10^{-13}$.

Для обеспечения прослеживаемости измерений УМЧ должна получать единицу частоты от ГПЭВЧ Украины. Это возможно обеспечить, используя сигналы ГНСС и скоростные коммуникационные каналы, например, сеть Интернет (рис. 4).

Для реализации этого механизма синхронизации необходимо постоянное измерение фазы несущей одного или нескольких спутников ГНСС в месте расположения ГПЭВЧ (пункт А) и УМЧ (пункт В).

Типичная модель наблюдений за фазой несущей частоты ГНСС-приемника может быть представлена следующим соотношением [29, 30]:

$$\Phi_A^j = \rho_A^j + c(dt^j - dT_A) + \lambda N_A^j - d_{\text{ion}}^j + d_{\text{trop}}^j + \varepsilon_A^j, \quad (1)$$

где Φ_A^j – измерение фазы несущей от j -го ГНСС-спутника в приемнике ПРМ № 1 пункта А; ρ_A^j – действительное значение расстояния между приемником пункта А и j -м спутником; c – скорость света; dt^j – сдвиг часов j -го спутника; dT_A – временная разница между шкалой времени ГНСС и часами приемника ПРМ № 1 пункта А; λ – длина волны несущей частоты ГНСС; N_A^j – начальная целочисленная неопределенность фазы; d_{ion}^j , d_{trop}^j – ионосферные и тропосферные задержки соответственно; ε_A^j – случайная ошибка, которая предопределена многолучевым распространением сигналов, температурными влияниями, физическими факторами и т.д.

Для исследования процесса частотной синхронизации вначале необходимо изучить поведение опорного генератора ГНСС-приемника. Для этого внутренний генератор ГНСС-приемника заменим внешним. При этом член dT_A в (1) будет представлять временную разницу между ГНСС-часами и внешним генератором ПРМ № 1.

В пункте В, используя измерение аналогично уравнению (1), можно провести коррекцию частоты УМЧ:

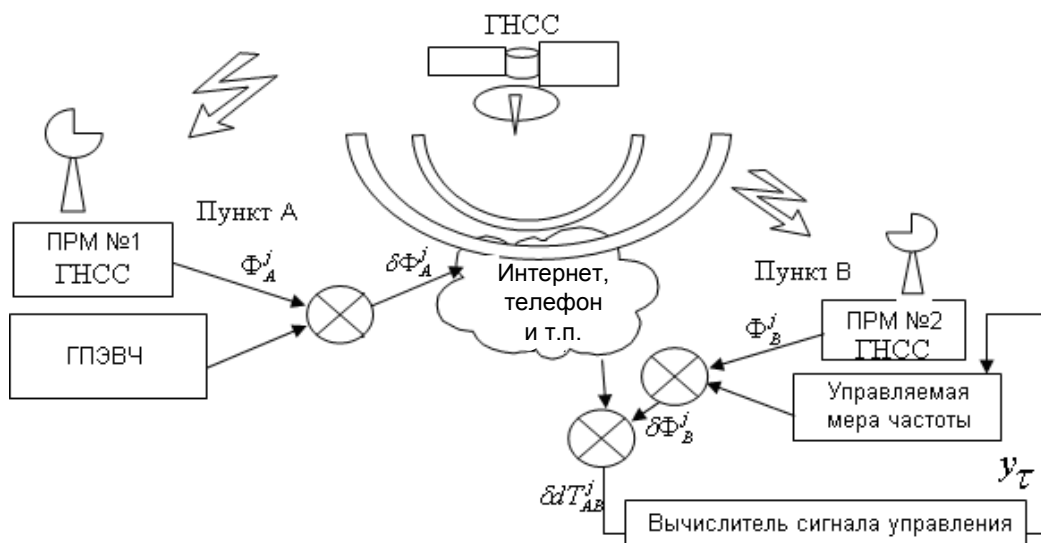


Рис. 4. Структурная схема метода двойной дифференциальной коррекции фазы управляемой меры частоты τ

$$\delta\Phi_B^j = \delta\rho_B^j + c\delta dt^j - c\delta dT_B - \delta d_{\text{юн}}^j + \delta d_{\text{тор}}^j + \delta\epsilon_B^j,$$

где $\delta(*)$ – оператор для определения разницы между двумя эпохами.

Таким образом определяется первое кольцо дифференциальной коррекции, недостатки которого определяются погрешностями сигнала, полученного приемником ПРМ № 2 пункта В, где расположена УМЧ. При реализации МДКФ для j -го спутника разностное уравнение может быть представлено в виде

$$\Delta\Phi_{AB}^j = \Delta\rho_{AB}^j - c\Delta\delta dT_{AB} + \lambda\Delta\delta N_{AB}^j + \Delta\epsilon_{AB}^j, \quad (2)$$

где $\Delta(*)$ – оператор для определения разницы между решениями приемников пункта А и пункта В для одного и того же спутника.

Благодаря сильной корреляции между смоделированными ионосферными и тропосферными задержками для двух приемников на короткой базе, члены $d_{\text{юн}}^j$ и $d_{\text{тор}}^j$ компенсируются.

Поскольку шкалы времени сравниваются с одними и теми же ГНСС-часами, то разница dT_{AB} в (2) есть фазовая разница между опорным генератором пункта А и генератором УМЧ пункта В. С другой стороны, если спутниковый сигнал постоянно отслеживается и нет пропущенных циклов, то разница циклической неопределенности dN_{AB}^j остается постоянной. Вследствие этого мы можем из уравнения (2) построить следующую времяразностную модель:

$$\Delta\Phi_{AB}^j = \Delta\rho_{AB}^j - c\Delta\delta dT_{AB} + \Delta\epsilon_{AB}^j, \quad (3)$$

С помощью телекоммуникационных каналов передачи данных информацию о фазе несущей и другие данные ГНСС-сообщений можно передавать между двумя объектами. Сдвиг частоты УМЧ по отношению к первичным часам ГПЭВЧ оценивается путем вычислений по формулам (2) и (3) с использованием разницы во времени наблюдаемых фаз несущей сигнала ГНСС-спутника. В процессе обработки суммарные ошибки существенно уменьшаются. Уравнение (3) можно представить таким образом:

$$\Delta\Phi_{AB}^j - \Delta\rho_{AB}^j = -c\Delta\delta dT_{AB} + \Delta\epsilon_{AB}^j. \quad (4)$$

Левая часть уравнения является разницей данных измерений и известных значений. Координаты антенны ГНСС-приемников с помощью базовых станций определяются с субмиллиметровой точностью, а координаты j -го спутника ГНСС определяются из переданного навигационного сообщения. Таким образом, основные ошибки, которые влияют на оценку сдвига частоты УМЧ, могут возникнуть при оценке правой части.

Оценку величины

$$\delta\Delta dT_{AB}(t_i) = \Delta dT_{AB}(t_i) - \Delta dT_{AB}(t_{i-1}),$$

где $t_i = t_{i-1} + \tau$, можно улучшить путем усреднения (4) за время τ для режима “all-in-view” при проведе-

нии ГНСС-наблюдений по всем J видимым спутникам. При этом разницу случайных ошибок $\Delta\delta\epsilon_{AB}^j$ можно считать распределенной по нормальному закону с нулевым средним. Так как величина $\Delta dT_{AB}(t_i)$ является разницей фаз между первичными часами ГПЭВЧ и удаленными часами УМЧ, то суммарная величина сигнала управления, пропорциональная сдвигу частоты, определяется как

$$y_{\tau}(t_i) = -\frac{\delta dT_{AB}(t_i)}{\tau} + \frac{\Delta\delta\epsilon_{AB}^j}{c\tau} = \frac{\Delta\Phi_{AB}^j - \Delta\rho_{AB}^j}{c\tau}. \quad (5)$$

Таким образом, после проведения двойной дифференциальной коррекции с помощью полученного управляющего сигнала (5), может быть выполнена синхронизация частоты относительно недорогого генератора пункта В (УМЧ) и первичного генератора пункта А (ГПЭВЧ). Конечно, изменения параметров окружающей среды, такие, как вибрация, температура, давление и влажность, приводят к необходимости проводить периодическое подстраивание частоты по определенным алгоритмам.

Экспериментальные исследования МДКФ

Для реализации МДКФ в составе аппаратуры потребителя используется ГНСС-приемник фирмы “Novatel” типа Flexpak-v1G, в котором применено современное программное обеспечение для обработки сигналов, позволяющее строить интегральную шкалу времени UTC, объединив информацию от всех спутников, сигналы которых принимаются (режим “all-in-view”). Кроме того, приемник этого класса имеет специальный выходной сигнал с частотой 5 или 10 МГц, который синхронизирован с шкалой времени UTC. Все это позволяет упростить механизм слежения за фазой путем переноса всех измерений на частоту 10 МГц, что существенно уменьшает инструментальные погрешности, возникающие в измерителях разности фаз исследуемых сигналов за счет многократного усреднения (более 10^3 за 1 с).

С целью изучения потенциальных возможностей и подтверждения преимуществ МДКФ, была проведена серия экспериментов, которые были реализованы в соответствии со структурной схемой на рис. 5.

При дифференциальном режиме исходная частота приемника ПРМ № 1 сигналов ГНСС сравнивается с частотой эталонного сигнала первичного генератора ГПЭВЧ, а частота приемника ПРМ № 2 сигналов ГНСС – с частотой управляемого рубидиевого модуля FE-5680A. Управляющим сигналом был суммарный сигнал, который позволяет воспроизводить эталонный сигнал на рубидиевом модуле с компенсацией погрешностей, которые вносятся отличиями сформированных приемниками сигналов ГНСС от эталонного сигнала ГПЭВЧ в каждый момент времени.

Для обработки результатов эксперимента было создано специальное программное обеспечение.

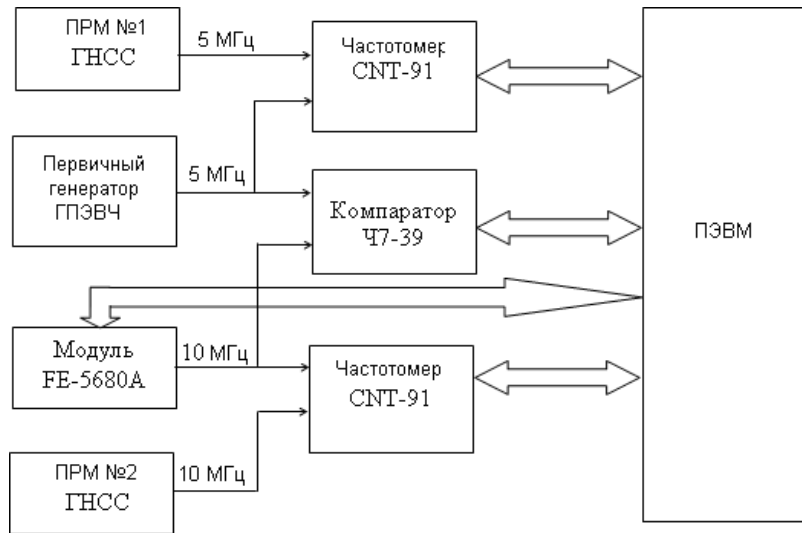


Рис. 5. Схема эксперимента по управлению частотой рубидиевого модуля с использованием МДКФ

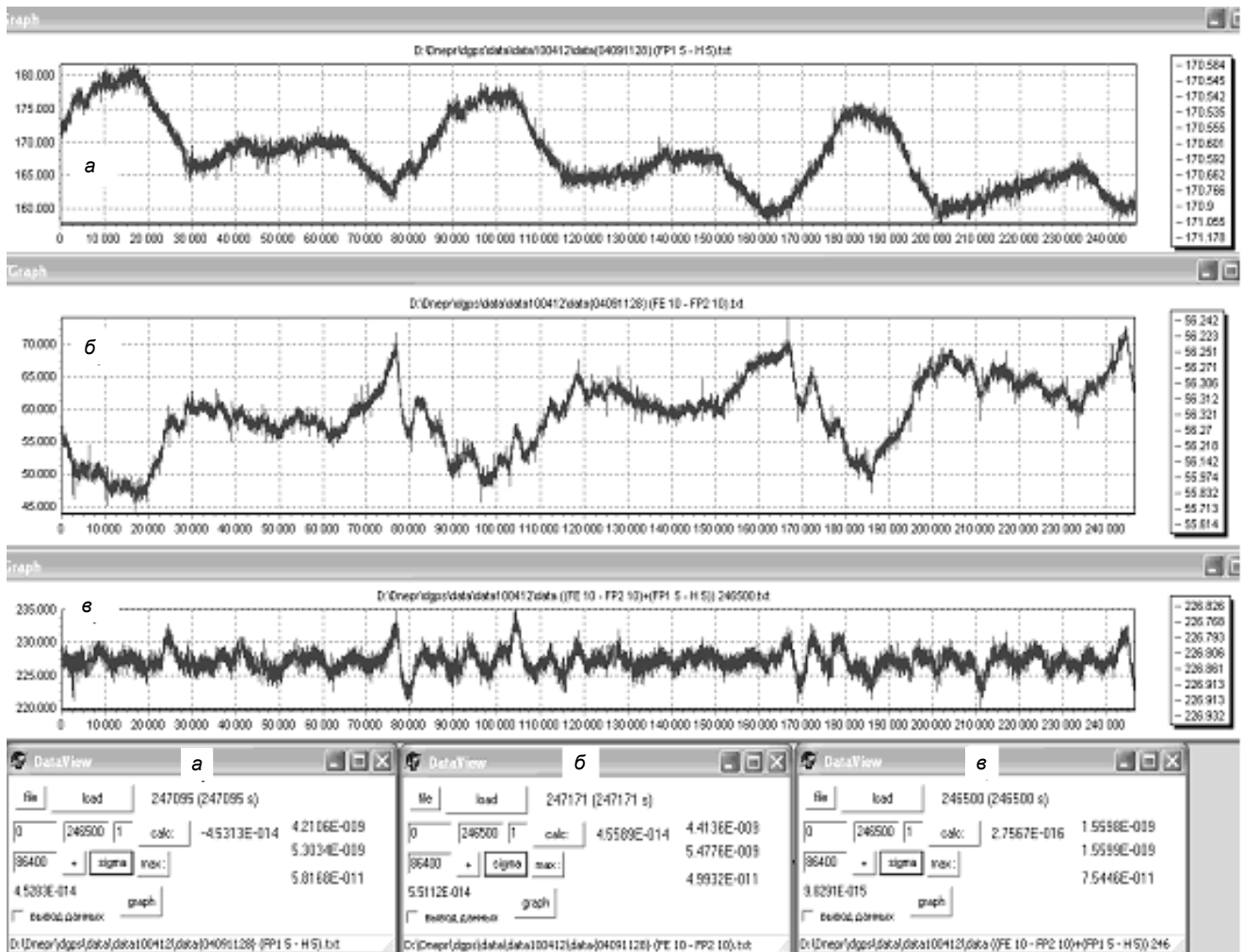


Рис. 6. Результаты эксперимента по управлению рубидиевым модулем в дифференциальном режиме на интервале времени измерения трое суток: а – разность фаз сигналов из выхода ПРМ № 1 ГНСС и первичного генератора ГПЭВЧ; б – разность фаз сигналов на выходе рубидиевого модуля и ПРМ № 2 ГНСС; в – разность фаз сигналов на выходе первичного генератора ГПЭВЧ и рубидиевого модуля

На рис. 6 приведены типичные результаты одной из сессий эксперимента на интервале времени измерений трое суток.

Для разработанного алгоритма управления нет необходимости каждую секунду передавать информацию о сравнении сигнала приемника ПРМ

№ 1 с эталонным сигналом первичного генератора ГПЭВЧ, достаточно предоставлять абсолютное отклонение разницы фаз и тренд за последние 1000 с.

При этом была обеспечена привязка рубидиевого модуля к первичному генератору ГПЭВЧ с погрешностью не хуже $2,8 \cdot 10^{-16}$, при том что относительный суточный ход частоты рубидиевого модуля без внешнего управления составляет $2,5 \cdot 10^{-12}$. Таким образом, применение МДДФ позволило более чем на четыре порядка уменьшить ход частоты рубидиевого модуля относительно эталонного сигнала, сформированного на ГПЭВЧ.

Экспериментальные исследования показали, что наиболее значительную погрешность в процесс синхронизации вносит несовершенство алгоритма управления, определяемого суммой абсолютного отклонения фазовой разницы и тренда за выбранное время усреднения, а также внезапные сдвиги частоты рубидиевого модуля в результате температурных колебаний окружающей среды. Погрешность в результате отличий воспроизведения шкалы времени в приемниках сигналов ГНСС была незначительной (применены однотипные калиброванные приемники с антеннами на расстоянии несколько десятков метров одна от другой). Очевидно, что при увеличении расстояния между аппаратурой потребителя и ГПЭВЧ необходимо применять более совершенные алгоритмы дифференциальной коррекции погрешностей.

Выводы

Реализация дистанционной калибровки (поверки) мер времени и частоты возникает как решение проблем, связанных с перевозкой, временными затратами и дороговизной современных систем калибровки (поверки).

Однако существующие измерительные комплексы, как специализированные (NIST), так и на основе стандартизованных приборов (НИЦ “Институт метрологии”), не позволяют определять весь спектр метрологических параметров прецизионных мер времени и частоты, требования к которым заложены в технической документации в разделах “Поверка”.

Широкое и эффективное внедрение дистанционной калибровки (поверки) мер времени и частоты выдвигает новые требования как к СИТ, так и к методам и средствам обработки результатов измерений.

Теоретические и экспериментальные исследования нового метода двойной дифференциальной коррекции фазы являются существенным вкладом в решение существующей проблемы. Завершение создания калибровочного (поверочного) измерительного комплекса, предоставляющего весь спектр метрологических услуг для мер времени и частоты, планируется в рамках направления “Создание и развитие технической базы Государственной службы единого времени и эталонных

частот” Государственной программы развития эталонной базы Украины на 2011–2015 гг.

Следует заметить, что с решением технических вопросов остаются проблемы признания результатов такой метрологической услуги, ее соответствие требованиям ISO 17025. Должны наблюдаться прослеживаемость к государственному эталону, проводиться контроль и фиксация условий окружающей среды, обеспечиваться проверка функционирования калибруемого СИТ, защита передаваемой измерительной информации и т.д.

Таким образом, дистанционное тестирование и калибровка (поверка) средств измерительной техники являются интересным предложением по расширению метрологических услуг, которое до сих пор не получило должного распространения в силу ряда причин, устранение которых и является основой для дальнейших исследований в обозначенном в статье направлении.

Список литературы

1. Remote characterization of optoelectronic devices over the Internet / R. O'Dowd, D. Maxwell, T. Ferrel, J. Dunne // Proc. of 4th Optical fibre measurement conference. – October 1997. – P. 155–158.
2. Filipiński P. SIMnet – a collaborative tool for metrology in the Americas / P. Filipiński // Proceedings of 16th IEEE instrumentation and measurement technical conference. Vol. 2. – May 1999. – P. 623–625.
3. Lee K. Distributed measurement and control based / K. Lee, R. Schneeman // Ibid. – P. 608–613.
4. Толочко Т.К. Дистанционная калибровка средств измерений / Т.К. Толочко, А.В. Гусинский, А.М. Кострикин // Доклады БГУИР. – 2008. – № 1 (31). – С. 38–43.
5. Stein S.R. New time and frequency services at the National bureau of standards / S.R. Stein, G. Kamas, D.W. Allan // Proc. precise time and time interval meeting. – December 1983. – P. 17–27. (<http://tf.nist.gov/general/pdf/665.pdf>).
6. The global positioning system: Assessing national policies / S. Pace, G. Frost, I. Lachow [et al] // RAND MR-614-OSTP. – 1995. – P. 246.
7. Lombardi M.A. The NIST frequency measurement service / M.A. Lombardi // J. Metrology 2 (3). – May–June 1995. – P. 11–17.
8. Frequency measurement and analysis service (<http://tf.nist.gov/service/pdf/fmaflyer.pdf>).
9. Dudley R. Internet calibration direct to national measurement standards for automatic network analysers / R. Dudley, N. Ridler // Proc. of 18th IEEE instrumentation and measurement technology conference. – Budapest, Hungary. – May 21–23, 2001. – P. 101–105.
10. Стандарт частоты и времени рубидиевый: Создание, исследование и применение / А.С. Клей-

- ман, А.И. Левенберг, В.Н. Романько [и др.] // Український метрологічний журнал. – 1998. – № 3. – С. 16–20; № 4. – С. 16–20.
11. Использование приемника GPS типа Svec Six-CM3 для контроля метрологических характеристик стандарта частоты / А.С. Клейман, В.М. Гиренко, А.И. Левенберг [и др.] // Метрологія та вимірювальна техніка: II Міжнар. наук.-техн. конф. “Метрологія–99”, 5–7 жовтня 1999 р., Харків: наук. праці: в 2 т. Т. 1. – Харків: ХДНДІМ, 1999. – С. 111–115.
 12. Романько В.Н. Применение рубидиевого стандарта частоты и времени в системе координатно-временного обеспечения при использовании GPS-технологий / В.Н. Романько, А.С. Клейман // Космічна наука і технологія. – 2001. – Т. 7, № 4. – С. 101–106.
 13. Региональная система передачи потребителям размера единиц частоты и шкал времени / А.С. Клейман, А.И. Левенберг, В.Н. Романько [и др.] // Радиотехника. – 2001. – Вып 121. – С. 74–76.
 14. Романько В.М. Створення вторинного еталона одиниць часу і частоти на базі синтезованих рубідієвих мір частоти / В.М. Романько, Е.А. Корецький, О.М. Гричанюк // Український метрологічний журнал. – 2011. – № 4. – С. 8–15.
 15. Dudley R.A. Traceability via the Internet for microwave measurements using vector network analyzers / R.A. Dudley, N.M. Ridler // IEEE transactions on instrumentation and measurement. – February 2003. – Vol. 52, No. 1. – P. 130–134.
 16. Internet-enabled calibration Services: Design of a secure calibration system / M. Jurcevic, M. Borsic, R. Malaric, H. Hegedus // Ibid. – September 2008. – Vol. 57, No 9. – P. 2012–2018.
 17. Hegeduš Hrvoje. Internet-enabled calibration: A future of calibration / Hrvoje Hegeduš, Marko Jurčević, Roman Malaric // International journal of measurement technologies and instrumentation engineering. – January–March 2011. – 1 (1). – P. 24–37.
 18. Jurčević M. Generic system for remote testing and calibration of measuring instruments: Security architecture / M. Jurčević, H. Hegeduš, M. Golub // Measurement science review. – 2010. – Vol. 10, No. 2. – P. 50–55.
 19. Advanced mathematical and computational tools in metrology (AMCTM) (<http://www.amctm.org>).
 20. IMEKO Technical Committee TC21: Mathematical tools for measurements (<http://www.imeko-tc21.org>).
 21. Lombardi M. Remote frequency calibrations: The NIST frequency measurement and analysis service / M. Lombardi // NIST special publication 250-29. – 2004. – 90 p.
 22. Calibration and measurement capabilities time and frequency United States, NIST (National institute of standards and technology) (http://kcdb.bipm.org/appendixc/TF/US/TF_US.pdf).
 23. Calibration and measurement capabilities. Time and frequency, Ukraine, NSCIM (National scientific center – Institute of metrology) (http://kcdb.bipm.org/AppendixC/TF/UA/TF_UA.pdf).
 24. Метрологія. Часы удаленные по отношению к UTC(UA) (Разность шкал времени. Дифференциальные сличения с использованием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем). Методика калибровки: МКУ 07-28:2010. – Харьков: ННЦ “Институт метрологии”, 2010. – 20 с.
 25. Метрологія. Часы удаленные по отношению к UTC (Разность шкал времени. Дифференциальные сличения с использованием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем). Методика калибровки: МКУ 07-29:2010. – Харьков: ННЦ “Институт метрологии”, 2010. – 21 с.
 26. Романько В.М. Єдність вимірювань в системі координатно-часового й навігаційного забезпечення України / В.М. Романько, Г.С. Сидоренко, К.П. Волох // Український метрологічний журнал. – 2010. – № 3. – С. 3–18.
 27. Корецький Е.А. Застосування навігаційних приймачів фірми “Novatel” в системі зовнішніх звірень вторинного еталона часу і частоти / Е.А.Корецький, І.В.Кушнарченко, В.М. Романько // Метрологія та вимірювальна техніка: VII Міжнар. наук.-техн. конф. “Метрологія–2010”, 12–14 жовтня 2010 р., Харків: наук. праці: в 2 т. Т. 1. – Харків: ННЦ “Институт метрологии”, 2010. – С. 167–170.
 28. Rubidium frequency standard model FE-5680A series option 2. Operation and maintenance instructions. – Frequency electronics, INC. – 18 p.
 29. Frequency syntonization using GPS carrier phase measurements / Kun-Yuan Tu, Fan-Ren Chang, Chia-Shu Liao, Li-Sheng Wang // Proc. IEEE transactions on instrumentation and measurement. – June 2001. – Vol. 50, No 3. – P. 833–838.
 30. A straightforward frequency-estimation technique for GPS carrier-phase time transfer / C. Hackman, J. Levine, T. Parker [et al.] // IEEE transactions on ultrasonics ferroelectrics and frequency control, UFFC-53. – 2006. – P. 1570–1583.