

Измерение односторонней задержки в IP-сетях

Н. И. ВИНОГРАДОВ, Е. С. САГАТОВ, А. М. СУХОВ

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королёва
Самара, Россия, e-mail: ampelos@mail.ru

Создан аппаратно-программный комплекс NetTestBox, который обеспечивает измерение метрик производительности IP-сетей. Данные метрики предназначены для оценки качества интернет-соединений. Описаны основные аспекты реализации измерений односторонней сетевой задержки в этом комплексе. Обоснован выбор сервера точного времени для NetTestBox. Представлены результаты измерений длительности основных составляющих сетевой задержки.

Ключевые слова: метрики производительности, односторонняя сетевая задержка, сервер точного времени, точность временной синхронизации.

The paper reported about the creation. The hardware-software complex NetTestBox, which measures the number of IP performance metrics. These metrics are destined to assess the quality of Internet connections. The main aspects of one-way network delay measurements realization in that complex are described. The selection of network time protocol server is justified. Measurement results of the main components duration of network delay are presented.

Key words: performance metrics, one-way network delay, NTP-server, timing accuracy.

Телекоммуникации — важная составная часть технологического прогресса, при этом сетевые технологии непрерывно развиваются. Совокупный трафик растёт экспоненциальными темпами, что требует постоянного обновления оборудования и внедрения новых технологий передачи данных.

Для мониторинга состояния сети и определения источников проблем необходим универсальный инструмент для оценки качества передачи данных. В конце 1990-х гг. было создано семейство стандартов IETF (Internet Engineering Task Force), описывающих качество интернет-соединений. Эти стандарты объединены под общим названием IPPM (IP Performance Metrics, метрики производительности IP-сетей) [1]. Основные метрики производительности — задержка пакетов (одно- и двухсторонняя), сетевой джиттер (вариация задержки), потери пакетов и доступная пропускная способность канала [2]. Однако в настоящее время не существует простых и надёжных измерительных инструментов для нахождения односторонней задержки и доступной пропускной способности удалённых сетевых узлов. Потери пакетов и сетевой джиттер являются ключевыми параметрами для мультимедийных приложений, связанных с общением пользователей в сети. К таким приложениям относятся интернет-телефония, видеоконференции и др. [3].

Основная трудность, связанная с измерением доступной пропускной способности сетевого канала, заключается в том, что IP-сети основаны на принципе коммутации пакетов. Различные виды трафика конкурируют между собой в общих каналах связи, и оценить параметры соединений, относящиеся к выделению полосы, достаточно сложно. Односторонняя задержка пакетов (one-way delay, OWD) — одна из ключевых метрик производительности IP-сетей — описана в [4]. Согласно стандарту [5] эта метрика является определяющей для приложений реального времени, интерактивных приложений, а также систем управления с использованием глобальной сети. Также односторонняя задержка используется для выявления асимметричных IP-каналов, когда пути сетевого пакета в прямом и обратном направлениях различаются. В настоящее время появились и активно развиваются

такие приложения, как Интернет вещей [6], медицинские сети, тактильный интернет [7].

Основная трудность при измерениях односторонней задержки заключается в необходимости синхронизации системного времени на удалённых устройствах. Для такой синхронизации применяют системы глобального позиционирования и программное обеспечение серверов точного времени. Ниже приведён обзор измерительных систем односторонней задержки.

Цель настоящей работы — анализ процесса измерений односторонней сетевой задержки аппаратно-программным комплексом NetTestBox [8]. Комплекс был разработан в Самарском национальном исследовательском университете и в 2015 г. начал успешно функционировать. В настоящее время эксплуатируется четыре узла комплекса: три в России (Самара, Тольятти, Ростов-на-Дону) и один в США (Колумбия, штат Миссури).

Обзор существующих методов измерений. Основными проектами по измерению односторонней сетевой задержки являются европейский региональный интернет-регистратор RIPE NCC [9], One-Way ping (OWAMP) [10] и российская разработка NetTestBox [8]. В 2001 г. RIPE NCC создал специальный сервис Test Traffic Measurement (RIPE TTM) для мониторинга односторонней задержки. Этот сервис позволял измерять три метрики производительности IP-сетей из четырёх: одностороннюю сетевую задержку, вариацию задержки (джиттер) и потери пакетов между измерительными узлами в сети Интернет. Экспериментальные данные сохранялись и статистически обрабатывались.

Аппаратно RIPE TTM был реализован следующим образом: у конечного пользователя размещался сервер со специальной платой и внешней GPS-антенной для устойчивого приёма сигналов от спутников. Точность измерений односторонней сетевой задержки обеспечивалась путём прикрепления к пакету точной временной метки. Для этого на выходе GPS-приёмника после нахождения географического местоположения формировался прямоугольный PPS (pulse per second) сигнал с периодом 1 с. Фронт сигнала синхронизирован со временем UTC (Coordinated universal

time) с точностью ± 100 нс. Рассогласованность системного времени двух измерительных узлов составляла ± 500 нс [11]. Указанный сервис не получил широкого распространения из-за высокой стоимости установки и сопровождения. Поэтому в 2014 г. проект был свёрнут.

Программа OWAMP представлена группой разработчиков Internet2 и стандартизована IETF в виде документа [10]. В настоящее время существуют две программные реализации данного протокола: предложенная и развиваемая командой разработчиков Internet2 [10] и проект J-OWAMP, выполненный на языке программирования Java группой специалистов из института Телекоммуникаций университета г. Авейро (Португалия). Проект J-OWAMP является протоколом, обеспечивающим измерение односторонней сетевой задержки с использованием временной синхронизации измерительных узлов с помощью протокола сетевого времени *NTP* (Network Time Protocol).

В 2005 г. разработчики J-OWAMP провели несколько экспериментов для измерений односторонних сетевых задержек между г. Авейро (Португалия) и г. Зальцбург (Австрия). В [12] приведены экспериментальные данные, подтверждающие возможность использования J-OWAMP и OWAMP в единой измерительной инфраструктуре для получения точных данных об односторонней сетевой задержке между узлами.

Программно-аппаратный комплекс NetTestBox. Комплекс NetTestBox представляет собой компактный высокопроизводительный одноплатный компьютер со специализированным клиент-серверным программным обеспечением *owring* и мультисистемным ГЛОНАСС/BeiDou/GPS приёмником, задающим временную метку синхронизации современному *NTP*-серверу *Chrony* [8]. Данный комплекс позволяет измерять четыре основные сетевые метрики производительности, а также накопление статистики и её передачу на удалённый сервер для дальнейшей обработки данных. Аппаратная часть комплекса базируется на одноплатном компьютере ARM-архитектуры Raspberry Pi 2 Model B и навигационном приёмнике UBX-M8030 компании U-blox (Швейцария). Габаритные размеры измерительного узла составляют $90 \times 70 \times 25$ мм. Источником питания для компьютера и подключённых к нему периферийных устройств служит стабилизированный источник постоянного тока 5 В мощностью 15 Вт. На компьютере запускается адаптированная версия операционной системы Linux — Raspbian с полным набором программных средств для поддержки аппаратных устройств данного компьютера. Обмен с сервером хранения и обработки экспериментальных данных происходит через Fast Ethernet подключение к сети Интернет.

Точная синхронизация системного времени обеспечивается *NTP*-сервером *Chrony*, обрабатывающим *PPS*-сигнал от навигационного приёмника, а также данные от нескольких интернет-серверов точного времени. Для проведения измерений сетевых метрик была разработана клиент-серверная программа *owring*. Клиентская часть программы, запускаемая на каждом измерительном узле, отправляет измерительные пакеты к серверной части, принимает ответные пакеты, фиксирует точное время их отправки и приёма, осуществляет первичную обработку полученных данных и передаёт их на единый сервер хранения. Серверная часть программы отвечает на приходящие пакеты с запросами, добавляя в ответный пакет зафиксированное время приёма запроса и отправки ответа.

Природа сетевой задержки. Для анализа сетевой задержки предлагаются различные классификационные схемы. При этом существуют универсальные и признанные всеми исследователями подходы. Один из них состоит в анализе природы сетевой задержки. Он позволяет выделить две составляющие: физическую и телекоммуникационную. Физическая задержка D_{ph} — это время распространения по телекоммуникационному тракту электромагнитной волны, содержащей информацию о цифровом коде. Телекоммуникационная составляющая D_{tel} содержит все задержки, связанные с формированием и обработкой пакетов. Теоретической основой для описания этой составляющей является теория массового обслуживания. С точки зрения математики задержка также разделяется на два компонента. Первый из компонентов есть постоянная величина, определяемая временем минимальной задержки D_{min} , а второй — переменная величина, носящая случайный характер. Физическая составляющая задержки сверху ограничена минимальным временем задержки $D_{ph} \leq D_{min}$ [13].

При анализе данных RIPE TTM было предложено выделить из телекоммуникационной части следующие задержки [8, 10]:

обработки (processing) D_p — время, необходимое для создания пакета с данными, подготовки его к передаче и обработки пакета в точке назначения для извлечения данных;

передачи (transmission) D_t — время передачи пакета от первого до последнего бита в телекоммуникационный канал. Эта величина зависит от ширины канала связи;

очереди (queueing) D_q — время, затрачиваемое пакетом на ожидание и обработку в сетевых устройствах. Данная задержка описывается теорией массового обслуживания.

Метод синхронизации времени. Рассмотрим основные этапы измерений односторонней сетевой задержки и методы отсчёта и синхронизации времени.

В устройстве NetTestBox получение синхронизирующего временного *PPS*-сигнала происходит через процессорное прерывание GPIO (интерфейс ввода—вывода общего назначения). Такое прерывание имеет высокий приоритет, следовательно, остальные выполняемые задачи будут приостановлены ядром операционной системы, и с момента получения прерывания ядро начнёт обработку поступившего *PPS*-сигнала. В устройстве за обработку этого прерывания отвечает модуль ядра операционной системы Linux — *PPS-gpio*. Системное время контролируется ядром операционной системы на основании подсчёта тиков процессора или данных аппаратного таймера. Оборудование NetTestBox имеет встроенный аппаратный таймер, выдающий показания с дискретностью 52 нс.

Для синхронизации и повышения точности отсчёта времени используется *NTP*-сервер, который корректирует системное время операционной системы. При поступлении *PPS*-сигнала *NTP*-сервер сравнивает его данные с системным временем и фиксирует разницу с ближайшим целочисленным значением в секундах. При этом сервер заранее синхронизирует системное время в глобальной сети не менее чем с четырьмя серверами точного времени. Поэтому данные о секундах считаются точными, а коррекции подвергается только дробная часть.

Указанный *NTP*-сервер мгновенно изменяет системное время только при значительном расхождении временных шкал (более 1000 с), в остальных случаях применяется гра-

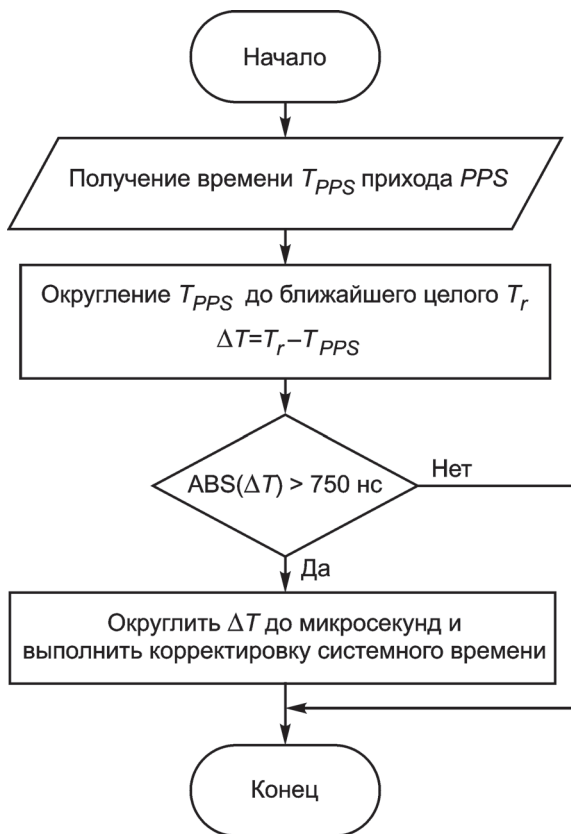


Рис. 1. Блок-схема алгоритма синхронизации:

PPS — сигнал синхронизации времени; T_{PPS} — время получения *PPS*-сигнала; T_r — целочисленное значение времени получения *PPS*-сигнала; $ABS(\Delta T)$ — абсолютная погрешность синхронизации системного времени

дационная синхронизация. В операционной системе Linux для автоматической синхронизации времени предусмотрены специальные функции коррекции. Они ускоряют или замедляют ход системного времени, алгоритм такого метода оперирует микросекундами.

Определим погрешность синхронизации системного времени, применив для сравнения различные методы синхронизации, такие как *ntpd*-сервер, *Chrony*-сервер, собственная утилита *PPS-sync*, однократная синхронизация без последующей коррекции. Во всех этих методах в качестве эталонного источника точного времени используют сигнал *PPS*. Фиксация системного времени в момент поступления *PPS*-сигнала позволяет найти погрешность синхронизации системного времени. Для проверки точности синхронизации времени с помощью *ntpd*- и *Chrony*-серверов была разработана утилита *PPS-sync*, функционирующая по алгоритму, приведенному на рис. 1.

Утилита *PPS-sync* фиксирует время T_{PPS} поступления процессорного прерывания по *PPS*-сигналу с точностью до наносекунд. Системное время T_r округляется до ближайшей целой секунды, что позволяет вычислить поправку $\Delta T = T_r - T_{PPS}$. Если абсолютное значение ΔT больше 750 нс, то ΔT округляется с точностью до микросекунд, а системное время корректируется на это значение. В интервале $-750...750$ нс время не корректируется.

При настройке программного обеспечения установлено, что на оборудовании NetTestBox *ntpd*-сервер не принимает показания модуля *PPS-gpio* в качестве достоверной информации. В испытаниях, проведенных на компьютере, *PPS*-сигнал поступал через интерфейс RS-232, а *ntpd*-сервер показал худшие характеристики точности синхронизации, чем *Chrony*-сервер. Аналогичные результаты подтверждены в [14]. Коррекция с помощью *ntpd*-сервера в данной работе не рассматривается.

Оба способа коррекции успешно справляются со своей задачей, а без коррекции каждые 40 мин время будет увеличиваться примерно на 0,5 мс. Следовательно, для измерений односторонней задержки системное время обязательно нужно корректировать.

Среднее квадратическое отклонение для системного времени у *Chrony*-сервера составляет 0,584 мкс, а у разрабатываемой утилиты 0,852 мкс. Так как при использовании точного времени *Chrony*-сервера получается лучший результат синхронизации времени, то дальнейшие исследования проводятся с его помощью.

Основные этапы метода измерений односторонней сетевой задержки. Опишем основные этапы метода измерений односторонней сетевой задержки в IP-сетях. Схема реализации данного метода представлена на рис. 2. *Chrony*-сервер, используя *PPS*-сигналы, синхронизирует системное время операционной системы Linux на двух узлах NetTestBox, на одном из которых запущено клиентское приложение *owring*, а на втором — серверное приложение *owringd*. Из рис. 2 следует, что определение длительности односторонней задержки складывается из нескольких этапов между измерениями в двух узлах системного времени. Задержка прохождения пакета от клиента к серверу состоит из получения системного времени, процедуры отправки пакета, передачи его по сети и получения на сервере.

Формирование пакета на клиентском узле и подсчет контрольной суммы отправляемого ICMP-пакета происходит в программе *owring* до фиксации системного времени, а значит, не влияет на задержку пакета. На серверной стороне полученный пакет обрабатывается, проверяется его принадлежность программе *owring*, а также другие служебные параметры. Сразу после получения последнего бита программа *owringd* фиксирует время на сервере. Далее формируется ответный пакет, в котором зафиксированное время сохраняется. Этот этап не влияет на измеряемую задержку. На следующем этапе фиксируется время отправки пакета, это значение записывается в пакет. Для отправки ICMP-пакета программа *owringd* подсчитывает итоговую контрольную сумму. Для отправки UDP-пакета контрольную сумму подсчитывает ядро операционной системы Linux. Далее происходит отправка пакета, затем он передается по сети от сервера обратно клиенту.

Клиентский узел ожидает поступления ответного пакета от сервера. Программа *owring* запоминает время поступления последнего бита. При этом копирование пакета из области ядра в область программы *owring*, его обработка, вычисление результатов и их отображение не входят в задержку и никак на неё не влияют. В данном случае следует использовать процедуру ожидания, так как необходимо отслеживать возможную потерю пакета. Если пакет не возвратится в течение секунды (по умолчанию), то он будет считаться потерянным.

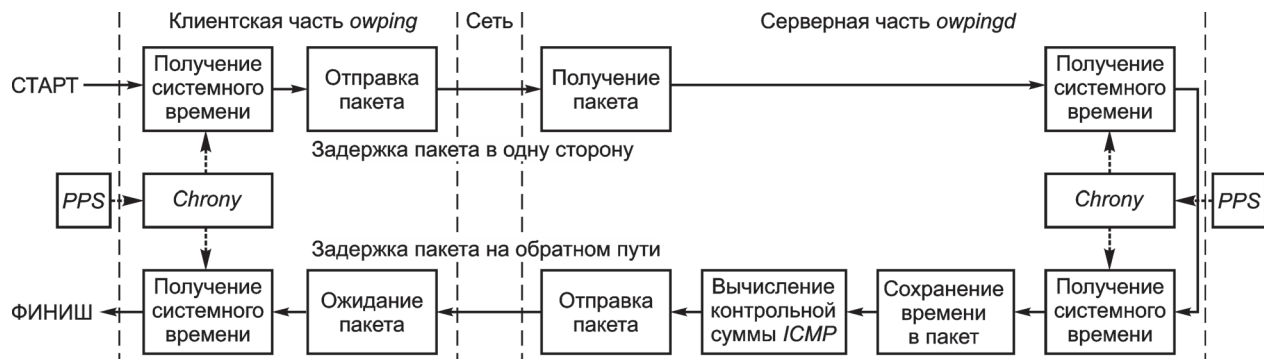


Рис. 2. Схема реализации метода измерения задержек пакетов с помощью NetTestBox:

PPS — сигнал синхронизации времени; Chrony — NTP-сервер; owping — клиентская часть программного обеспечения узла NetTestBox, owpingd — серверная часть программного обеспечения узла NetTestBox; ICMP — пакет протокола межсетевых управляющих сообщений

Одной из основных задач при анализе данных о задержке является выделение различных её составляющих и, прежде всего — физической D_{ph} и телекоммуникационной D_{tel} . Кроме того, телекоммуникационная составляющая достаточно сложно устроена и её анализ не менее интересен для понимания природы задержки. Для сведения к минимуму вклада физической задержки был проведён эксперимент, когда два устройства NetTestBox были размещены в одной локальной сети. Порты Fast Ethernet во время опыта были соединены напрямую с помощью кроссового кабеля без промежуточных сетевых устройств. Результаты измерений представлены в таблице.

Данные о минимальной задержке в локальной сети

Размер пакета, байт	Тип пакета	Минимальная задержка, мкс	
		Клиент—сервер	Сервер—клиент
64	ICMP	175	151
64	UDP	175	151
1518	ICMP	387	365
1518	UDP	390	364

В данном случае физической задержкой можно пренебречь, следовательно, остаются три основные составляющие:

$$D = D_l + D_t + D_p,$$

где D_l — латентность.

Под латентностью понимают задержку перед началом отправки данных, т. е. время, требуемое для установления соединения. Для Fast Ethernet её можно оценить как $D_l = 50...80$ мкс в зависимости от условий проведения тестов и типа оборудования [15].

Задержка передачи идентична времени загрузки пакета на сетевой интерфейс. Для небольшого пакета оно пренебрежимо мало. Эффективная полоса сети Fast Ethernet варьируется от $B_1 = 6 \cdot 10^7$ бит/с для пакетов размером $W_1 = 64$ байта до $B_2 = 9 \cdot 10^7$ бит/с для пакетов максимально допустимого размера $W_2 = 1518$ байт, что составляет $D_t = W_2/B_2 \approx 135$ мкс, где W_2 — размер пакета в битах.

Время $D_p = 100...180$ мкс тратится на обработку сигнала при отправке и приёме пакета. При увеличении расстояния между узлами и появлении промежуточных сетевых устройств

физическая задержка D_{ph} и задержка в очереди D_q становятся существенными.

Следующая особенность результатов измерений, которая нуждается в обсуждении, заключается в том, что задержка на участке клиент—сервер всегда больше, чем в обратном направлении. Это справедливо не только для эксперимента в локальной сети, но и для любой пары измерительных узлов, задействованных в эксперименте.

Процессы передачи пакетов от клиентского приложения к серверному и обратно полностью идентичны за исключением последнего этапа. Процедура получения пакета серверным и клиентским приложениями различается передачей данных из ядра операционной системы в программу owping. Длительность этого процесса составляет 20—25 мкс (см. таблицу). Следовательно, задержка обратного пути пакета должна быть короче на это время.

Заключение. Проведённый эксперимент показал, что сервер точного времени Chrony обеспечивает наибольшую точность 0,6 мкс при условии синхронизации с помощью PPS-сигналов, формируемых приёмником системы глобального позиционирования. Указанная точность достаточна для измерения односторонней сетевой задержки в реальных IP-сетях. Для дальнейшего повышения точности синхронизации времени необходимо использовать высокостабильные источники тактирования и высокочастотные аппаратные таймеры, что влечёт дополнительные финансовые затраты и выходит за рамки данной статьи.

Эксперимент с прямым подключением узлов позволил привести физическую составляющую задержки D_{ph} к нулю и показал, что измеренная односторонняя задержка составит не менее 150 мкс. Это значение определяется ограниченной полной пропускной способностью сетевого канала по технологии Fast Ethernet, латентностью сетевого соединения и процессами обработки пакетов при их отправке и получении измерительными узлами.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания на 2017—2019 гг. (2.974.2017/ПЧ) и гранта РФФИ № 16-07-00218а.

Литература

1. Mahdavi J., Paxson V. IPPM metrics for measuring connectivity, RFC 2678. [Электрон. ресурс]: <http://www.rfc-editor.org/info/rfc2678> (дата обращения: 20.06.2016). DOI 10.17487/RFC2678.

2. Jain M., Dovrolis C. End-to-end available bandwidth: Measurement methodology, dynamics, and relation with TCP throughput // Proc. ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop. 2002. V. 32. No. 4. P. 295—308.

3. Callyam P., Sridharan M., Mandrawa W., Schopis P. Performance measurement and analysis of H. 323 traffic // Proc. 5th Int. Workshop on Passive and Active Network Measurement (PAM 2004). 2004. P. 137—146.

4. Almes G., Kalidindi S., Zekauskas M., Morton A. STD 81, RFC 7679: A one-way delay metric for IPPM. [Электрон. ресурс]: <http://www.rfc-editor.org/info/rfc7679> (дата обращения 20.06.2016). DOI 10.17487/RFC7679.

5. Rec ITU-T Y.1541. Network Performance Objectives for IP-Based Services. Стандарт Международного союза электросвязи (МСЭ). International Telecommunication Union. 2003.

6. Каргин И. С. Анализ беспроводной многошаговой сети со случайным доступом и низким временем доставки пакетов // Информационные технологии и системы-2015: Сб. трудов 39-й междисциплинарной школы-конференции Института проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН. Сочи, 2015. С. 659—670.

7. Кучерявый А. Е., Маколкина М. А., Киричек Р. В. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками // Электросвязь. 2016. № 1. С. 44—46.

8. Виноградов Н. И., Сагатов Е. С. Методика измерения односторонней сетевой задержки пакетов с синхронизацией ГЛОНАСС // Телекоммуникации. 2016. № 4. С. 16—23.

9. Bovy C. J., Mertodimedjo H. T., Hooghiemstra G., Uijterwaal H., Mieghem P. Analysis of end-to-end delay measurements in Internet // Proc. 3rd Int. Workshop on Passive and Active Network Measurement (PAM 2002). 2002. P. 1—8.

10. Shalunov S., Teitelbaum B., Karp A., Boote J., Zekauskas M. RFC 4656: A one-way active measurement protocol (owamp). [Электрон. ресурс]: <http://www.rfc-editor.org/info/rfc4656> (дата обращения 20.06.2016). DOI 10.17487/RFC4656.

11. Donnelly S., Graham I., Wilhelm R. Passive calibration of an active measurement system // Proc. 2nd Int. Workshop on Passive and Active Network Measurement (PAM 2001). P. 1—8.

12. Veiga H., Valadas R., Salvador P., Nogueira A., Pfeifferberger T., Strohmeier F. OWAMP Performance and Interoperability Tests // 4th Int. Workshop on Internet Performance, Simulation, Monitoring and Measurement (IPS-MoMe 2006), Salzburg, Austria, 2006.

13. Carbone L., Coccetti F., Dini P., Percacci R., Vespignani A. The spectrum of internet performance // Proc. 4th Int. Workshop on Passive and Active Network Measurement (PAM 2003). P. 75—88.

14. Mora F. Bring an atomic clock to your home with chrony // Linux Journal. 2002. No. 101. P. 3.

15. Кузьмин Д. А. Кластерный подход для высокопроизводительных вычислений // Компьютерное моделирование и новые технологии. 2003. № 7. С. 7—15.

Дата принятия: 23.06.2016.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.396(024)

Оптико-электронная система измерений координат объектов с адаптацией параметров разложения

А. А. УМБИТАЛИЕВ, В. В. ПЯТКОВ, А. К. ЦЫЦУЛИН, Г. В. ЛЕВКО, А. В. МОРОЗОВ

Научно-исследовательский институт телевидения,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: niit@niittv

Рассмотрена задача параметрической оптимизации оптико-электронной системы измерений координат объектов при вариациях чёткости и кадровой частоты и ограничении скорости считывания сигнала фотоприёмной матрицы. Показано, что оптимальные значения чёткости и кадровой частоты определяются методом выравнивания оценок дисперсий межэлементных и межкадровых разностей. Установлено, что для увеличения времени наблюдения с близкими значениями оценок указанных дисперсий пороги переключения можно снизить путём введения инерционности в тракт измерения дисперсий.

Ключевые слова: измерение координат, оценивание статистик видеосигнала, адаптация параметров разложения.

The parametric optimization of OES of coordinates measurement with variations of definition and frame rate by limiting the reading speed of the signal from the photosensor problem is considered. It is shown that the optimal values of clarity and frame rate are determined by the alignment of the inter-element and inter-frame difference variances estimates; switching thresholds can be decreased by introducing the delay into the mechanism of measuring these dispersions to increase the observation time with close values of the estimates of these variances.

Key words: coordinates measurement, video signal statistics evaluation, decomposition parameters adaptation.

Более полувека космические аппараты (КА) стыкуются на орбите с использованием радиотехнических и оптико-электронных измерительных систем (ИС), предназначенных

для нахождения изменяющихся во времени пространственных координат кооперируемых КА. Различным аспектам этих ИС (подробностям триангуляционного метода измерения