



УДК 621.396

В. Д. Шаргородский

ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», г. Москва, Россия

В. Е. Косенко

*ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнева»,
г. Железнодорожный, Московская область, Россия*

М. А. Садовников, А. А. Чубыкин

*ОАО «Научно-производственная корпорация
«Системы прецизионного приборостроения», г. Москва, Россия*

В. И. Мокляк

*ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнева»,
г. Железнодорожный, Московская область, Россия*

РОЛЬ ЛАЗЕРНЫХ СРЕДСТВ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

«Лазерный ГЛОНАСС» – это совокупность методов и технических средств, на основе использования которых, погрешность космического сегмента ГЛОНАСС уменьшена. Создание и полномасштабное развёртывание бортовых и наземных систем лазерного ГЛОНАСС могут рассматриваться как эффективный асимметричный ответ конкурирующим системам (GPS, Galileo и др.) в части обеспечения точности космического сегмента.

Создание опытных и серийных образцов бортовой и наземной лазерной аппаратуры предусмотрено ФЦП «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы».

Вопрос создания лазерного ГЛОНАСС и, следовательно, достижения мирового лидерства в части потенциальной точности эфемеридно-временного обеспечения – реальная перспектива ближайшего времени.

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО), эфемеридно-временное обеспечение (ЭВО), глобальная навигационная спутниковая система США (GPS), эквивалентная погрешность дальности за счёт космического сегмента (UERE), погрешность за счёт космического сегмента, лазерные измерения.

V. D. Shargorodsky

*JSC «Research and Precision Corporation «Precision Systems and Instruments»,
Moscow, Russia*

V. E. Kosenko

*JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,
Zheleznogorsk, Russia*

M. A. Sadovnikov, A. A. Chubikin

*JSC «Research and Precision Corporation «Precision Systems and Instruments»,
Moscow, Russia*

V. I. Moklyak

*JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,
Zheleznogorsk, Russia*

THE ROLE OF LASER TOOLS TO ENSURE THE ACCURACY OF GLONASS

«Laser GLONASS» is a complex of techniques and technical means, on the basis of which the GLONASS signal-in-space error will be radically reduced. Creation and full deployment of onboard and ground laser GLONASS systems may be recognized as an effective and asymmetrical response to the competing systems (GPS, Galileo, etc.) concerning provision of the space segment precision.

Development of prototypes and production samples of onboard and ground laser equipment is foreseen by the «Maintenance, development and use of the GLONASS system for 2012–2020» Federal Program.

The problem of laser GLONASS development and therefore achievement of the worldwide leadership in the field of potential ephemeris-timing provision is the real prospective of the nearest time.

Key words: Global Navigation Satellite System (GNSS), Positioning, Navigation and Timing (PNT), Global Positioning System (GPS), User Equivalent Range Error (UERE), laser ranging, Signal-in-space error, Intersatellite Laser Navigation Link System.

Для достижения высоких точностных характеристик глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, предусмотренных основными показателями федеральной целевой программы (ФЦП) «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» на период до 2020 года и соответствующими техническими заданиями, предполагается создание лазерных средств, реализующих прорывные информационно-измерительные технологии.

Ключевой проблемой, которая должна быть решена при выполнении федеральной целевой программы ГЛОНАСС в 2012–2020 годах, является обеспечение конкурентоспособной точности навигации потребителей. Наибольший вклад в баланс погрешностей определения местоположения потребителя вносит погрешность космического сегмента, то есть орбитальной группировки навигационных космических аппаратов и наземного комплекса управления. Совокупность методов и технических средств, на основе использования которых указанная погрешность будет радикально уменьшена, получила определение «Лазерной группировки ГЛОНАСС».

Создание и полномасштабное развертывание бортовых и наземных лазерных средств ГЛОНАСС могут рассматриваться как эффективный асимметричный ответ конкурирующим системам (GPS, Galileo и др.).

На базе средств лазерного ГЛОНАСС возможно не только обеспечение паритета

ГЛОНАСС в части точности космического сегмента, но и достижение мирового лидерства по точности спутниковой навигации потребителей.

К показателям, которые могут быть достигнуты, на требуемом ФЦП уровне при обязательном использовании лазерных средств относится, в частности, доведение погрешности определения местоположения в реальном времени в Государственной геоцентрической системе координат (ГГСК) за счет космического сегмента (потенциальная координатная погрешность ГЛОНАСС) до следующих показателей:

- a) без использования дополнительных систем – до 0,6 м (базовое значение погрешности – 2,8 м);
- b) с использованием дополнительных систем в оперативном режиме – до 0,1 м (базовое значение – 1,0 м), а в апостериорном режиме – до 0,03 м (базовое значение – 0,1 м).

Кроме того, ФЦП предполагает уменьшение времени предупреждения потребителей о нарушении целостности навигационного обеспечения (базовое значение – 10,0 с) и снижение погрешности определения времени потребителя в системной шкале времени за счет космического сегмента (потенциальная временная погрешность ГЛОНАСС) до 1,0 нс (базовое значение – 5,0 нс) [1].

ФЦП также ориентирует на получение измерительных данных для достижения требуемой точности определения параметров вращения Земли; уменьшение погрешности привязки государственной геоцентрической системы координат к центру масс Земли – до 0,01 м (базо-

вое значение – 0,5 м); снижение погрешности Государственной геоцентрической системы координат, реализуемой системой ГЛОНАСС, – до 0,02 м (базовое значение – 0,2 м).

Качество решения этих задач однозначно определяет потенциальную точность и надёжность решения потребителем навигационных задач.

С целью уменьшения координатной и временной погрешностей определения местоположения потребителя за счёт космического сегмента до сантиметровых и субнаносекундных уровней ОАО «НПК «СПП» разработаны новые лазерные и информационные технологии.

Это, в частности :

- технология проведения нового типа измерений – однопутевых (односторонних) дальностей с информационным обменом в оптическом диапазоне для решения задач оперативного эфемеридно-временного обеспечения;
- технология геодезического обеспечения ГЛОНАСС на основе использования сети станций лазерной дальнометрии эталонных спутников совместно с системами радиоинтерферометров со сверхдлинными базами и беззапросными измерительными системами с целью получения данных колокации для уточнения фундаментальных геодезических параметров, в том числе координат пунктов, а также высокоточного прогнозирования параметров вращения Земли;
- технология прецизионной обработки разнотипных измерительных данных для высокоточного (сантиметрового) уровня определения эфемерид и временных поправок космических аппаратов системы ГЛОНАСС.

Задача обеспечения точности эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС является чрезвычайно сложной, имеющей специфические особенности, присущие только системе ГЛОНАСС: частотное разделение сигналов, обеспечение управления и эфемеридно-временного обеспечения с территории РФ и др.

По сравнению с ГЛОНАСС, система GPS (США) имеет ряд очевидных преимуществ в части ЭВО. GPS располагает глобальной сетью станций наземной информационной поддержки, равномерно размещённых вдоль экватора, что даёт возможность выполнения на

одном витке неоднократной коррекции бортовой шкалы времени (БШВ) КА. Для российской системы такие станции расположены только на территории Российской Федерации. В результате на витке возможна только одна коррекция временной информации.

В основе принципа лазерных измерений лежит измерение времени распространения коротких лазерных импульсов в одно- и двухпутевой локации.

При двухпутевой локации лазерный импульс излучается наземным дальномером, достигает спутника и, отразившись от панели ретрорефлекторов, возвращается к дальномеру. Моменты излучения и приёма лазерного импульса регистрируются в одной шкале времени. Расстояние вычисляется на основе умножения полуинтервала времени распространения на скорость света.

Односторонняя (однопутевая) дальность (псевдодальность) определяется на основе регистрации момента излучения лазерного импульса в шкале времени передающего лазерного терминала. При этом момент приёма лазерного импульса регистрируется в шкале времени приёмного терминала.

Состав парка технических средств лазерного ГЛОНАСС приведен на рис. 1.

В его состав входят следующие элементы.

1) *Межспутниковая лазерная навигационно-связная система (МЛНСС), предназначенная для решения следующих задач [2, 3]:*

- проведение высокоточных межспутниковых беззапросных измерений для оперативного эфемеридно-временного обеспечения, в первую очередь для многократного на каждом витке определения расхождения бортовых шкал времени КА с субнаносекундной точностью и последующей оперативной коррекции БШВ КА;
- обеспечение глобальности управления КА ГЛОНАСС при размещении только на территории России средств наземного комплекса для взаимной синхронизации бортовых шкал времени КА.

Экспериментальный образец МЛНСС, установленный на КА «Глонасс-М», приведен на рис. 2.

Функции МЛНСС реализуются на основе встречного измерения псевдодальностей между парами НКА и обмена результатами этих измерений [2].

Встречные измерения дальности (и, соответственно, сдвигов бортовых шкал време-

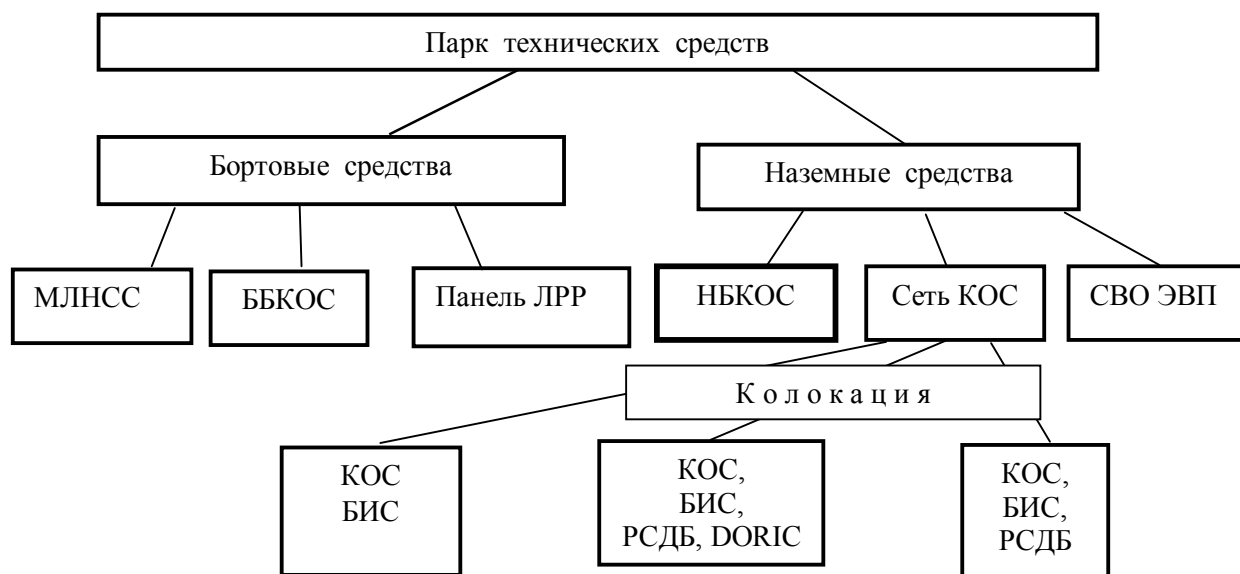


Рис. 1. Состав парка технических средств лазерного ГЛОНАСС

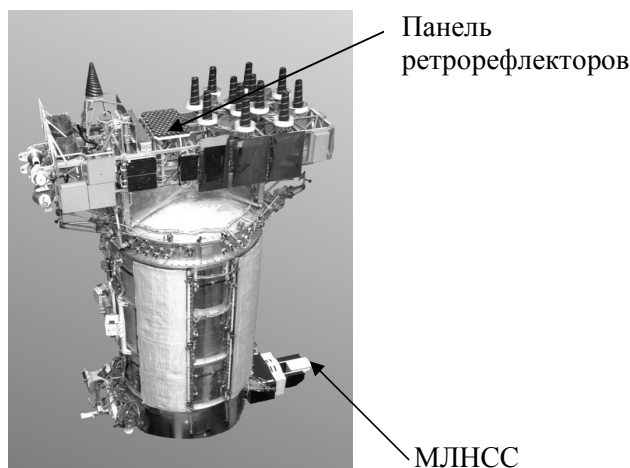


Рис. 2. МЛНСС и панели ретрорефлекторов на КА «Глонасс-М»

ни) между любыми парами космических аппаратов могут осуществляться практически с любой заранее заданной частотой. В масштабе всей орбитальной группировки, даже с учётом прерываний связи на взаимные перенацеливания аппаратуры МЛНСС, может выполняться максимальное число сеансов для определений сдвигов бортовых шкал (например, сеансы выполняются непрерывно с дискретностью 60 мин). Таким образом, при обновлении оперативной информации в навигационном кадре через 30 мин в каждом втором навигационном кадре частотно-временная информация будет корректироваться по результатам последнего проведенного сеанса лазерных межспутниковых измерений.

Для взаимной синхронизации бортовых шкал времени КА по результатам сеансов

межспутниковых лазерных измерений формируется разностная навигационная функция, свободная от погрешностей эфемерид КА. Это обеспечивает определение взаимных расхождений бортовых шкал времени КА с наносекундной и субнаносекундной точностями.

Решение задачи определения эфемерид КА ГЛОНАСС основано на использовании дальномерной навигационной функции взаимных межспутниковых расстояний, которая не зависит от неопределённости уходов бортовых шкал времени КА.

Для передачи информации используется относительная время-импульсная модуляция, при которой информация передаётся путём изменения временных интервалов между соседними импульсами. Каждым импульсом может передаваться от 20 до 25 бит информации.

Установка межспутниковой лазерной навигационно-связной системы на всех КА ГЛОНАСС обеспечит достижение требуемого в ФЦП значения (не более 1,4 м к 2015 году и не более 0,6 м к 2020 году) погрешности определения местоположения в реальном времени за счёт космического сегмента.

Результаты полного развёртывания межспутниковой лазерной навигационно-связной системы и лазерных наземных измерительно-связных пунктов в составе глобальной спутниковой навигационной системы приводятся в табл. 1.

Эти задачи решаются на основе высокоточных встречных измерений псевдодальностей между взаимонаведёнными и находящимися в режиме автосопровождения по угло-

Таблица 1

**Сравнительные характеристики космических навигационных систем GPS,
Галилео и лазерного ГЛОНАСС**

Характеристика	CPS (31КА)	Галилео (проект)	24 КА; модернизи- рованный НКУ	ГЛОНАСС (по ТТТ-2015 г.)	ГЛОНАСС (лазерный; 24 МЛНСС; 6ЛНИСП)
UERE – эквивалентная погрешность псевдо-дальности за счёт космического сегмента	1,1 м (2 о)	0,6 м (о)	от 3 до 4 м (2о)	0,7 м (2 о)	0,1 м, не более (2 о)
Область покрытия комплекса управления	глобально	глобально	территория России	территория России и государств с действующими БИС	глобально (при наземной поддержке только с территории России)
Скорость передачи информации	–		до 0,5 кбит/с	до 0,5 кбит/с	до 50 кбит/с
Внутрисистем- ный контроль целостности навигационного поля	нет	нет	нет	нет	есть (в части ЧВО)



Рис. 3. Схема синхронизации БШВ-ШВ и передачи времени на удаленный наземный пункт с помощью беззапросной квантово-оптической системы

вым координатам бортовыми лазерными терминалами КА «Глонасс».

2) *Беззапросная квантово-оптическая система (БКОС), схема которой приведена на рис. 3.*

БКОС предназначена для решения ряда задач на линии «наземный лазерный пункт – КА «Глонасс» [4; 5]:

- тарировка бортовой и калибровка наземной беззапросной радиотехнической аппаратуры в процессе лётной эксплуатации;
- синхронизация пространственно удалённых наземных эталонов времени на уровне, принципиально недостижимом радиотехническими системами и стандартами частоты.

В беззапросной квантово-оптической системе реализуется способ определения расхождения бортовой и наземной шкал времени, основанный на сравнении одно- и двухпутевых дальностей, измеряемых с субсантиметровой точностью [4].

В состав лазерной системы контроля входят [5]:

- спутниковые лазерные дальномеры (КОС), расположенные вблизи центральных синхронизаторов КНС ГЛОНАСС;
- наземные модули (НБКОС), предназначенные для высокоточных измерений времени излучения лазерных импульсов КОС в шкале времени ЦС;
- бортовой модуль квантово-оптической системы (ББКОС), предназначенный для измерения времени прихода лазерных импульсов на борт космического аппарата ГЛОНАСС в шкале времени бортового синхронизирующего устройства.

Для экспериментальной отработки лазерной системы контроля привлекаются квантово-оптические станции, входящие в состав российской сети лазерной дальнометрии. Две из привлекаемых квантово-оптических станций расположены на пунктах с центральными синхронизаторами ГЛОНАСС [5].

Экспериментальный ББКОС размещается на боковой софитной панели КА «Глонасс-М», имеет массу (с арматурой крепления) около 6,5 кг и энергопотребление около 35 Вт (с учётом системы термостатирования). Основными составными частями бортового модуля являются мозаичное фотоприёмное устройство и таймер, измеряющий время прихода лазерных импульсов, детектируемых фотоприёмником,

в шкале времени бортового синхронизирующего устройства.

Мозаичное фотоприёмное устройство имеет семь каналов с отдельными приёмными объективами с полем зрения около 9° и диаметром около 8 мм каждый и установленными в их фокальной плоскости лавинными фотодиодами. Пороговые дискриминаторы каналов объединены по схеме «или», поэтому в целом каналы функционируют как единое фотоприёмное устройство.

Мозаичная схема была выбрана для полного перекрытия видимого диска Земли и уменьшения влияния фона солнечного излучения, рассеянного подстилающей поверхностью. Рабочая длина волны фотоприёмника равна 0,532 мкм, уровень фона ограничивается интерференционным фильтром с полосой пропускания около 3 нм. Рабочий диапазон освещённостей фотоприёмника, в котором обеспечивается измерение времён прихода лазерных импульсов с заданной точностью, составляет 0,02–2 фДж/мм². Бортовое запоминающее устройство обеспечивает объём измерений до 2 миллионов импульсов в сеансе наблюдения и позволяет получать ограниченные по объёму выборки из массива измерений для повышения оперативности их доставки с борта КА средствами НКУ.

Случайная погрешность однократных измерений времени прихода импульсов на борт космического аппарата определяется длительностью лазерного импульса, шумами фотоприёмника, таймера и оценивается значением не более 130 пс. Для устранения переменных задержек, связанных с зависимостью измеренных времён прихода от амплитуды импульсов, фотоприёмные каналы снабжены устройствами измерения амплитуды, причём данные амплитудных измерений передаются в центр обработки данных в составе общего массива измерительных данных.

3) *Сеть квантово-оптических систем (рис. 4), в состав каждой из которых входит лазерный дальномер, работающий по лазерным ретрорефлекторам (ЛРР), установленным на космических аппаратах, предназначенная для решения совместно с международной сетью лазерных станций следующих задач [6]:*

- тарировка бортовых и калибровка радиотехнических средств запросных измерительных систем траекторных измерений в процессе эксплуатации в части выявления



Рис. 4. Наземная сеть квантово-оптических систем

- ния систематических и медленно меняющихся погрешностей измерений с субсантиметровой точностью;
- обеспечение высокоточной координатной основы системы ГЛОНАСС, в том числе при вводе новых средств измерений для обеспечения требуемой погрешности распространения ГТСК системой ГЛОНАСС;
 - оценка погрешности передачи навигационным полем ГЛОНАСС государственной геоцентрической системы координат путём сравнения координат, получаемых по лазерным измерениям на распределённых временных интервалах, с их оценками, получаемыми с использованием данных навигационных кадров. Эффективность решения этой задачи особенно велика при использовании результатов обработки данных пунктов колокации радиоинтерферо-

метров со сверхдлинными базами, квантово-оптических систем и беззапросных измерительных систем (БИС).

В заключение статьи можно сделать вывод, что вопрос создания лазерного ГЛОНАСС и, следовательно, достижения мирового лидерства в части потенциальной точности эфемеридно-временного обеспечения – реальная перспектива ближайшего времени.

Библиографические ссылки

1. Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012 – 2020 гг.».
2. Чубыкин А. А., Рой Ю. А., Корнишев О. М., Падун П. П. Использование бортовых лазерных измерительно-связных средств для повышения точности и оперативности ЭВО спутников системы ГЛОНАСС // ЭВ & ЭС. Т. 12. 2007. С. 25–30.
3. Шаргородский В. Д., Чубыкин А. А., Сумерин В. В. Межспутниковая лазерная навигационно-связная система // Аэрокосмический курьер. 2007. № 1 (49). С. 88–89.
4. Чубыкин А. А., Воробьёв В. И., Ефимкин В. И. и др. Лазерная синхронизация времени // НТ – сборник РКТ. Вып. 3, сер. VI. 1982. С. 28–33.
5. Садовников М. А., Сумерин В. В. Беззапросные квантово-оптические системы контроля и передачи шкал времени ГЛОНАСС // Вестник ГЛОНАСС. № 3 (7). 2012. С. 39–42.
6. Рой Ю. А., Садовников М. А., Шаргородский В. Д. Сеть лазерной дальнометрии – основа улучшения геодезического и эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС // Вестник ГЛОНАСС, спецвыпуск, сентябрь 2012. С. 50–54.

Статья поступила в редакцию
29.05.2013 г.