

Метод определения разности шкал времени бортовых часов ИСЗ и станции лазерной локации

© И. Ю. Игнатенко¹, В. Н. Тряпицын², Ю. В. Игнатенко²

¹ ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская область, Россия

² ФГБУН «КраО РАН», п. Научный, Россия

В работе предлагается метод сравнения временных шкал станции лазерной локации и искусственного спутника Земли (ИСЗ), основанный на модификации метода T2L2 [1]. Приводится система уравнений, связывающая моменты излучения, отражения и приема лазерного импульса со значением разности шкал времени станции лазерной локации и ИСЗ. Указывается способ решения полученной за время сеанса измерений системы уравнений. В методе учитываются инструментальные погрешности, а также электронные, геометрические и оптические временные задержки, возникающие при проведении лазерной локации ИСЗ.

Ключевые слова: лазерная локация ИСЗ, всемирное время, шкалы времени, сверка часов, отражающие поверхности, система ГЛОНАСС, отклонения при лазерной локации ИСЗ.

Введение

Современные навигационные спутниковые системы (ГЛОНАСС, GPS) позволяют сличать временные шкалы удаленных на большое расстояние часов с точностью порядка 10^{-10} – 10^{-9} секунды. Этого достаточно для многих приложений, но некоторые научные задачи требуют более высокой точности сличения временных шкал. Использование метода лазерной локации ИСЗ дает возможность измерять разность шкал времени на спутнике и на Земле с точностью вплоть до 10^{-11} – 10^{-12} секунды.

В работе [1] изложен способ высокоточного сличения часов между двумя разнесенными лазерно-локационными станциями в ходе эксперимента LASSO (LAsER Synchronization from Stationary Orbit). В 1988 году был запущен геостационарный спутник Meteosat P2, имевший на борту средства передачи сигналов времени оптическими методами. Далее методика получила развитие в программе Time Transfer by Laser Link, проводящейся на французской обсерватории OCA (Observatoire de la Côte d'Azur, Grasse) при участии Национального космического агентства Франции (CNES) и Европейского космического агентства (ESA). С середины 2008 года для сличения шкал с использова-

нием метода лазерной локации применяется альтиметрический спутник Jason 2 [2]. В китайской навигационной системе BeiDou предполагается использование светолокационных средств для синхронизации и контроля шкал времени бортовых часов навигационных спутников. Полученные в проекте LTT (Laser Time Transfer) с использованием китайских навигационных спутников результаты подтверждают высокую эффективность метода и сравнимы с результатами, полученными в программе T2L2 [3]. Подобные работы ведутся и с использованием российской навигационной системы ГЛОНАСС.

В статье рассматривается модификация метода T2L2 [4], в которой, в отличие от других реализаций метода, исключаются временные задержки на передачу сигнала, как внутри измерительной системы на Земле, так и на борту ИСЗ.

Решение задачи

Предполагается, что ИСЗ оснащён уголковыми отражателями и устройством регистрации падающего лазерного импульса (ЛИ). Имеются две одинаково масштабированные интегральные шкалы времени: τ — на борту ИСЗ и t — на станции лазерной локации. Ставится задача найти разность временных шкал Δt :

$$\tau = t + \Delta t \quad (1)$$

При использовании высокоточных часов [5] фиксируются момент излучения ЛИ на станции лазерной локации, момент регистрации бортовыми средствами ИСЗ попадания ЛИ на датчик и момент прихода сигнала, отраженного от ИСЗ, в измерительную часть станции лазерной локации [6]. Все моменты времени отсчитываются от начала суток календарной даты наблюдений в секундах.

Как известно, опорной точкой при измерениях на лазерно-локационной системе обычно является точка А — точка пересечения осей телескопа. Для этой точки определяются координаты станции лазерной локации.

Во время сеанса лазерной локации производится N посылок ЛИ. Фиксируется M попаданий ЛИ на датчик фотоприемника ИСЗ и производится K циклов измерений временного интервала. Пусть в момент времени t_{0i} ЛИ излучается в сторону ИСЗ и проходит расстояние L_i между локатором и ИСЗ. Затем ЛИ попадает на отражающую поверхность, отражается и через интервал времени l_1 попадает на датчик фоторегистратора. Момент попадания ЛИ на датчик фоторегистратора τ_{1i} фиксируется по бортовым часам ИСЗ через интервал времени l_2 . Отраженный ЛИ проходит расстояние $L_i + \Delta L_i$ и принимается фотоприемником на локаторе в момент времени t_{2i} . Тогда τ_{1i} и t_{2i} могут быть вычислены следующим образом:

$$\tau_{1i} = t_{0i} + \Delta t + L_i/c + l_1 + l_2 \quad (2)$$

$$t_{2i} = 2T_i + t_{0i}, \quad (3)$$

где c — скорость света, $2T_i = t_{2i} - t_{0i}$ — измеряемый в лазерной локации интервал времени между посылкой и приемом ЛИ. С другой стороны:

$$2T_i = L_i/c + (L_i + \Delta L_i)/c = (2L_i + \Delta L_i)/c \quad (4)$$

$$T_{1i} = \tau_{1i} - t_{0i} = L_i/c + \Delta t + l_1 + l_2 \quad (5)$$

$$T_{2i} = \tau_{2i} - t_{1i} = 2T_i - L_i/c - \Delta t - l_1 - l_2 \quad (6)$$

Введем $\delta t = \Delta t + l_1 + l_2$ и вычтем (5) из (6):

$$T_{2i} - T_{1i} = 2(T_i - L_i/c - \delta t) \quad (7)$$

Выразим L_i в (4) через T_i и подставим в выражение (7). Учитывая, что $T_{2i} - T_{1i} = t_{0i} + t_{2i} - 2\tau_{1i}$, получим:

$$2\tau_{1i} - t_{2i} - t_{0i} = 2\delta t - \Delta L_i/c \quad (8)$$

Равенство (8) является уравнением с одним неизвестным δt для каждого измерения. В уравнении (8) из двух меток шкалы времени τ вычитаются две метки шкалы времени t . Полученное значение позволяет найти разность шкал времени τ и t . Момент τ_{1i} является измеряемой величиной, моменты t_{0i} и t_{2i} не измеряются ни в одной существующей лазерно-локационной измерительной системе. Для определения этих моментов времени нужно вычислить интервал времени от начала измерения до пересечения уходящим пучком ЛИ точки А и интервал от пересечения приходящим пучком ЛИ точки А через фотоприемник до регистрирующего устройства. Эта задача решается измерением всех расстояний, которые ЛИ проходит через набор оптических элементов и измерением или оценкой электронных задержек в процессе измерения.

Величина ΔL_i обусловлена вращением Земли и может быть вычислена. В реальных наблюдениях в уравнения (2), (4), (5), (6) добавляются релятивистская и рефракционная поправки, а также поправка за расстояние между отражающей поверхностью и центром масс ИСЗ. За время одного цикла измерения значения этих поправок не изменяются более чем на 1 пс, а их разность в (8) не учитывается при нахождении величины δt .

За время проведения сеанса светолокационных наблюдений ИСЗ (длительность сеанса около 2-х минут для низких ИСЗ и 0.5—3 часа для высоких ИСЗ) разность шкал Δt может измениться. Для описания временных вариаций Δt может быть использована полиномиальная регрессия или фильтр Калмана.

Выбор ретрорефлектора

При решении задачи синхронизации шкал времени методом, предложенным выше, определяющими являются следующие факторы: временная привязка событий в измерительной системе, точность измерителя временных интервалов или временного счетчика, длительность ЛИ и устойчивость работы лазера. Для оценки геометрических отклонений в сеансе лазерной локации были исследованы варианты взаимного расположения станции лазерной

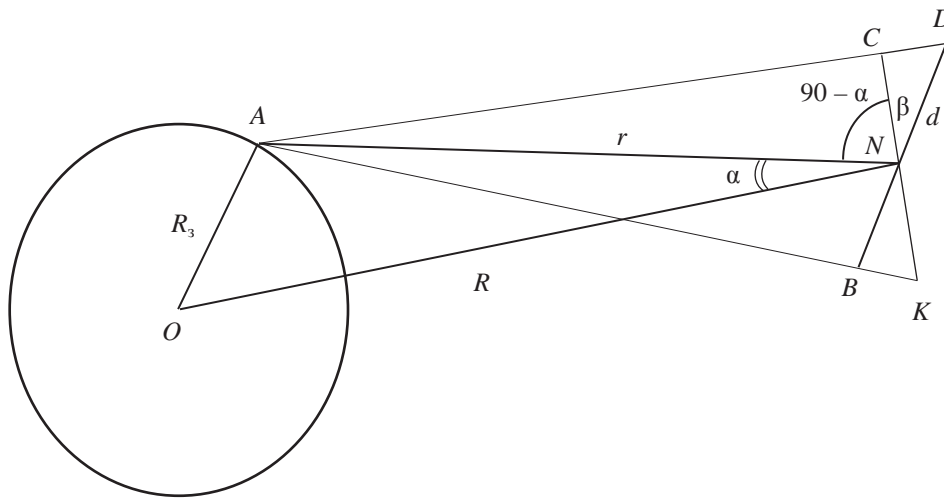


Рис. 1. Падение ЛИ на отражающую панель, расположенную под углом β к перпендикуляру к радиусу-вектору, направленному из центра Земли

локации, ИСЗ и видов отражающей поверхности. Были рассчитаны геометрические отклонения от выпуклой сферической, вогнутой сферической и плоской отражающих поверхностей. Рассмотрим один из вариантов на рис. 1.

Отражающая панель на спутнике с максимальным расстоянием d от центра панели ориентирована так, что она расположена под углом β по часовой стрелке к перпендикуляру к направлению ON .

Введем следующие геометрические определения точек, линий и отрезков: точка A — центр пересечения осей телескопа; точка O — центр масс Земли; точка N — центр отражающей поверхности на ИСЗ; точки B, D — крайние точки отражающей поверхности; точки K и C используются в дополнительных построениях; отрезки NB и ND — максимальное отклонение d от центра отражающей поверхности; угол ANO — угол α между направлением «локатор — центр отражающей поверхности» и направлением «центр масс Земли — центр отражающей поверхности»; отрезок AN — расстояние r между локатором и центром отражающей поверхности; отрезок ON — расстояние R между центром Земли и центром отражающей поверхности; отрезок OA — расстояние R_3 между центром Земли и локатором.

Для расчета возможных геометрических отклонений в сеансе лазерной локации (максимальное отклонение равно $AB - AD$) были проделаны вычисления, в которых рассматривались следующие значения параметров: $d = 15$ см, 30 см, 40 см, 55 см, 150 см; $R = 8000$ км, 12227 км, 25600 км, 42270 км, 384400 км; высота над горизонтом: 30° , $60^\circ 45'$, 85° ; угол отклонения оси ИСЗ от направления на центр Земли $\beta = -2^\circ$, -1° , $-30'$, $-15'$, $-6'$, $6'$, $15'$, $30'$, 1° , 2° .

По результатам расчетов для плоской отражающей панели было получено геометрическое отклонение примерно равное $2d \sin(\alpha - \beta)$.

Таким образом, для плоской панели лучшей будет схема с отражателем и фотоэлементом, которые расположены на поверхности, перпендикулярной к направлению «центр масс Земли — центр масс ИСЗ». Измерения следует проводить вблизи кульминации ИСЗ при высоте над горизонтом от 60 до 85 градусов. Для сферической выпуклой поверхности отклонение будет принимать значения от половины до одного радиуса поверхности. Для сферической вогнутой поверхности подбором d в пределах до 0.4 м, а также оптимальных R и H , геометрическое отклонение можно уменьшить до 1 пс.

Заключение

Предложенная модификация метода T2L2 позволит определять разности шкал времени станции лазерной локации и ИСЗ с точностью до 100–300 пс для существующих ИСЗ и до 10–30 пс для перспективных ИСЗ.

Для проведения высокоточных экспериментов по определению разности шкал времени на Земле и на ИСЗ должны быть запланированы предполетные испытания, во время которых нужно измерить аппаратурные электронные задержки и все расстояния, которые ЛИ проходит через набор оптических элементов спутника.

Для задачи сличения шкал времени станции лазерной локации и ИСЗ плохо подходят спутники с выпуклой сферической отражающей поверхностью или с плоскими панелями больших размеров. Более перспективны спутники с вогнутой сферической отражающей поверхностью, аналогичные сферическому лазерному наноспутнику «Блиц». Подобный отражатель, ориентированный на станцию лазерной локации, почти идеален для решения задачи сличения шкал времени светолокационной станции и ИСЗ.

Литература

1. *Vellet Ch. Lasso the European Phase.* Aug. 88–Sept. 89 // Seventh International workshop on Laser Ranging Instrumentation. — Matera 10. 1989. — P. 27–32.
2. *Samain E., Guillemot Ph. and others.* Time Transfer by Laser Link — T2L2: First data / P. Exertier, D. Albanese, P. Berio, O. Laurain, F. Para, J. Paris, J.-M. Torre, H. Viot, P. Vrancken, I. Petitbon, S. Leon // Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging. — October 2008, Poznań, Poland. — Vol. 1. — P. 682–689.
3. *Fumin Y., Peicheng H. and others.* Preliminary Results of the Laser Time Transfer (LTT) Project / Zhang Zhongping, Chen Wanzhen, Zhang Haifeng, Wang Yuanming, Meng Wendong, Wang Jie, Zou Guangnan, Liao Ying, Wang Luyuan, Ivan Prochazka, Zhao You, Fan Cunbo, Han Xingwei // Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging. — October 2008, Poznań, Poland. — Vol. 1. — P. 690–694.
4. *Игнатенко Ю. В., Тряпицын В. Н., Игнатенко И. Ю.* Определение разности хода часов на Земле и на ИСЗ методом лазерной локации // Проблемы управления и информатики. — 2004. — N 3. — С. 44–49.
5. *Наумов А. В., Игнатенко И. Ю. и др.* Формирование и передача шкалы времени в ГНС ГЛОНАСС // С. Н. Каган, И. Б. Норец, Ю. Ф. Смирнов // Метрология времени и про-

странства. Материалы 6-го Международного симпозиума. — Менделеево: ФГУП ВНИИФТРИ, 2012. — С. 290—293.

6. *Игнатенко И. Ю., Игнатенко Ю. В., Тряпицын В. Н.* Коррекция шкал времени на Земле и ИСЗ методом лазерной локации // Метрология времени и пространства. Доклады 6-го Международного симпозиума. — Менделеево: ФГУП ВНИИФТРИ, 2013. — С. 408—409.

A Method to Compare Time Scales at a SLR Station and a Satellite

I. Yu. Ignatenko, V. N. Triapytsyn, Yu. V. Ignatenko

We suggest a modified T2L2 method to compare time scales at a SLR station and a satellite. Having the times of three events (the laser fire, its reflection from the satellite reflector and the satellite echo detected at the SLR station), we get the system of equations connecting the parameters which can be measured in the satellite laser ranging with the time bias between the station and the satellite. We consider instrumental errors and timing delays (electronic, geometrical and optical) at the SLR station and on board the satellite. We analyze various ways of placing the retroreflector surface and directions of the laser impulse.

Keywords: satellite laser ranging, universal time (UTC), time scales, time scales comparison, retroreflectors, GLONASS.