

Сравнение удаленных временных шкал методом лазерной локации

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

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

² ФГБУН «КраО», п. Кацивели, Республика Крым, Россия

Всероссийская астрометрическая конференция “Пулково-2018”

1-5 октября 2018

Введение.

Современные навигационные спутниковые системы – глобальные как GPS (USA), GLONASS (Россия), региональные как BeiDou(Китай)(пока), IRNSS (Индия), Galileo(Европа) позволяют с точностью порядка 10^{-10} - 10^{-9} секунды сверять временные шкалы удаленных на большое расстояние часов. Этого достаточно для многих приложений, но некоторые научные задачи требуют более высокой точности сверки шкал. Использование метода лазерной локации искусственных спутников Земли (ИСЗ) дает возможность измерять разность шкал времени на спутнике и на Земле с точностью вплоть до 10^{-11} - 10^{-12} секунды.

В работе [4] изложен высокоточный способ сверки часов между двумя разнесенными лазерно-локационными станциями в ходе эксперимента LASSO (LAsER Synchronization from Stationary Orbit), (идея высказана в 1972 году). 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 CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) и Европейского космического агентства (ESA). С середины 2008 года для сверки шкал с использованем метода лазерной локации применяется альтиметрический спутник Jason 2 [5]. 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 [6]. Подобные работы ведутся и в российской навигационной системе ГЛОНАСС.

В статье рассматривается методика в которой исключаются временные задержки на передачу сигнала, как внутри измерительной системы на Земле, так и на борту ИСЗ).

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 (стандарты времени и частоты [2]) фиксируются момент излучения ЛИ на станции лазерной локации, момент регистрации попадания ЛИ на датчик бортовыми средствами ИСЗ, момент прихода сигнала от отраженного от ИСЗ ЛИ в измерительную часть станции лазерной локации [3]. Все моменты времени отсчитываются от начала суток календарной даты наблюдений в секундах.

Решение задачи

Опорной точкой лазерно-локационной системы обычно является точка А - точка пересечения осей телескопа. Именно для этой точки определяются координаты станции лазерной локации.

Рассмотрим упрощенную временную диаграмму событий при лазерной локации и калибровке: Альтазимутальная монтировка телескопа на SLR 1893 (Кацивели).

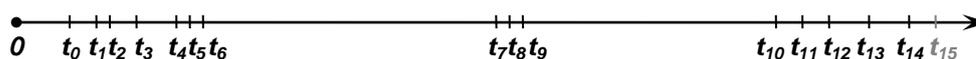


Рис. 1. Временная последовательность событий при одном цикле лазерной локации.

На рис.1 шкала времени не масштабирована, но порядок событий реальный. Все нижеперечисленные моменты времени отсчитываются в секундах от начала суток календарной даты наблюдений.

- t_0 – от генератора частоты поступает сигнал на запуск лазера;
- t_1 – происходит излучение ЛИ;
- t_2 – попадание части ЛИ на фотодатчик и выработка стартового сигнала о начале измерения интервала времени распространения ЛИ до ИСЗ и обратно;
- t_3 – начало счета измерителя временных интервалов и фиксирование этого события в шкале времени станции (по стартовому сигналу);
- t_4 – приход пучка ЛИ в точку где установлен калибровочный уголок;
- t_5 – по оптическому пути установки ЛИ попадает в т. А;
- t_6 – по оптическому пути телескопа ЛИ приходит к выходу из телескопа;

t_k – окончание счета измерителя временных интервалов и фиксирование результата калибровки (по стоповому сигналу);

t_7 – ЛИ попадает на отражатель расположенный на ИСЗ и отражается;

t_8 – ЛИ попадает на датчик фоторегистратора на ИСЗ, вырабатывается сигнал;

t_9 – фиксируется время прихода сигнала о попадании ЛИ на датчик на ИСЗ;

t_{10} – ЛИ после отражения доходит до входа в телескоп;

t_{11} – ЛИ достигает т. А;

t_{12} – приход ЛИ (или единичных фотоэлектронов) в точку где установлен калибровочный уголок;

t_{13} – приход ЛИ (или единичных фотоэлектронов) в фотоприемник, выработка стопового сигнала об окончании измерения интервала времени распространения ЛИ до ИСЗ и обратно;

t_{14} – окончание счета измерителя временных интервалов и фиксирование результата измерения (по стоповому сигналу);

t_{15} – фиксирование окончание счета измерителя временных интервалов в стандарте времени и частоты.

Моменты t_{14} и t_{15} могут совпадать, или иметь четко определяемый сдвиг. Моменты t_{14} или t_{15} по отдельности (в зависимости от оптической схемы) могут вообще не фиксироваться.

В лазерно-локационных установках с другой монтажкой телескопа или камеры, с другой оптической схемой, тем не менее существуют моменты, t_0 , t_1 , t_3 , t_4 , t_5 , t_7 , t_{11} , t_{12} , t_{13} , t_{14} или их аналоги.

Во время сеанса лазерной локации производится N посылок ЛИ. Регистрируется 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. Далее 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:

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

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

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

$$2T_i = \frac{L_i}{c} + \frac{L_i + \Delta L_i}{c} = \frac{2L_i + \Delta L_i}{c} \quad (4)$$

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

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

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

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

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:

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

Уравнение (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 позволяют найти разность шкал времени. Момент τ_{1i} является измеряемой величиной. Моменты t_{0i} и t_{2i} являются моментами пересечения ЛИ т. А, как от лазера к отражателю на ИСЗ, так и от отражателя к регистрирующей части измерителя временных интервалов или временного счетчика. Эти моменты не являются измеряемыми ни в одной существующей лазерно-локационной измерительной системе. Для определения этих моментов времени нужны коррекции регистрируемых моментов начала и конца единичного измерения. Надо 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 (конец измерения). Для этого надо измерить все расстояния, которые ЛИ проходит через набор оптических элементов и измерить или оценить электронные задержки в процессе измерения (за исключением неопределяемых абсолютно точно).

Для многих систем среднее значение интервала внутренней калибровки, по которому можно оценить сумму вышеуказанных интервалов составляет порядка 100 нс. Спутник со скоростью 7 км/сек проходит по орбите за это время 0.7 мм. Свет проходит это расстояние за 23 пикосекунды. Поскольку это движение по орбите, то радиальное изменение расстояние от станции лазерной локации до ИСЗ составляет в несколько раз меньше. Тем не менее, эти величины надо учитывать для точного решения.

Надо получить сумму моментов t_5 и t_{11} из суммы моментов t_3 и t_{14} . соответственно.

Используя временную диаграмму событий, получим:

$$t_{14} + t_3 = t_{11} + t_5 + (t_{14} - t_{12}) + (t_{12} - t_{11}) - (t_4 - t_3) - (t_5 - t_4)$$

Так как $t_{12} - t_{11} = t_5 - t_4 = \text{cal}_0$ – интервал времени, за который ЛИ проходит от калибровочного уголка до т. А или в обратном направлении, то:

$$t_{14}+t_3=t_{11}+t_5+(t_{14}-t_{12})-(t_4-t_3)+cal_0-cal_0$$

Обозначим $t_{14}-t_{12}$ как cal_2 , а t_4-t_3 как cal_1 . Тогда:

$$t_{14}+t_3=t_{11}+t_5+cal_2-cal_1$$

Проверим основное уравнение лазерной локации:

$$t_{14}-t_3=t_{11}-t_5+(t_{14}-t_{12})+(t_{12}-t_{11})+(t_4-t_3)+(t_5-t_4)$$

с учетом введенных обозначений, имеем

$$t_{14}-t_3=t_{11}-t_5+cal_0+cal_2+cal_0+cal_1$$

$cal_0+cal_2+cal_0+cal_1$ - полное значение калибровочной задержки сигнала cal

$$t_{14}-t_3=t_{11}-t_5+cal$$

$$cal=t_k-t_3+cal_0+cal_0$$

Что и требовалось показать.

Поправка ΔL_i обусловлена вращением Земли и может быть вычислена.

В реальных наблюдениях в уравнения (2), (4), (5), (6) добавляется релятивистская и рефракционная поправки, а также поправка на расстояние между отражающей поверхностью и центром масс ИСЗ. При получении уравнения (8) из уравнения (6) вычитается уравнение (5). За время одного цикла измерения, значения этих поправок не изменятся более чем на 1 пс. Поправки до отражения вычитаются из поправок после отражения от ИСЗ. Уравнение (8) будет иметь тот же вид, что и без добавления указанных поправок.

За время сеанса лазерных наблюдений ИСЗ (2 мин. - низкие ИСЗ, 0.5-3 часа - высокие ИСЗ) разность шкал Δt может измениться. Каждому измерению соответствует свое значение Δt . Наложение полиномиальной регрессии на полученные значения Δt , позволяет получить параметры сдвига одной шкалы относительно другой.

При практическом решении поставленной задачи важными являются точность временной привязки событий в измерительной системе, точность измерителя временных интервалов или временного счетчика, длительность ЛИ и устойчивость работы лазера. Все вышеперечисленные параметры влияют на результирующую погрешность измерений, от которой непосредственно зависит решение нашей основной задачи. Параметры

конкретной измерительной установки определяют значение поправок, которые необходимо определить и внести в окончательное значение Δt .

Новая лазерно-локационная установка (Менделеево)

Весной-летом 2018 г. проходят приемно-сдаточные испытания новой лазерно-локационной установки в Менделеево. Рассмотрим ее возможное использование для решения нашей задачи.

Рассмотрим упрощенную временную диаграмму событий при лазерной локации и калибровке: Новая лазерно-локационная установка (Менделеево).

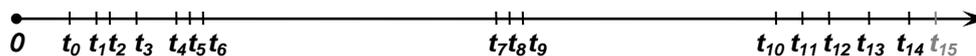


Рис. 2. Временная последовательность событий при одном цикле лазерной локации.

На рис. 2 шкала времени не масштабирована, но порядок событий реальный. Все моменты времени отсчитываются в секундах от начала суток календарной даты наблюдений.

Все вышеприведенные моменты времени для SLR 1893 присутствуют и для новой установки в Менделеево, за исключением моментов t_4 и t_{12} . Они заменяются моментами t_6 штрих и t_{10} штрих, что обусловлено наличием в оптической схеме призмы-крыши на выходе ЛИ из передающей трубы вместо калибровочного уголка перед входом ЛИ в телескоп. Подобная схема применяется на действующей установке в Менделеево (SLR 1874) и доказала свою эффективность [8]. Основная часть ЛИ отправляется к ИСЗ, существенно меньшая часть ЛИ ослабляется при помощи фильтра до однофотонного уровня и передается к выходу из призмы-крыши (момент t_6 2 штриха) и далее в приемную часть установки и фиксируется на временной шкале. В результате, на временной шкале, согласованной со стандартом времени и частоты, имеется метка начала измерений t_3 , метка фиксации прихода части ЛИ в измерительную часть, и метка фиксации прихода отраженного от ИСЗ ЛИ t_{15} (конец измерений). При этом калибровка производится непосредственно в процессе сеанса измерений. Обозначим $dp = t_6$ 2 штриха – t_6 штрих - это интервал времени за который часть ЛИ проходит по призме-крыше от точки входа до точки выхода, ослабляясь при этом.

$$dp = r \cdot n / c$$

r -расстояние между точками входа и выхода части ЛИ.

n -коэффициент преломления материала призмы-крыши.

c-скорость света в вакууме.

Более точно dp определяется способом, изложенным в [8].

Обозначим полную калибровку системы как cal .

$$p1 = t_6 \text{ штрих} - t_5$$

$$t_k - t_6 \text{ 2 штриха} = t_{14} - t_{10} \text{ штрих}$$

$$p2 = t_{11} - t_{10} \text{ штрих}$$

Обозначим $t_{14} - t_{11}$ как cal_2 , а $t_5 - t_3$ как cal_1 . Тогда:

$$cal = cal_1 + cal_2 = t_k - t_3 - dp - p1 - p2$$

Из-за неполного знания распределения калибровки во время сеанса измерений применяется следующая робастная оценка. Весь массив калибровочных интервалов во время сеанса подвергается фильтрации и для него вычисляется регрессионная кривая. Соответствующие моментам фиксации отраженного сигнала значения на этой регрессионной кривой принимаются за значения полной калибровки на данный момент и вычитаются из измеренного интервала времени [8].

Надо получить сумму моментов t_5 и t_{11} из суммы моментов t_3 и t_{14} . соответственно.

Используя временную диаграмму событий, получим:

$$t_{14} + t_3 = t_{11} + t_5 + (t_{14} - t_{11}) - (t_5 - t_3)$$

С учетом ранее введенных обозначений имеем:

$$t_{14} + t_3 = t_{11} + t_5 + cal_2 - cal_1$$

Проверим основное уравнение лазерной локации:

$$t_{14} - t_3 = t_{11} - t_5 + (t_{14} - t_{11}) + (t_5 - t_3)$$

$$t_{14} - t_3 = t_{11} - t_5 + cal_2 + cal_1$$

$$t_{14} - t_3 = t_{11} - t_5 + cal$$

Что и требовалось показать.

Определение новой схемы внешней калибровки

Для учета неустранимых инструментальных погрешностей при лазерной локации ИСЗ предлагается поместить калибровочный уголок или фотодатчик в т. А.

Определение влияния формы отражающей поверхности

Для оценки геометрических отклонений в сеансе лазерной локации были исследованы варианты взаимного расположения станции лазерной локации, ИСЗ и видов отражающей поверхности. Были рассчитаны геометрические отклонения от выпуклой сферической, вогнутой сферической и плоской отражающих поверхностей. Рассмотрим здесь один из вариантов.

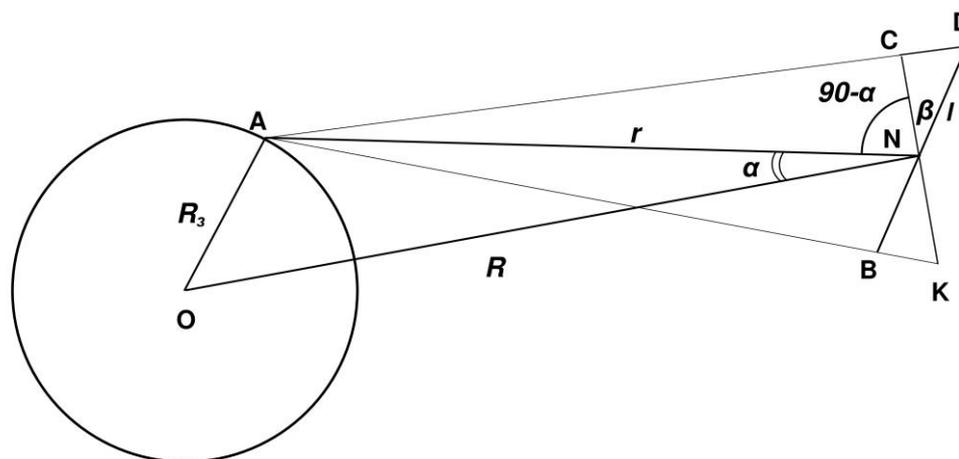


Рис.3. Падение ЛИ на отражающую панель, расположенную под углом β к перпендикуляру к радиусу-вектору из центра Земли

Отражающая панель (на спутнике) с максимальным расстоянием l от центра панели сориентирована 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. $NB=ND$ - максимальное отклонение по отражающей поверхности от центра отражающей поверхности (обозначим его l). Угол ANO - угол между направлением локатор - центр отражающей поверхности и направлением центр масс Земли - центр отражающей поверхности (обозначим его α). Отрезок AN - расстояние между локатором и центром отражающей поверхности (обозначим его r). Отрезок ON - расстояние между центром Земли и центром отражающей поверхности (обозначим его R). Отрезок OA - расстояние между центром Земли и локатором (обозначим его R_3).

Для оценки отклонений будем задавать различные значения R (расстояние центра отражающей поверхности от центра Земли) и h (высота ИСЗ над горизонтом, без учета рефракции). По теореме синусов:

$$\frac{\sin(90 + H)}{R} = \frac{\sin(\alpha)}{R_c} \quad \text{или} \quad \frac{\cos(H)}{R} = \frac{\sin(\alpha)}{R_c} \quad (9)$$

Из геометрических соотношений определяем α и r и далее получим

$$AD = \sqrt{r^2 + l^2 - 2 * r * l * \sin(\alpha - \beta)}$$

$$AB = \sqrt{r^2 + l^2 + 2 * r * l * \sin(\alpha - \beta)}$$

Максимальное отклонение при локации $d=AB-AD$.

Для расчета отклонений (все варианты), были проделаны вычисления, в которых рассматривались следующие значения параметров: $l = 15$ см, 30 см, 40 см, 55 см, 150 см; $R = 8000$ км, 12227 км, 25600 км, 42270 км, 384400 км; Высота над уровнем горизонта H : 30, 60, 75, 85 град. Угол отклонения оси ИСЗ от направления на центр Земли $\beta = -2.0, -1.0, -0.50, -0.25, -0.10, 0.10, 0.25, 0.50, 1.0, 2.0$ град. По результатам расчетов для плоской панели

$$d \approx 2 * l * \sin(\alpha - \beta) \quad (10)$$

Оптимальной, как следует из выражений (9) и (10), для плоской панели будет схема с отражателем и фотоэлементом расположенными 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 от 0.5 л до л (радиус поверхности). Для сферической вогнутой поверхности подбором l (до 0.4 м), R и H , отклонение можно уменьшить до 1 пс.

Заключение

Данный метод позволяет определить с точностью 100-300 пс для существующих ИСЗ и 10-30 пс для будущих перспективных ИСЗ разности шкал времени станции лазерной локации и ИСЗ. Он позволяет провести эксперименты по проверке теории относительности и сравнения хода часов в двух неинерциальных системах отсчета (на Земле и на ИСЗ).

До эксперимента по определению разности шкал времени на Земле и на ИСЗ для точного решения должны быть предполетные испытания для определения суммы $l_1 + l_2$ и других величин. Для окончательного решения поставленной задачи необходимо исследовать измерительную установку для получения указанных в статье поправок к Δt и определения погрешностей. Из проделанных при подготовке данной статьи вычислений следует что, спутники с выпуклой сферической отражающей поверхностью и плоские панели больших размеров плохо подходят для нашей задачи. Более перспективными являются спутники с вогнутой сферической отражающей

поверхностью, аналогичные VLITS или кольцевая ретрорефлекторная система [7]. Подобный отражатель ориентируемый на станцию лазерной локации почти идеален для решения нашей задачи.

Литература.

1. Ю.В. Игнатенко, В.Н. Тряпицын, И.Ю. Игнатенко. Определение разности хода часов на Земле и на ИСЗ методом лазерной локации. Проблемы управления и информатики. 2004. N 3. стр. 44-49.

2. А.В. Наумов, И.Ю. Игнатенко, С.Н. Каган, И.Б. Норец, Ю.Ф. Смирнов. Формирование и передача шкалы времени в ГНС ГЛОНАСС. В кн.: Метрология времени и пространства. Материалы 6-го Международного симпозиума. Менделеево, ФГУП ВНИИФТРИ, 2012, с. 290 – 293.

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

4. Ch. Vellet “Lasso the European Phase. Aug. 88-Sept. 89.” Seventh International workshop on Laser Ranging Instrumentation”. Matera 10. 1989. pp.27-32.

5. E. Samain, Ph. Guillemot, P. Exertier, D. Albanese, P. Berio, O. Laurain, F. Para J. Paris, J.-M. Torre, H. Viot, P. Vrancken, I. Petitbon, S. Leon. Time Transfer by Laser Link - T2L2: First data. Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging. October 2008, Poznań, Poland, Volume 1, p. 682-689.

6. Yang Fumin, Huang Peicheng, 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. Preliminary Results of the Laser Time Transfer (LTT) Project. Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging. October 2008, Poznań, Poland, Volume 1, p. 690-694.

7. Бурмистров В.Б., Садовников М.А., Соколов А.Л., Союзова Н.М., Шаргородский В.Д. Кольцевая ретрорефлекторная система // Квантовая электроника, 2013, Том 43 №9. С. 800 – 806.

8. Igor Yu. Ignatenko Method of comparison laser locator with standard of length. Seventeenth International Workshop on Laser Ranging Instrumentation. Bad Koetzting, Germany, **May 16-20, 2011.**