

УДК 520.874.7

## Проект оптимизации оптической системы лазерного спутникового дальномера Simeiz-1873

О.А. Минин<sup>1</sup>, Д.И. Неяченко<sup>1</sup>, И.В. Артемов<sup>1</sup>, А.И. Дмитроца<sup>1</sup>

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 10 февраля 2008 г.

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследования эффективности работы оптических трактов лазерного спутникового дальномера (ЛСД) Simeiz-1873, предложена перспективная модификация оптической системы, позволяющая значительно повысить эффективность работы станции. Приводятся методики лоцирования спутников одновременно в двух диапазонах длин волн: 532 нм, и 1064 нм, управления полезной приемной апертурой телескопа.

PROJECT OF SIMEIZ-1873 SLR OPTICAL SYSTEM OPTIMIZATION, by O.A. Minin, D.I. Neyachenko, I.V. Artyomov, A.I. Dmitrotsa. The article presents research results on the effectivity of optical channels of a laser satellite ranger (LSR) Simeiz-1873. The perspective modification of an optical system which enables to increase significantly the effectivity of station operation is suggested. The technique of location of satellites simultaneously at two wavelengths: 532 nm and 1064 nm is considered as well as technique of control of the usable receiving aperture of the telescope.

**Ключевые слова:** спутниковый лазерный дальномер, лазерная локация искусственных спутников Земли.

---

## 1 Введение

Развитие современных лазерных спутниковых дальномеров (ЛСД) на данный момент времени идет по следующим направлениям:

- переход на высокочастотную локацию искусственных спутников Земли (ИСЗ) (Дегнан и др., 2003–2004; Кричнер и др., 2004; Райпл и др., 2004);
- круглосуточная локация ИСЗ (Жао и др., 2004; Лапушка, 2003–2004);
- одновременная локация в нескольких диапазонах длин волн (Гуртнер и др., 2003–2004; Жонгпинг и др., 2004; Райпл и др., 2004).
- повышение точности измерения расстояний;
- автоматизация процесса лоцирования ИСЗ.

Реализация каждого из перечисленных пунктов позволяет добиться значительно лучших показателей эффективности работы спутникового дальномера, но требует достаточно серьезных модификаций различных систем. Повышение точности измерения расстояний – комплексная задача, слабо зависящая от работы оптической части дальномера. Так же и автоматизация процесса локации практически не связана с используемым телескопом, поэтому эти вопросы в данной статье

рассматриваться не будут. Для достижения результата в любом из оставшихся направлений необходимо продолжить модернизацию оптической системы телескопа (Штирберг, 2003а; Штирберг, 2003–2004). Для обеспечения высокочастотной локации искусственных спутников Земли (ИСЗ), желательно разнести приемный и передающий оптические тракты. В идеальном случае лоцирующий лазерный импульс должен передаваться через собственное зеркало, соосное с приемным. Только в случае полной изоляции оптических трактов можно избавиться от сильной паразитной засветки фотоприемника и от подвижных механических деталей в приемном оптическом тракте, ограничивающих предельную частоту локации спутников. К сожалению, конструкция телескопа серии “Крым” не позволяет проложить передающий оптический тракт отдельно от приемного без значительной модификации телескопа. Для работы в двух диапазонах длин волн необходимо обеспечить идентичное прохождение оптических сигналов через передающую оптическую систему. Круглосуточная локация ИСЗ предполагает наличие возможности управления приемной апертурой телескопа, качественной оптической изоляции приемного тракта от внешних засветок.

## 2 Анализ используемой оптической системы дальномера

На данный момент (Штирберг, 2003–2004г) ЛСД Simeiz-1873 лоцирует спутники на одной длине волны 532 нм, зондирующий лазерный импульс посылается с частотой в 5 Гц, станция работает только в ночное время. На рис. 1 представлена существующая на данный момент оптическая схема дальномера.

Апертура телескопа поделена между приемом и передачей лазерной посылки в пропорции 90 % к 10 % (то есть 0.07 м<sup>2</sup> полезной площади главного зеркала отдано на передачу зондирующего сигнала, остальная часть апертуры 0.64 м<sup>2</sup> работает на прием). Такое решение позволяет значительно упростить оптическую схему телескопа, убрать подвижные детали из передающего тракта.

Лазерный передатчик генерирует импульс длительностью порядка 400 пс длиной волны  $\lambda = 1064$  нм. На элементе KDP<sup>1</sup> порядка 40 % мощности лазерного передатчика перекачивается во вторую гармонику  $\lambda = 532$  нм, остальная часть инфракрасного излучения отсекается после KDP с помощью “теплого зеркала” в сторону. Часть отраженной теплым зеркалом энергии используется для регистрации момента выстрела лазера. Далее лазерный импульс с  $\lambda = 532$  нм проходит последовательно через оптические элементы 4, 5, 6, 7, 8 и 9. Зондирующий импульс проходит сквозь атмосферу Земли, попадает на уголкового отражатель, находящийся на спутнике, отражается в сторону источника излучения, проходит в обратную сторону через толщу атмосферы. Возвратившиеся единичные кванты света попадают на главное зеркало телескопа (9) и далее через оптические элементы 8, 7, 6, 10, 11, 12, 13 попадают на фотоприемник.

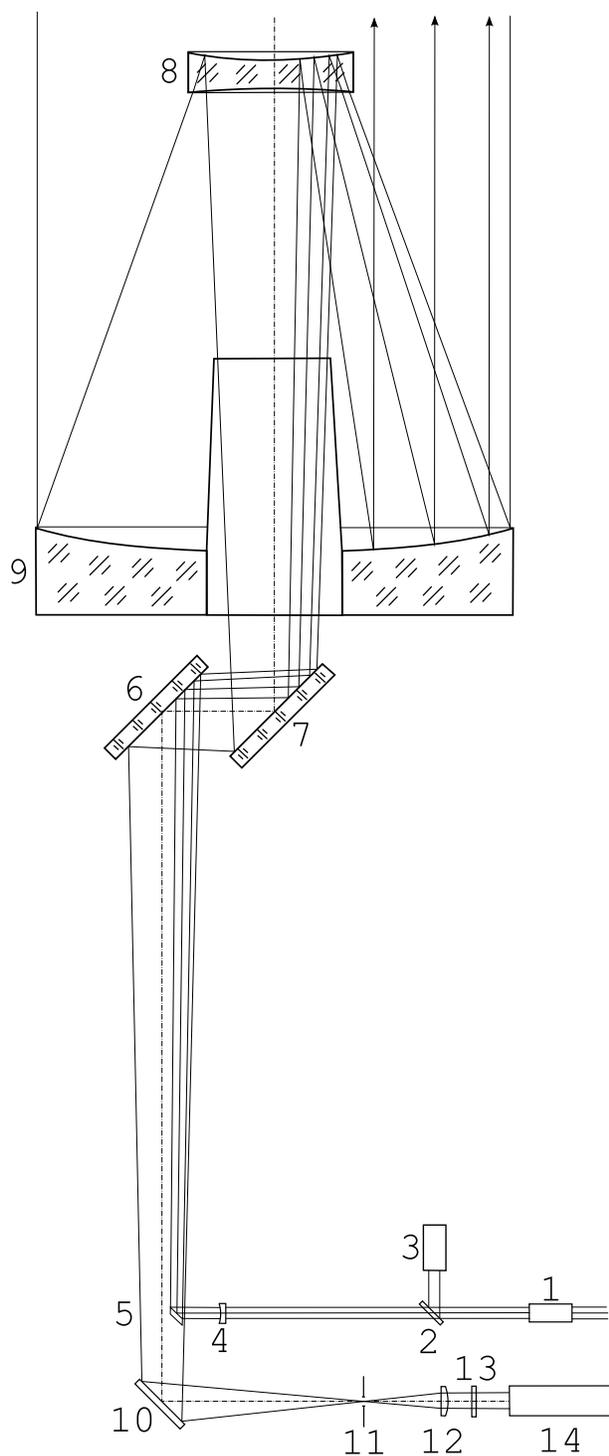
Потери в оптических трактах считаются согласно формуле:

$$\tau_x = \sum_{i=1}^n \tau_i, \quad (1)$$

где  $\tau$  – коэффициент пропускания (или отражения) оптической среды (поверхности),  $i$  – номер оптического элемента,  $n$  – количество оптических поверхностей (сред). На данный момент только оптический элемент 5 имеет прочное диэлектрическое покрытие с высоким коэффициентом отражения 0.98 на  $\lambda = 532$  нм. При расчетах брались следующие коэффициенты пропускания (отражения) оптических элементов: алюминированные зеркала – 0.85; переход стекло-воздух или воздух-стекло – 0.96, стекло – 0.996. Износ поверхностей зеркал при расчетах не учитывался. Таким образом, полученные расчеты позволяют лишь приблизительно оценить эффективность работы оптических трактов телескопа.

Согласно расчетам коэффициент пропускания передающей части составляет 0,416. То есть порядка 40 % мощности лазерного луча отправляется в направлении спутника, остальная энергия

<sup>1</sup>  $KH_2PO_4$



- 1 - кристалл KDP.
- 2 - теплое зеркало.
- 3 - регистратор старта.
- 4 - отрицательная линза -2,5 дптр.
- 5 - ломающее зеркало.
- 6,7 - кудэ-зеркала.
- 8 - вторичное зеркало.
- 9 - главное зеркало.
- 10 - перекидное зеркало.
- 11 - диафрагма.
- 12 - положительная линза.
- 13 - интерференционный фильтр.
- 14 - фотоприемник.

Рис. 1. Оптическая система

лазера теряется на поверхностях зеркал и рассеивается в оптических средах. Коэффициент пропускания приемного оптического тракта 0.359 без учета потерь на интерференционном фильтре. Коэффициент пропускания используемого интерференционного фильтра 0.3, квантовая эффективность (QE) работы фотоприемника по данным спецификации  $\approx 10\%$  на  $\lambda = 532\text{нм}$ .

Общая эффективность работы приемно-регистрирующей части дальномера с учетом потерь в оптических средах, а также учитывая чувствительность используемого фотоприемника составляет порядка 0.01, то есть из 100 фотонов, попавших на главное зеркало телескопа, будет зарегистрирован всего один фотон (что действительно наблюдается при анализе работы нашей станции (Штирберг, 2004б)). При лоцировании высоких спутников, отклик от которых находится на уровне нескольких фотонов, для получения одного результативного измерения необходимо 50–100 вспышек лазерного передатчика.

Рассмотрим энергетические потери в лазерном передатчике. Лазерный передатчик генерирует импульс<sup>2</sup> на  $\lambda = 1064\text{ нм}$  с энергией в 225 мДж. На кристалле KDP потери энергии составляют 8 %. Суммарная энергия излучения на двух длинах волн 1064 нм и 532 нм после кристалла KDP составляет 208 мДж. От “теплого зеркала” в сторону отсекается излучение на  $\lambda = 1064\text{ нм}$  и частично (около 4 %) на  $\lambda = 532\text{нм}$ , общая энергия отводимого в сторону излучения составляет 127 мДж. Только 70 мДж проходит сквозь “теплое зеркало” и попадает на вход передающей части телескопа. Замеры энергии лазерного излучения велись при частоте срабатываний 3 Гц, на измерителе средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н.

Таким образом, если учесть потери в передающем тракте телескопа, в сторону спутника с поверхности главного зеркала телескопа излучается импульс мощностью в  $\approx 29\text{ мДж}$ , то есть всего 1/8 энергии лазерного передатчика используется для зондирования ИСЗ. Расходимость зондирующего лазерного луча составляет порядка 20".

### 3 Оптимизация оптических трактов

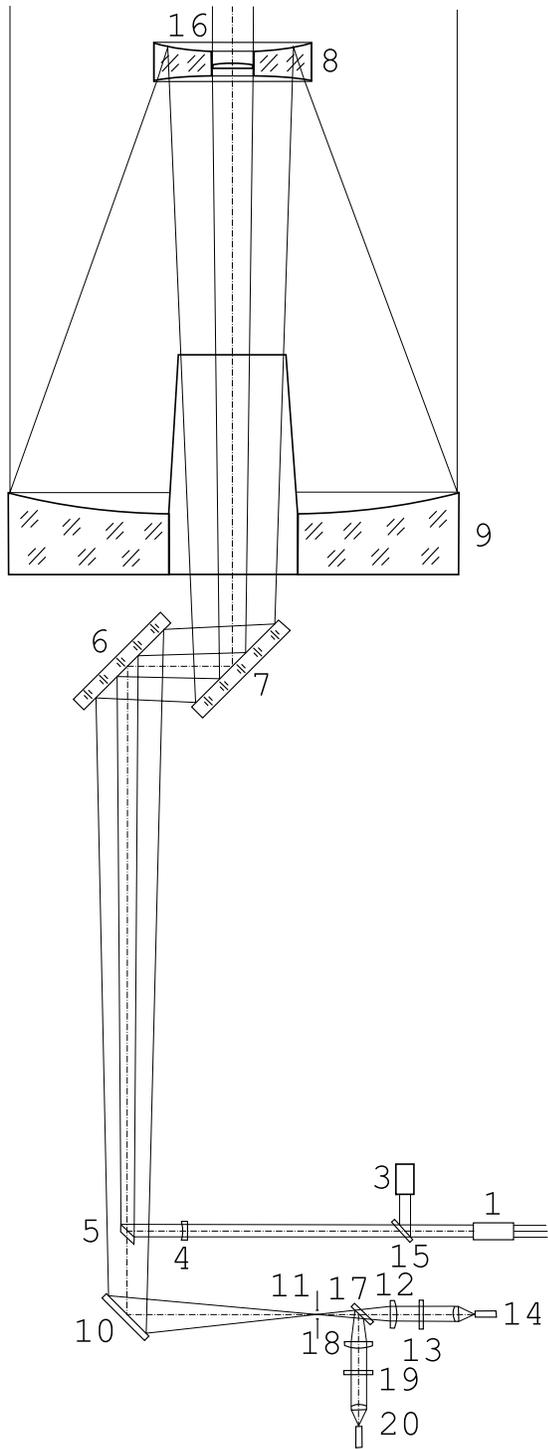
Схема предлагаемой оптимизации оптической системы дальномера приведена на рис. 2.

Передающий оптический тракт располагается в темновом конусе телескопа (идея использования темного конуса телескопа принадлежит Лапушка (2003–2004)). Зондирующий лазерный импульс выводится через отверстие во вторичном зеркале телескопа. “Теплое зеркало” убирается из передающего тракта телескопа. С помощью просветленной с одной стороны плоскопараллельной пластинки (15) часть импульса отводится на регистратор момента выстрела лазера (3). Далее световой импульс через отрицательную линзу (4) попадает на ломающее зеркало (5), находящееся в темновом конусе телескопа. С ломающего зеркала через центральные области кудэ-зеркал (6, 7) световой импульс проходит через положительную линзу (16), образуя параллельный пучок с минимальной расходимостью 6". На все оптические элементы передающего тракта наносятся тугоплавкие диэлектрические отражающие и просветляющие покрытия, рассчитанные на две длины волны: 532 нм и 1064 нм с суммарной энергией в импульсе более 1 ГВт/см<sup>2</sup>. Центральные области кудэ-зеркал, находящиеся в темновом конусе, также покрываются тугоплавким диэлектрическим зеркальным покрытием, рассчитанным на две длины волны. Для взаимной изоляции оптических трактов устанавливаются бленды между положительной линзой и вторым кудэ-зеркалом, между первым кудэ-зеркалом и маленьким зеркалом, между отрицательной линзой и плоскопараллельной пластинкой.

Предлагаемый вариант модификации обладает следующими преимуществами перед существующей схемой:

- полностью используется приемная апертура телескопа;
- расчетная эффективность передающей системы повышается с 0.416 до 0.796, то есть практически в два раза;
- не изнашивается поверхность главного зеркала и кудэ-зеркал от воздействия лазерного излучения;

<sup>2</sup> измерения проводились в начале 2008 года



- 1 - кристалл KDP.
- 3 - плоско-параллельная пластинка
- 4 - отрицательная линза  $-2,77$  дптр.  $D = 12$  mm
- 5 - ломающее зеркало  $12 * 17$  mm.
- 6,7 - кудэ-зеркала.
- 8 - вторичное зеркало.
- 9 - главное зеркало.
- 10 - перекидное зеркало.
- 11 - диафрагма.
- 12 - положительная линза  $532$  нм просветление.
- 13 - интерференционный фильтр  $532$  нм.
- 14 - фотоприемник  $532$  нм.
- 15 - плоско-параллельная пластинка.
- 16 - положительная линза  $+0,37$  дптр  $D = 62$  mm.
- 17 - теплое зеркало.
- 18 - положительная линза  $1064$  нм.
- 19 - интерференционный фильтр  $1064$  нм.
- 20 - фотоприемник  $1064$  нм.

Рис. 2. Модификация оптической схемы

- значительно ослабляется величина паразитных бликов на приемный тракт телескопа за счет введения бленд почти по всей длине передающего оптического тракта;
- расчетная эффективность приемной системы повышается за счет полного использования полезной площади главного зеркала и работы одновременно в двух диапазонах длин волн.
- появляется возможность менять приемную апертуру телескопа, поместив управляемую диафрагму на бленду;
- появляется возможность лоцировать ИСЗ на значительно более высокой частоте за счет исключения из приемного тракта подвижных механических элементов;
- появляется возможность лоцировать спутники на нескольких длинах волн одновременно;

#### 4 Методики юстировки телескопа

В связи с модификацией передающего оптического тракта возникает необходимость в разработке методик юстировки вторичного зеркала (методики юстировки остальных оптических элементов не меняются). Предлагается два варианта юстировки вторичного зеркала.

1. Устанавливается автоколлиматор с призмами по оси главного зеркала. Блок призм снимается, и угловыми подвижками вторичного зеркала с установленной в отверстие линзой при вращении автоколлиматора относительно оси добиваются неподвижности креста, построенного отражением пучка от плоской поверхности линзы. Затем перестраивают коллиматор на выпуклую поверхность линзы и добиваются неподвижности креста при вращении автоколлиматора перемещениями вторичного зеркала перпендикулярно оси. При этом допуск на установку линзы по углу относительно вторичного зеркала  $10''$ , а по децентрировке  $0,3$  мм.
2. С помощью гелий-неонового лазера и зеркала, перемещающегося по прямолинейным и неподвижным относительно главного зеркала направляющим, моделируется апертурный пучок лучей. Предварительно зеркалом на направляющих провешивается ось через отверстие вторичного зеркала и кудэ-зеркала, а затем при перемещении зеркала по направляющим корректируется положение вторичного зеркала по углу. Добиваются совмещения осевого и апертурных лучей и неподвижности луча лазера в районе фокальной плоскости телескопа, этим определяя ее.

#### 5 Выводы

В результате предложенной модификации оптических трактов телескопа появляется возможность повысить эффективность работы станции в 4–5 раз, при работе на двух длинах волн. Модификация оптических трактов по предложенной схеме является ключевым фактором, позволяющим разрабатывать в дальнейшем все перспективные направления развития лазерных спутниковых дальнометров с учетом мировых тенденций, а также задает направление работ по развитию станции Simeiz-1873 на ближайшие годы.

#### Литература

- Гуртнер (Gurtner W.) // ILRS annual report. 2003–2004. P. B-50.  
 Дегнан (Degnan J.) // ILRS annual report. 2003–2004. P. 1–6.  
 Жао (Zhao Y.) // Proc. of the 14th International workshop on Laser Ranging. June. 2004. P. 179.  
 Жонгпинг (Zhongping Zh.) // Proc. of the 14th International workshop on Laser Ranging. June. 2004. P. 277.  
 Кричнер (Krichner G.) // Proc. of the 14th International workshop on Laser Ranging. June. 2004. P. 501.  
 Лапушка (Lapushka K.) // ILRS annual report. 2003–2004. P. B-39.  
 Райпл и др. (Riepl S.) // Proc. of the 14th International workshop on Laser Ranging. June. 2004. P. 507.  
 Хулли (Hulley G.) // Proc. of the 14th International workshop on Laser Ranging. June. 2004. P. 301.

Чандлер (Chandler J.F.) // Proc. of the 14th International workshop on Laser Ranging. June. 2004. P. 92.

Штирберг и др. // 3-я Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям. Кацивели. Сентябрь. 2003а. С. 169.

Штирберг и др. // 3-я Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям. Кацивели. Сентябрь. 2003б. С. 162.

Штирберг и др. // ILRS annual report. 2003–2004. P. B-42.