

О возможности создания ИК лидара на базе телескопа АЗТ-33-ИК

В.И. Буякас,
А.И. Ерохин,
А.М. Цховребов
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва,
И.Е. Молотов,
А.Н. Юдин
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, г. Москва

Для эффективной работы космического радиотелескопа, функционирующего в режиме наземно-космического интерферометра необходима точная и оперативная информация о местоположении его орбитальных элементов. С целью решения подобных задач рассматривается возможность использования телескопа типа АЗТ-33-ИК в составе лидарного комплекса, способного производить лазерную локацию космических объектов на длине волны 10 микрон.

For efficient operation of space radio telescope, functioning in mode of ground-space interferometer exact and the on-line information about location its orbital elements is needed. For the purpose of solution of alike tasks the utilization possibility of type telescope AZT-33-IR as a part of lidar complex, capable of production the laser location of space objects at the wavelength 10 microns is being considered.

Ранее с целью повышения точности и оперативности лазерного лоцирования удаленных космических объектов (включая орбитальные элементы наземно-космического радиоинтерферометра) мы предложили [1,2] использовать локацию в дальнем ИК-диапазоне на длине волны 10 микрон. При этом проблемы лоцирования космических объектов на дальностях вплоть до 300000км рассматривались в [1,2] в основном в контексте различных вариантов построения приемных систем дальнего ИК диапазона, потенциально способных приблизиться к фундаментальному пределу чувствительности. В предлагаемой работе обсуждается возможность создания лидарного комплекса на базе инфракрасного телескопа АЗТ-33-ИК (рис.1).



рис. 1. Инфракрасного телескопа АЗТ-33-ИК Саянская обсерватория ИСЗФ СО РАН

Рассматривается вариант оптической схемы такого лидара. На основе характеристик ИК лазера и телескопа, предлагаемых для использования в составе комплекса, приводится оценка ожидаемых параметров системы.

Интервал рабочих длин волн телескопа АЗТ-33-ИК составляет $0,3\text{мкм} \leq \lambda \leq 1,3\text{мкм}$. Однако измерения характеристик в области 10мкм показали, что двойное пленочное покрытие зеркала (Al/SiO_2) обеспечивает приемлемый коэффициент отражения зеркального объектива (рис.2) и в дальнем ИК диапазоне.

Предваряя рассмотрение предлагаемой оптической схемы, представим необходимые для дальнейших оценок параметров лидара «в целом» характеристики источника дальнего ИК излучения, в качестве которого предлагается использовать импульсный TEA CO_2 лазер (Transversely Excited Atmospheric, т.е. лазер с поперечной накачкой рабочего газа при атмосферном давлении [3]).

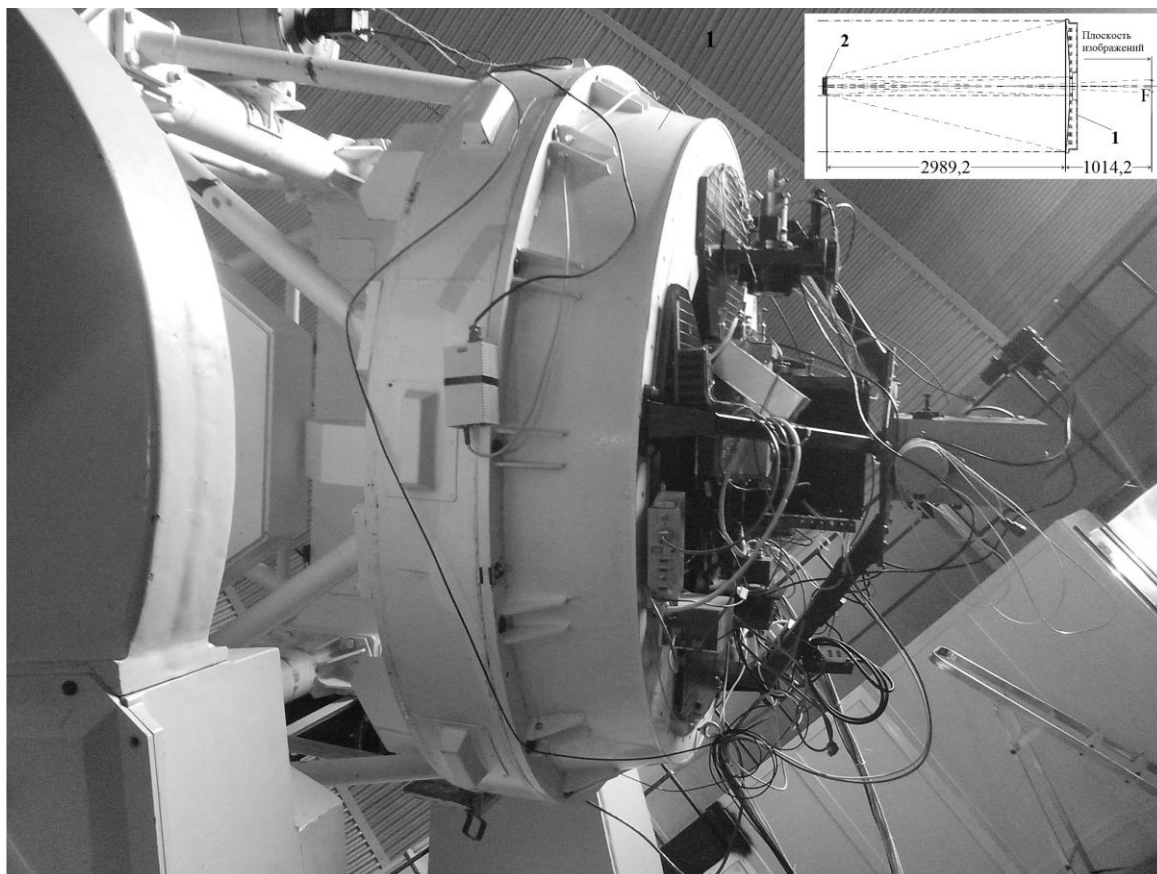


рис. 2. Параболическое зеркало телескопа АЗТ-33-ИК. На вкладки оптическая схема объектива ($F=30084\text{мм}$, относительное отверстие $1/20$). Обозначения: 1 – главное зеркало объектива (фокусирующее $f=3448,8\text{мм}$); 2 – вторичное зеркало (дефокусирующее $f=-518,4\text{мм}$)

Сравнительно высокое ($p \sim 1\text{атм}$) давление газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ позволяет получить в такой конструкции (рис.3) большую (1Дж и более) энергию в импульсе, что однако требует для обеспечения электрического пробоя высокой напряженности поля E , которое создается в разрядном промежутке между электродами, расположенными вдоль формируемого пучка (поле E поперечно пучку генерируемых фотонов).

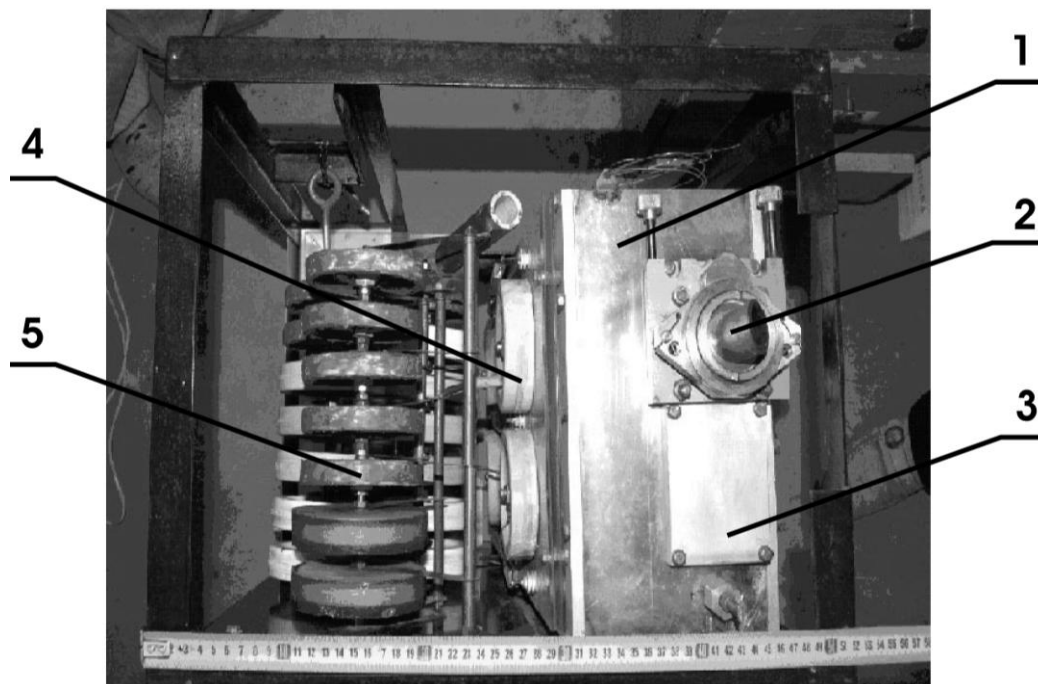


рис.3. Импульсный CO_2 лазер с поперечной накачкой. Обозначения: 1 - корпус лазера; 2 - окно для выхода излучения (призма с углом Брюстера из Ge или KCl и т.п.); 3 - система крепления и юстировки глухого зеркала резонатора; 4 - система предионизации разрядного промежутка (C_2 рис.4); 5 - скоростные конденсаторы основного разряда (C_1 рис.4)

Основной разряд в щелевом промежутке (конденсаторы C_1 рис.4) инициируется «равномерной» ультрафиолетовой предионизацией, которая обеспечивается пробоем гирлянды конденсаторов с игольчатыми электродами (C_2 рис.4). Предионизация начинается после подачи импульса на управляющий вход («поджиг») высоковольтного тиратрона, в результате чего тиратрон открывается и напряжение с высокой скоростью нарастания передается с конденсаторов C_1 в разрядный промежуток, а также на гирлянду C_2 , микропробои которой создают ультрафиолетовое излучение, необходимое для ионизации газа.

Типовые характеристики лазера подобной конструкции: энергия излучения ~ 1 Дж в импульсе; частота следования импульсов до 10 Гц; импульсная мощность 3 МВт; диаметр пучка 1 см; расходимость излучения близка к дифракционному пределу ($\sim 10^{-3}$ рад), форма импульса лазерной генерации показана на вкладке к рис.4.

Оптимизируя напряжение питания лазера, давления смеси (~ 1 атм) и соотношение парциальных составляющих можно изменять как общую энергию в импульсе, так и пиковую мощность, определяемую передним пиком. Для оценки мощности в пике для данной конструкции целесообразно взять цифру $\frac{1}{3}$ Дж при продолжительности пика ~ 100 нсек, что соответствует пиковой мощности $\sim 3 \times 10^6$ Вт. Подбирая оптимальное соотношение компонент смеси (уменьшая парциальное давление He, и добавляя незначительное количество H_2) можно также добиться устойчивой импульсно-периодической работы лазера (до 10 Гц).

Повышая давление смеси до ~ 2 -3 атм, и переводя лазер в режим активной синхронизации продольных мод [3], можно перевести лазер в пиковый режим (mode - locking). При этом пиковая мощность возрастет на порядок, а каждый импульс из цуга сократится до 1-2 нсек, что позволит на полтора порядка повысить точность определения временной задержки.

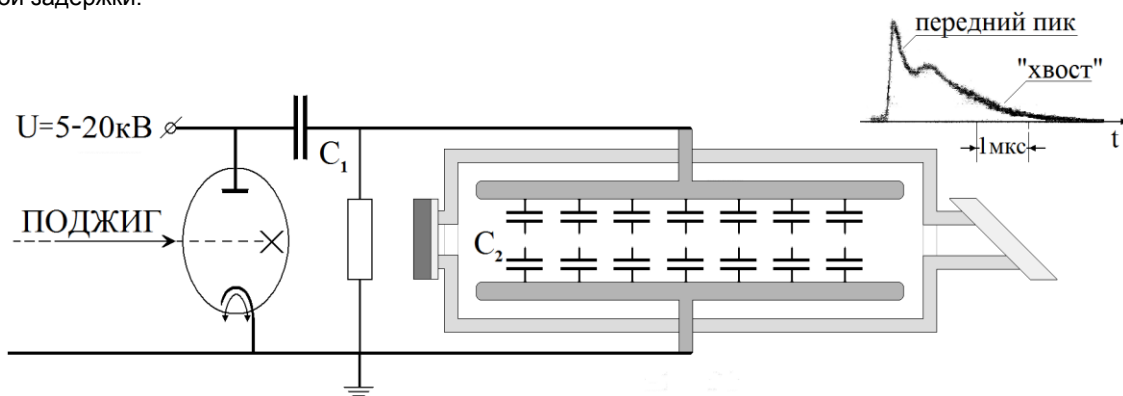


рис.4 Электрическая схема CO_2 TEA лазера. На вкладке показана характерная временная зависимость интенсивности генерируемого излучения [4]: около $\frac{1}{3}$ излучаемой энергии приходится на передний пик с крутым передним фронтом; «хвост» импульса, содержащий примерно $\frac{2}{3}$ всей энергии, определяется эффективностью передачи энергии возбуждения от N_2 молекулам CO_2 (уменьшая долю N_2 можно уменьшить и «хвост»)

Однако наличие современных электронных микросхем, способных производить запись выборки с временем единичной записи на уровне сотни пикосекунд делает, вообще говоря, необязательным переход используемого лазера в режим синхронизации мод. Определение задержки с точностью превышающей длительность лоцирующего импульса возможно осуществить, производя корреляционные измерения отраженного сигнала по отношению к временному профилю исходного импульса, записанного на старте процедуры.

Угловая направленность излучения, которая в идеале должна приближаться к дифракционному пределу, определяется в нашем случае, как особенностями резонатора, так и коэффициентом усиления на проход. Газоразрядный промежуток нашего лазера имеет размеры $40 \times 60 \times 700$ мм, поэтому для оптимального снятия инверсной заселенности внутри камеры установлены глухие зеркала так, что лазерный пучок дважды проходя через межэлектродный промежуток, весьма плотно его заполняет. Конфигурацию резонатора для получения направленности пучка близкой к дифракционной можно сделать либо линейной с неустойчивым резонатором, либо Т-образной. Радиус вогнутого зеркала для первого варианта ~ 20 м., $l \sim 1,5$ м. При числе Френеля ($N_F = d^2/8\lambda l$) порядка двойки эти схемы почти равноценны, но при больших значениях N_F (как показано в [5]) расходимость лазера в линейной схеме увеличивается, в то время как направленность излучения в Т-образном резонаторе улучшается почти вдвое при возрастании N_F до 10.

На рис.5 представлен вариант оптической схемы 10-микронного лидара на основе телескопа типа АЗТ-33-ИК. Импульс лазера фокусируется в плоскость изображения германиевой линзой $f \sim 20$ см. Излучение попадает на ось телескопа, отражаясь от зеркала, закрепленного на вращающемся основании. На момент прихода отраженного сигнала зеркало в данной точке отсутствует, а излучение собирается на площадку скоростного фотоприемника.

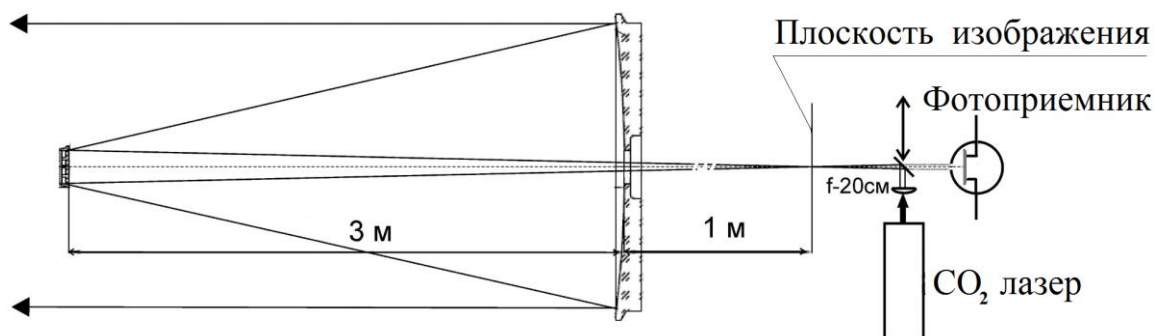


рис.5 Эскизный вариант оптической схемы 10-микронного лидара на базе телескопа типа АЗТ-33-ИК

Необходимо заполнить апертуру телескопа, согласуя относительное отверстие телескопа - 1:20 с лазером, т.е. фокусируя сантиметровый лазерный пучок 20 см линзой в плоскость изображений. При этом пучок будет полностью заполнять 20 см зеркало телескопа, и не представляет какой либо опасности с точки зрения пробоя оптики. Попадая на большое зеркало телескопа ($D \approx 1,5$ м) излучение будет также плотно его заполнять. Интенсивность же в фокусе 20 см линзы будет $\sim W/(\lambda^2 \theta^2)$, что составляет $\sim 5 \times 10^9$ Вт/см², что немного меньше порога пробоя воздуха.

Оценим ослабление лазерного импульса предельного дифракционного качества, выходящего из телескопа с диаметром D (рис.6) и имеющего вследствие дифракционной расходимости в области удаленного объекта диаметр пятна $\lambda/D \cdot L$.

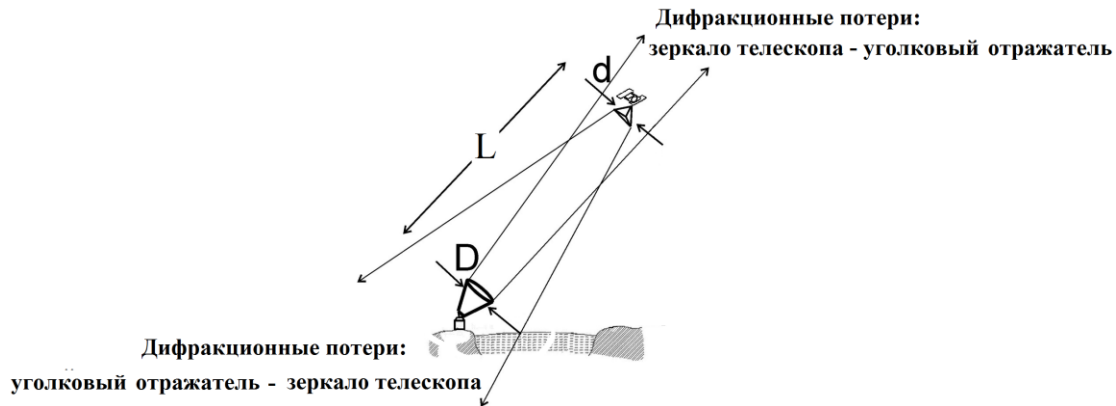


рис.6 Иллюстрация, показывающая, как вследствие конечной дифракционной расходимости пучка возникают дифракционные потери мощности сигнала, отраженного от лоцируемого объекта

При эффективном размере уголкового отражателя - d, потери (определяемые излучением, не попадающим в апертуру уголкового отражателя) составят $\left(\frac{\lambda}{d D} L\right)^2$. На обратном проходе, несмотря на то, что дифрагировать отраженный пучок будет сильнее, потери будут такими же. Таким образом, потери на дифракцию составят $\left(\frac{\lambda}{d D} L\right)^4$.

И на расстоянии в 300000 км мощность принимаемого сигнала будет $\sim 5 \times 10^{-16}$ от падающей, что в нашем случае будет $\sim 10^{-9}$ Вт.

Для оценки теплового шума, создаваемого на детекторе фоновым излучением большого зеркала, условно разобьем всю его площадь $\pi D^2/4$ на идеально отражающую часть $K \pi D^2/4$ и «абсолютно черный» остаток $(1-K) \pi D^2/4$, где K – коэффициент отражения зеркала, $D=1,5$ м. Тогда тепловая мощность, излучаемая этим остатком, определяется планковским распределением в спектральном интервале $\Delta \omega \approx 2\pi/\tau \approx 6,28/10^{-9}$ сек $= 6,28 \times 10^9$ сек⁻¹, отвечающем длительности лоцирующего импульса τ , т.е.

$$(1-K) \frac{\pi D^2}{4} \times \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \int_{\Delta \omega} \frac{\omega^3}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1} d\omega \approx (1-K) \frac{\pi D^2}{4} \times \frac{15}{\pi^4} \sigma T^4 \frac{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}}}{1 - e^{\frac{\hbar \omega}{kT}}} \frac{\hbar}{kT} \Delta \omega, \quad \text{где} \quad \sigma \approx 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \text{К}^4),$$

$$\frac{\hbar \omega}{kT} = \frac{2\pi \hbar c / \lambda}{kT} = \frac{2\pi \hbar c / (10 \text{ мкм})}{k(300 \text{ К})} \approx 3. \quad \text{Эта мощность высвечивается в телесный угол } 2\pi \text{ из которого на}$$

чувствительную площадку детектора s_{det} попадает примерно $\frac{s_{\text{det}}}{2\pi(2l_1 + l_2)^2}$ ее часть ($l_1=3$ м $l_2=1$ м рис.5). В итоге

мощность теплового шума, попадающего на детектор оценивается по формуле

$$(1-K) \frac{\pi D^2}{4} \times \frac{15}{\pi^4} \sigma T^4 \frac{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}}}{1 - e^{\frac{\hbar \omega}{kT}}} \frac{\hbar}{kT} \Delta \omega \frac{s_{\text{det}}}{2\pi(2l_1 + l_2)^2} \approx 10^{-4} (1-K) s_{\text{det}}, \quad \text{позволяющей сопоставить этот фон с мощностью}$$

отраженного сигнала $\sim 10^{-9}$ Вт. Такое сопоставление $10^{-9} > 10^{-4} (1-K) s_{\text{det}}$ задает ограничение площадь рабочей поверхности детектора $s_{\text{det}} < (1-K)^{-1} 10^{-5} \text{ м}^2 \approx (1-K)^{-1} 3 \times 3 \text{ мм}^2$.

Завершая описание схемы лидара, кратко остановимся на оценках требуемых параметров фотоприёмного элемента. Вследствие дифракционных потерь из исходной энергии лазерного импульса 0,3 Дж до приемника дойдет $\sim 1,5 \times 10^{-16}$ Дж или примерно 10^4 штук 10-микронных фотонов. Средняя мощность отраженного сигнала в соответствии с предыдущими оценками составит $\langle P \rangle \approx 10^{-9}$ Вт. Однако, чтобы принять такой импульс, не ухудшая разрешение системы по дальности, необходимо работать в широкой полосе частот $\delta f \geq 1/r = 1 \text{ ГГц}$, что требует обеспечения у приемника чувствительности на уровне хотя бы $\langle P \rangle / \sqrt{\delta f} = 3 \times 10^{-14} \text{ Вм}/\sqrt{\text{Гц}}$ в режиме квадратичного детектирования.

Стандартные полупроводниковые фотодетекторы на основе CdHgTe [6], используемые в дальнем ИК диапазоне, обеспечивают при охлаждении до азотных температур NEP (Noise Equivalent Power [7]) на уровне $10^{-13} \text{ Вм}/\sqrt{\text{Гц}}$, что «в разы не дотягивает» до приемлемого уровня. Поиск замены традиционных КРТ более чувствительными приемниками составляет основное содержание исследовательских работ авторской группы [1,2] (в частности рассматриваются варианты детектирования в однофотонном режиме приемлемые для дальнего ИК диапазона).

В заключении следует признать, что применение телескопа в качестве локационной антенны, вообще говоря, не является примером высокой эффективности использования уникальных приборов. Телескоп - прибор существенно

более сложный и дорогой по сравнению с антенной лидара, которая должна лишь фиксировать наличие объекта, в то время как телескоп рассчитан на воспроизведение его изображения с минимальными по возможности искажениями. Однако на стадии разработки космических лидаров использование телескопа, с его не только высококлассной оптикой, но и отработанной прецизионной механикой слежения и наведения, представляется вполне оправданным. В наше время, увы, сказывается и такой фактор, как не высокая степень востребованности фундаментальных исследований, в то время как создание всепогодного лидара дальнего ИК диапазона имеет очевидное прикладное (включая и оборонное [8]) значение. И, тем не менее, наряду с лидаром рассмотрим, что может дать вариант использования телескопа «по его прямому назначению» совместно с импульсным CO₂ лазером. Изображение небольших объектов (в том числе представляющих астероидную опасность) на тысячи километровых расстояниях (в отличие от звезд) можно фиксировать, лишь когда они выходят из тени Земли. Для фотографирования таких темных и, как правило, холодных тел необходима внешняя подсветка. Роль такой наземно-космической фотовспышки может сыграть импульсный МегаВаттный лазер, причем генерация в 10мкм диапазоне даже в случае случайного попадания в ИСЗ не вызовет сбой оптических систем спутника, ибо стекло не пропускает 10мкм излучение.

Оценим возможности цифровой записи изображений 10-метровых объектов удаленных от Земли на $L=1000\text{км}$ с использованием импульсной лазерной подсветки в диапазоне $\lambda=10\text{мкм}$. Дифракционная расходимость пучка при выводе лазерного импульса в космическое пространство через телескоп типа АЗТ-33-ИК обеспечивается на уровне $\lambda/D \approx 10^{-5}\text{рад}$. Такая расходимость позволяет осветить 10 или более метровый объект на 1000-километровой дальности, передав всю энергию импульса. Отраженное от объекта излучение «разлетится» в телесный угол 2π , вследствие чего из всей импульсной мощности 3МВт в зеркало телескопа вернется $(\pi D^2)/(2\pi L^2) = 2,5 \times 10^{-13}$ его часть и в итоге от 3МВт останется примерно 1мкВт. Если «этот микроВатт» разделить на миллион (1000×1000) пиксел фоточувствительной матрицы, то на отдельный элемент будет попадать 1пикоВатт. Если матрица построена из охлаждаемых КРТ элементов с NEP на уровне $10^{-13}\text{Вт/}\sqrt{\text{Гц}}$, то это позволит вести съемку с частотой 10Гц, что как раз соответствует оптимальной частоте следования импульсов CO₂ ТЕА лазера.

Фотографии инфракрасного телескопа АЗТ-33-ИК и его оптическая схема были любезно предоставлены сотрудниками Саянской обсерватория Института солнечно-земной физики СО РАН В.И.Терговым и М.В. Еселевичем.

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ, проект № 13-08-01190.

Литература

1. Буйкас В.И., Жерихина Л.Н., Цховребов А.М. Способ высокоточного определения положения космического телескопа. Труды международной конференции CAD/CAM/PDM-2012 <http://lab18.ipu.ru/projects/conf2012/contentst.htm>.
2. Дресвянников М.А., Ерохин А.И., Цховребов А.М., Жерихина Л.Н., Приймаченко В.В. Приемники космической локации в диапазоне $\lambda=10\text{мкм}$. Труды 7-ой Всероссийской конференции Необратимые процессы в природе и техники, часть 3, с.51-54 (2013).
3. Звелто О. Принципы лазеров. Москва: «Лань» (2008).
4. Bhadani P.K., Harrison R.G. Efficient long pulse TE-CO₂ laser using magnetic-spiker sustainer excitation. Rev. Sci. Instrum. 63, 5543 (1992).
5. Кузнецов М.Н., Куликов О.Л. Выделение продольной и поперечной мод в широкоапертурном лазере с многозеркальным резонатором, Квантовая электроника, 1991, 18 (9), 1114–1117.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов (книга 2). Москва: «Мир» (1984).
7. Робинсон Ф.Н. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях. Москва: «Атомиздат» (1980).
8. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. Инфракрасные лазерные локационные системы. Москва: «Воениздат» (1987).