

ВОЗДЕЙСТВИЕ КИТАЙСКИХ ЛАЗЕРНЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ НА ФОТОСПУТНИКИ

Юсаф Батт

Спутниковая лазерная дальнометрия (СЛД) – широко используемая методика для определения орбит космических объектов с высокой точностью. Имеются, по меньшей мере, 40 СЛД-станций, расположенных в 23 странах. Эти станции входят в международную научную организацию – Международную службу лазерных дальномеров, находящуюся в Годдардовском центре космических полетов (Мэриленд, США), которая собирает, объединяет, анализирует и распространяет данные.

В Китае находится семь известных станций лазерной дальнометрии. Средняя мощность лазера, используемая на большинстве китайских станций, составляет меньше 1 Вт, хотя использовались экспериментальные системы с мощностью около 40 Вт для получения сведений о космическом мусоре.

В этой статье дается описание возможного воздействия СЛД на фотоспутники, наблюдающие за Землей. Она констатирует, что хотя существуют обстоятельства, которые приведут к постоянным повреждениям, в большинстве случаев СЛД будет обладать малой вероятностью постоянных повреждений чувствительным оптическим датчикам (детекторам) спутника. Из-за малой вероятности повреждений лазерные дальнометры оказываются неэффективным противоспутниковым оружием. Тем не менее, возможность даже некоторых повреждений оправдывает разработку международных правил по отношению к СЛД.

Автор статьи – сотрудник Программы Глобальной Безопасности, Союз Обеспокоенных Ученых (Массачусетс, США) и Отдел астрофизики высоких энергий, Смитсоновский центр астрофизики, Кембридж, Массачусетс, США.

Статья получена редакцией 8 мая 2007 года и принята к публикации 16 марта 2008 года.

Автор благодарен Дэвиду Райту, Грегори Кулацки и Лауре Грего из Союза обеспокоенных ученых за полезные обсуждения и информацию.

Почтовый адрес для корреспонденции: Yousaf Butt, High Energy Astrophysics Division, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, MS-70, 60 Garden St., Cambridge, MA 62138.

Электронный адрес: [ybatt2002@yahoo.com](mailto:ybutt2002@yahoo.com)

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковая лазерная дальнометрия (СЛД) – это точный метод для определения орбиты спутника, имеющий также научную ценность в ряде задач, в основном, для геодезии Земли и Луны¹. Например, СЛД оказалась полезным инструментом при определении земного гравитационного поля и обнаружении движения тектонических плит. Принцип, лежащий в основе СЛД, заключается в прецизионном определении положения спутника путем измерения расстояния от наземной станции до спутника на основе знания времени, в течение которого ультракороткий лазерный импульс выстреливается с наземной станции, достигает спутника и отражается от него обратно. Этот процесс и называют “измерением дальности” до спутника. Если объединить измерения нескольких синхронизованных во времени станций, расположенных по всему земному шару, то орбиту спутника можно определить с точностью до долей сантиметра.

Начиная с сентября 2006 года, стали появляться сообщения, что во многих случаях Китай нацеливал наземные лазеры на спутники США. Появилось мало подробностей, и это привело к спекуляциям и недоразумениям по поводу того, что произошло на самом деле. Кое-кто утверждал, что эти случаи были фактами подтверждения испытаний Китаем своего лазерного противоспутникового оружия. В частности, появившаяся в американской газете “Дифенс Ньюс” история утверждала, что Китай недавно “обстрелял лазерами большой мощности американский спутник-шпион, пролетавший над территорией Китая, а это эксперты расценивают как испытание китайской возможности ослеплять космические аппараты”².

Вскоре после появления этого сообщения “Дифенс Ньюс” один из сотрудников командо-

вания функциональными компонентами объединенной системы ПРО утверждал на конференции по стратегической обороне и космосу (октябрь 2006 года), что такие случаи также наблюдались, скорее всего, по данным, поступившим в Национальное разведывательное управление. В них говорилось о том, что работавшие с американскими спутниками операторы отметили в ряде случаев отказы в работе спутников при пролете над Китаем³. Этот же сотрудник утверждал, что такие же аномалии были обнаружены также датчиками слежения за спутниками на испытательном полигоне имени Рейгана (атолл Кваджалейн): “Мы заметили проекцию пучков на фоне космического аппарата и смогли отождествить поток фотонов”. Как сообщил английский военный еженедельник “Джейн”, тот же сотрудник утверждал, что это было свидетельством китайской лазерной системы противомер.

Однако Доналд Керр – директор пентагоновского разведывательного управления, узнав о случившемся, сказал, что “это не создало материального ущерба возможностям спутников США собирать информацию”⁴. Кроме того, генерал Джеймс Картрайт, который руководил в то время американскими военными операциями в космосе, заявил, что США не заметили четких указаний на намеренные нарушения возможностей спутников США со стороны Китая⁵.

Детали, ставшие доступными общественности, были недостаточными для определения того, что произошло в действительности. Одна теория состоит в том, что Китай проводил испытания лазерного оружия, предназначенного для разрушения спутников. Однако, существуют другие причины для подсветки спутников при помощи лазеров и в этой статье мы представляем анализ другой возможности – лазерной дальнометрии для определения орбит спутников, которая кажется совместимой с заявлениями Керра и Картрайта, но не является свидетельством наличия лазерного противоспутникового оружия. Более того, на основе нашего анализа мы предлагаем путь для определения того, подходят ли использованные лазеры для определения дальности или для лазерного противоспутникового оружия.

ВОЗМОЖНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ В КИТАЕ

Всемирная сеть станций лазерной дальнометрии является частью Международной службы спутниковой лазерной дальнометрии⁶ (МССЛД), находящейся в Центре космических полетов имени Годдарда (Гринбелт, Мэриленд, США). МССЛД собирает, согласует, анализирует и распространяет информацию СЛД от 40 станций, расположенных в 23 странах (Рис.1). Эти станции СЛД следят примерно за 31 спутниками, принимающими участие в геодезических, навигационных и инженерных программах, а также в программах дистанционного зондирования.

В этой статье обсуждаются два класса спутников – сотрудничающих и не сотрудничающих. Сотрудничающие спутники оснащены пассивными отражательными зеркалами, обеспечивающими сильные отраженные сигналы. Не сотрудничающие спутники не имеют таких отражательных зеркал, что приводит к гораздо более слабым отраженным лазерным импульсам.

МССЛД в первую очередь следит за сотрудничающими спутниками. В Китае имеется семь станций СЛД, которые входят в МССЛД. Эти семь станций заняты геодезическими исследованиями с использованием импульсных лазеров, имеющих среднюю мощность примерно 1 Вт. Пять стационарных станций находятся в Шанхае, Чанчуне, Пекине, Ухане и Кунмине (Рис.2). Имеются, по крайней мере, две работающие мобильные станции. В течение 2000-2001 годов эти мобильные станции были развернуты в Западном Китае (Лхаса, Тибет и Урумчи, Синьцзян⁷). Одна мобильная станция может быть расположена к северо-востоку от Чанчуна вблизи границы с Северной Кореей и города Тонга (Tonghua)⁸.

Хотя станции СЛД обычно измеряют расстояния до сотрудничающих спутников, станция в Шанхае имеет возможность определять расстояние до орбитального мусора на экспериментальной основе. В конце 2005 года в рамках совместных усилий двух стран Китай установил станцию СЛД, сходную по конструкции с остальными китайскими стационарными станциями в Сан-Хуане, Аргентина⁹. Авторы не уверены в наличии других новых станций, которые могли бы управляться, например, китайскими военными.

ДНЕВНЫЕ И НОЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ СЛД

Проведение СЛД в дневное время сложнее, чем ночью, поскольку более яркий фон неба днем увеличивает трудности детектирования слабого возвратного сигнала, отраженного спутником. Впрочем, сбор данных СЛД в течение дня (как и ночью) способствует лучшему определению орбиты спутника. Фильтры длин волн и электронные “окна дальности” на спутнике могут заметно подавить шумы неба, а последующая обработка позволяет отсеять фотоны истинно отраженного лазерного сигнала от фотонов случайного фона. Дневная операция СЛД не требует более мощного лазера из-за этих технологий фильтрования и методики последующей обработки. Многие станции МССЛД регулярно следят за сотрудничающими спутниками в дневное время (См. Рис.3).

Шанхайская астрофизическая обсерватория стала первой в Китае, использовавшей возможности СЛД в дневное время с 1996 года, но дневное слежение, как сообщалось, было приостановлено с 2001 года. Недавно чанчунская обсерватория в северо-восточном Китае¹¹ вблизи Северной Кореи приобрела возможности дневной СЛД¹²⁻¹⁴. Сообщалось, что СЛД-станция в Кунмине готовится к дневной СЛД.

Определение дальности до не сотрудничающего спутника может оказаться полезным для слежения за космическими объектами (например, за орбитами разведывательных спутников, пролетающих над головой) и создания их каталога.

Неизвестно, будет ли какая-нибудь из китайских станций СЛД регулярно измерять расстояние до не сотрудничающих спутников. Шанхайская станция имеет возможность собирать информацию о космическом мусоре на экспериментальной установке с использованием пульсирующего лазера, имеющего среднюю мощность 40 Вт. Возможно, что аналогичные лазеры сейчас уже работают на других китайских площадках СЛД и могут оказаться эффективным методом получения орбитальной информации о больших спутниках на низких околоземных орбитах¹⁵.



Рис. 1: Международная сеть СЛД в 2005 году (по материалам встречи руководящего Совета МССЛД в Вене, Австрия апрель 2006 года). Смотрите также <http://www.gfsc.nasa.gov/docs/gbinfo060407.pdf> (март 2009). В левом нижнем углу помещена расшифровка обозначений. Сверху вниз: - Система МССЛД в 2005 году; Операционная система на четвертый квартал 2005 года; Расположенная рядом приемная станция Глобальной навигационной спутниковой системы (Глонасс), Новая система МССЛД в 2006 году; Системы МССЛД, не дающие вклад с 2006 года; Перспективные лазерные системы; Мобильные системы FTLRS (Франция) и TROS (Китай).

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРОВ НА ФОТОСПУТНИКИ, НАХОДЯЩИЕСЯ НА НИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ

Если бы лазеры, похожие на те, которые используются на китайских станциях СЛД, были использованы для определения дальности до фотоспутников, получающих снимки земной поверхности с низких орбит, а операторы СЛД были осторожны, чтобы избежать определения дальности, когда спутники находятся над головой (то- есть, вблизи зенита, когда его детекторы могут увидеть лазер), это будет практически безопасно, хотя потенциально может быть замечено. Если же операторы СЛД оказались бы не осторожными и определяли расстояние до фотоспутника, когда тот близок к зениту, то примерно был бы шанс 1:1000 для того, чтобы нанести некоторые повреждения фильтрам, покрывающим датчики, или, возможно, небольшой части самого датчика, если участок земной поверхности, который видит спутник, когда он пролетает через зенит, содержит сам лазер. (Этр также предполагает, что на спутнике нет задвижки или других систем, защищающих детектор от света большой интенсивности.) Мощность 1 и 40 Вт систем СЛД слишком мала, чтобы нанести повреждение спутнику посредством эффектов нагревания или вызвать физические повреждения компонентам, отличным от чувствительного оптического датчика.

Исследователи и операторы СЛД в Китае знают об этих опасениях и, похоже, следуют установленным операционным правилам, чтобы избежать появления потенциально опасного освещения¹⁸.

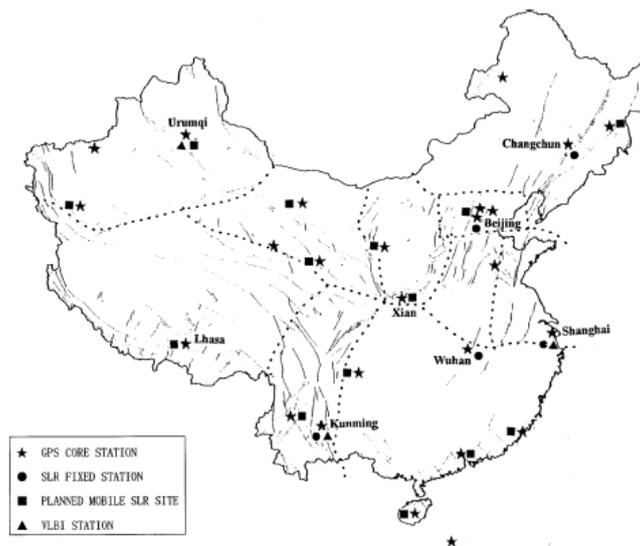


Рис.2: Распределение фиксированных китайских станций лазерной дальнометрии и планируемых мобильных площадок (Смотрите годовой отчет МССЛД за 1999 год, раздел 4, 116, <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/reports/ilrsar/1999/ilrsar99.section4.pdf>, Обозначения в левом нижнем углу: Станции Глонасс. Фиксированные станции СЛД. Планируемые мобильные площадки СЛД. Станции сети интерферометрии с большой базой.

Известные китайские станции службы СЛД не должны рассматриваться в качестве противоспутникового оружия из-за малой вероятности гарантированного повреждения оптического датчика фотоспутника при съемке им Земли. Однако, даже малейшая вероятность повреждения датчика при незаявленном или неверном измерении выдвигает аргументы в пользу разработки международных правил, охватывающих применение лазерной дальнометрии к спутникам, например, запрещение несанкционированного облучения спутника или разрешение облучения только после прохода спутником местного зенита (например, на 30° или более).

РАСПОЛОЖЕНИЕ И СПЕЦИФИКАЦИЯ КИТАЙСКИХ СТАНЦИЙ СЛД

Обычно на китайских станциях СЛД применяются твердотельные гранатовые (Nd: YAG) импульсные лазеры, генерирующие зеленую линию с длиной волны 0.532 мкм при длительности импульса 200 пс (200×10^{-12} с). Энергия лазера в импульсе составляет 0.1 Дж, а возможная частота повторения равна 1, 2, 4, 5, 8 и 10 Гц (число импульсов в секунду), что соответствует максимальной средней мощности 1 Вт (при максимальной частоте 10 Гц). На практике применяются частоты повторения от 4 до 8 Гц¹⁷. Апертура передающего и принимающего телескопов составляет 15 см и 60 см, соответственно. Лазеры на станции в Чанчуне работают с такими параметрами. Лазеры на других китайских фиксированных площадках СЛД аналогичны по конструкции. Китайские системы СЛД сейчас работают с одним импульсом за время прохождения между Землей и спутником. Системы с более высокой частотой повторения более сложны, поскольку при этом много импульсов проходят в одно время между земной поверхностью и спутником, что делает необходимой сложную методику для корреляции посылаемых и получаемых импульсов для определения истинного времени пролета.

Астрономическая обсерватория в Шанхае экспериментирует с лазером, имеющим более высокую мощность, но работающим на той же длине волны и выдающим импульсы с энергией 2 Дж длительностью 10 нс с частотой повторения 20 Гц, что соответствует средней мощности 40 Вт. Этот экспериментальный лазер фокусируется с помощью телескопа с апертурой 21 см и, как сообщают, применяется для измерения расстояния до космического мусора¹⁸. Сообщается, что аналогичная система на горе Стромло в Австралии следит за обломками мусора размером 15 см, находящимися на высоте 1250 км¹⁹. Лазер с такими параметрами и мощностью 40 Вт способен определять расстояние до не сотрудничающих спутников в зависимости от их размера и высоты орбиты.

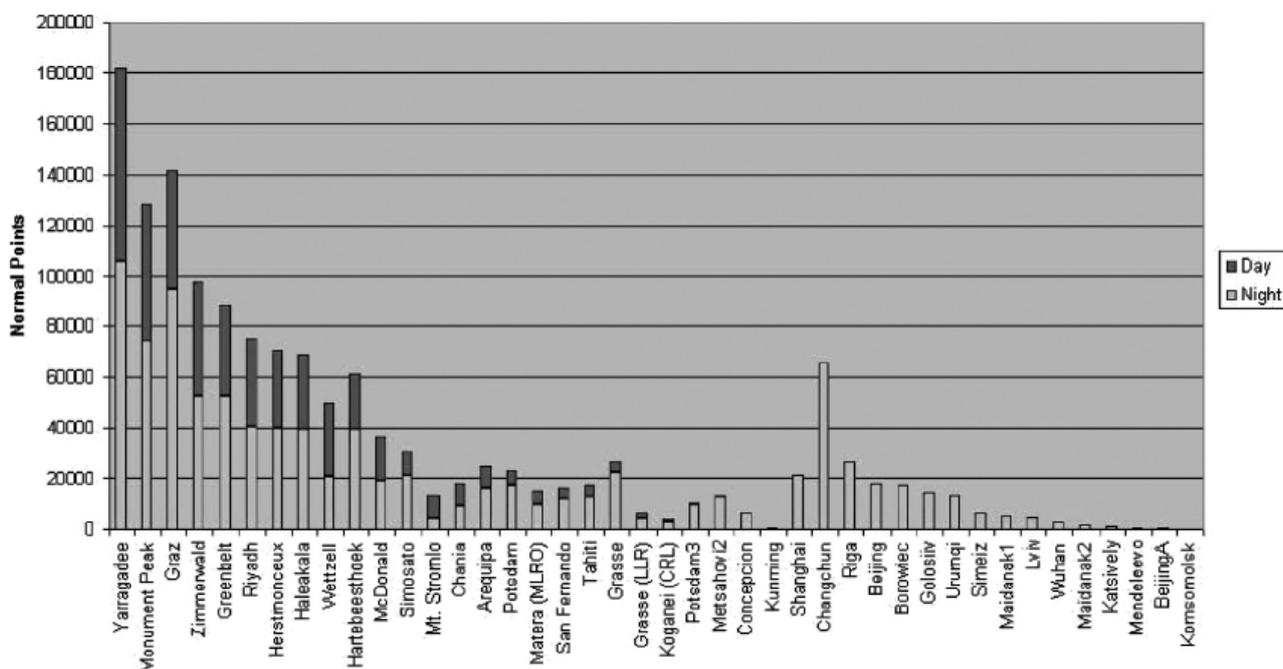


Рисунок 3: Дневная и ночная возможности СЛД для станций МСЛД по всему миру. Данные по оси Y – усредненное количество точек (в интервале около двух минут). По оси X отложены слева направо названия отдельных станций.

Лазеры на подвижных станциях, как сообщается, имеют среднюю максимальную мощность около 0.4 Вт²⁰ с 15-40 мДж в импульсе и частотой повторения 10 Гц.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРОВ МОЩНОСТЬЮ 1 И 40 ВТ НА ФОТОСПУТНИКИ

Фотоспутники, имеющие высокое разрешение, движутся по орбитам с высотой 1000 км или меньше и имеют скорость около 7 км/с относительно поверхности Земли. Станция СЛД

может видеть спутник примерно в течение 15 минут при каждом прохождении по орбите. Большинство фотоспутников, снимающих поверхность Земли, применяют оптические датчики (линейные детекторы) для получения своих снимков с помощью метода “веника” (Рис. 5)²¹. Датчики содержат наборы светочувствительных элементов (пикселей), измеряющих свет при разных длинах волн. По мере того, как спутник движется по орбите над Землей, датчики накапливают наборы линейных изображений, которые комбинируются для создания двухмерного цветного изображения методом, сходным с работой настольного сканнера.

Большинство датчиков покрываются фильтрами, позволяющими пропускать только конкретный диапазон частот видимого света к датчикам. Узкополосные фильтры позволяют накопить только ограниченный набор частот, например, только красную часть спектра.

Телескоп спутника собирает свет от поверхности и фокусирует его на датчик. Он имеет полное поле зрения около одного градуса, что соответствует примерно 10 км на поверхности Земли. (Рис. 6). Это поле зрения движется по поверхности примерно со скоростью 7 км/с, получая изображение тонкого слоя поверхности по мере движения, используя примерно 10000 пикселей набора линейного детектора. Каждый пиксель соответствует примерно метровому участку поверхности. Пятно на поверхности останется в поле зрения телескопа примерно на 1.5 секунды, если оно пройдет через центр поля зрения, даже хотя его изображение будет зафиксировано полоской датчика за 10^{-4} с. Наземный лазер, принадлежащий станции СЛД, может освещать спутник на низкой орбите в течении 15 минут, пока тот остается в поле зрения станции.

В качестве примера рассмотрим бортовой фотоаппарат “Геодезический глаз” на спутнике IKONOS, имеющий разрешение около метра. Его зрительный датчик содержит массив из 13500 пикселей и рассматривает полосу на поверхности Земли шириной 10 км и длиной свыше одного метра в направлении движения²². При скорости 7 км/с один метр проходится примерно за 10^{-4} с.

Когда наземный лазер готовится к наблюдению с Земли за спутником, он может встретиться с одним из нескольких случаев, которые приводятся ниже в порядке суровости последствий.

- a) Если лазерное пятно не попадает в поле зрения телескопа спутника, то небольшая часть лазерного импульса может попасть на чувствительный датчик спутника и имеет возможность рассеяться в оптику телескопа. Это небольшое количество света может привести к незначительным изменениям в уровне фонового шума, что потенциально может быть замечено операторами спутника²³. Если фильтр эффективно подавляет частоту повторения лазерного сигнала, то такие эффекты могут быть ослаблены или полностью устранены.
- b) Если в поле зрения телескопа спутника, смотрящего на участок поверхности, где находится лазер, освещающий спутник, но изображение лазера не попадает на линейный детектор (см. Рис.6), то еще имеется вероятность попадания из-за дифракции небольшой доли лазерного света в детектор²⁴. Для лазера малой мощности, если этот свет пройдет через фильтр, это даст эффект только в области повышенной яркости в восстановленном изображении. Но если лазерный источник обладает достаточной мощностью, то лазерный свет, который в результате дифракции попадает на детектор, может оказаться достаточно сильным, чтобы подавить свет, собранный с участка поверхности, находящегося вокруг лазера, и исказить отображение этого небольшого участка, но не повредить детектор. Это называется “частичным ослеплением”, которое оказывается временным и обратимым повреждением. Частичное ослепление происходит на небольшом участке вблизи источника лазерного света в течение всего нескольких секунд, пока лазер находится в поле зрения телескопа – оно не делает более слабыми удаленные изображения. Более детальное описание частичного ослепления можно найти в Приложении.
- c) Когда линейный детектор спутника наблюдает за пятном поверхности, где расположен лазер, тогда яркое изображение лазера сфокусируется на детекторе (считается, что лазер в это время пульсирует). Такое происходит только в течение очень короткого промежутка времени (примерно 10^{-4} секунды), в течение которого детектор спутника непосредственно видит участок поверхности, содержащий лазер (см. Рис.6). В этом случае воздействие на спутник будет зависеть от мощности лазера. Предположим, что фильтр прозрачен для лазерного света и мощность лазера достаточно мала. Тогда это приведет

только к яркому пятну на изображении земной поверхности. При более высокой мощности лазерный свет может оказаться достаточно сильным, чтобы подавить свет, отражаемый от поверхности, и повредить изображение небольшого участка вокруг лазера, но не повредить пиксели. Как и в разделе (б) выше, этот случай называется частичным ослеплением, а оно носит временный и обратимый характер. Если закрывающий детектор фильтр не пропускает волны лазерного света, то он задерживает этот свет от попадания на пиксели детектора и частичного ослепления не происходит. Если мощность лазера достаточно высока, а покрывающий детекторы тонкий фильтр не пропускает лазерный свет, лазер может постоянно наносить повреждения фильтру. Если же, наоборот, фильтр пропускает лазерный свет, то небольшое количество пикселей вокруг места изображения лазера может претерпевать постоянное повреждение^{26,27}. В этом случае затронутые пиксели постоянно останутся "ослепленными". При рассматриваемых в статье мощностях лазера могут оказаться поврежденными всего немного пикселей. Как отмечалось, для импульсного лазера, работающего с низкой частотой повторения (как и в нашем случае), очень малы шансы, чтобы лазерный импульс появился как раз тогда, когда он может повредить детектор.

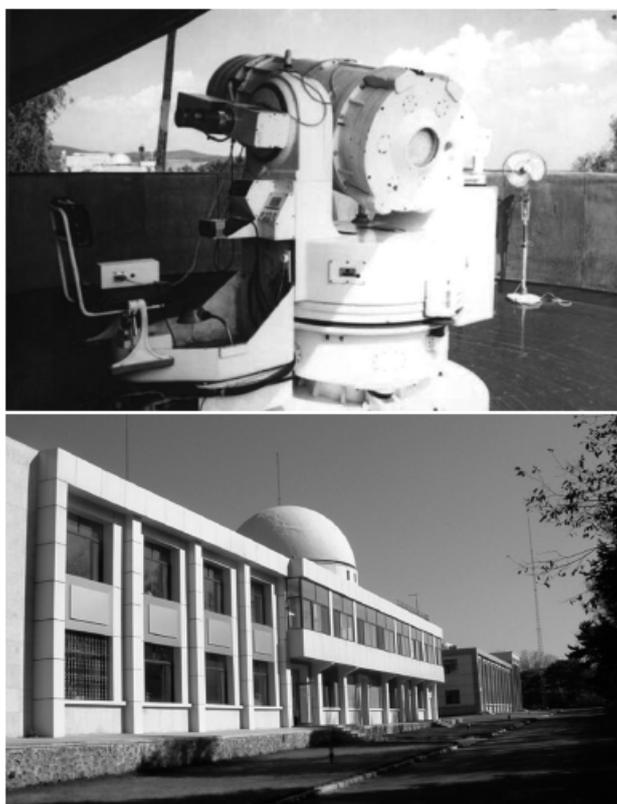


Рисунок 4; Станция в Чанчуне. Отчетный доклад МССЛД за 1999 год, раздел 4, сообщение 118. <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/reports/ilrs.reports/ilsar/1999/ilrsar99.section4.pdf> (март 2009). Более детальную информацию можно найти в <http://www.cho.ac.cn/> (март 2009).

Хотя нет сообщений о том, что китайские станции СЛД освещают не сотрудничающие космические объекты (не считая космического мусора), имеет смысл оценить потенциал частичного или полного ослепления импульсными лазерами.

Если импульсный лазер с частотой повторения 10 Гц и мощностью в импульсе 0.1 Дж измеряет расстояние до фотоспутника, когда лазер находится в поле зрения телескопа, а датчик не имеет фильтра, то датчик будет ослепляться при каждом импульсе. Изображение будет искажено примерно на расстоянии 10 км от лазера (См. Приложение). Если спутник с полем зрения 1 градус проходит над лазером, то лазер будет оставаться в поле зрения до двух секунд. Для импульсного лазера с частотой повторения 10 Гц, если он будет находиться в поле зрения 1.5 секунд, телескоп получит 15 импульсов. Следовательно, это приведет к 15 случаям ослепленных пикселей, расположенных между 15000 линейными изображения-

ми, которые накопит детектор и которые будут использованы для построения наземного изображения, мало отличающегося от действительного, Предполагается, что фильтры прозрачны для данной частоты лазерного света. Если это не так, то ослепление окажется менее серьезным или, может быть, не будет заметным.

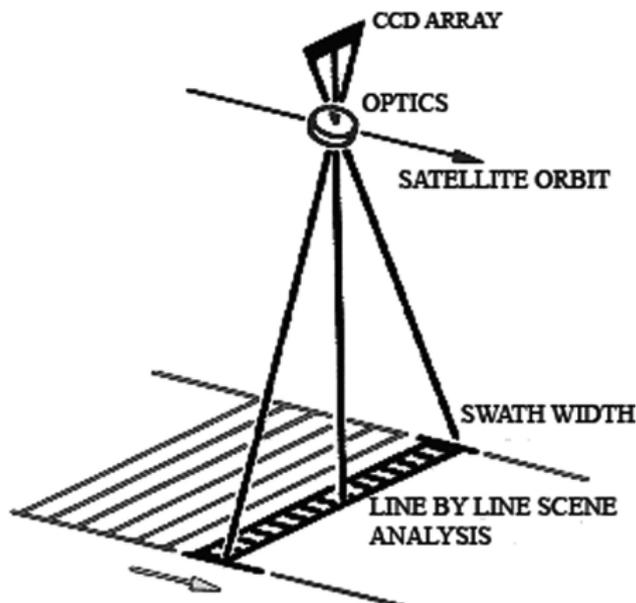


Рисунок 5: Иллюстрация метода “веника” при фотографировании спутника. Надписи на рисунке (сверху вниз): Набор устройств с зарядовой связью. Оптика. Орбита спутника. Ширина сканирования. Анализ изображения последовательным способом (линия за линией).

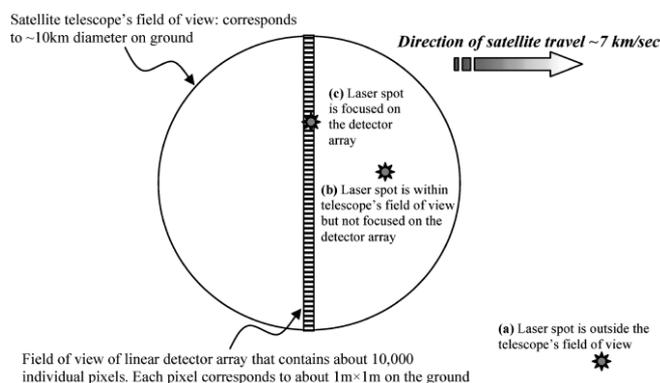


Рисунок 6: Схематичное поле зрения телескопа фотоспутника и линейки детектора, регистрирующей сигнал с Земли. В тексте рассматриваются три положения лазера, направленного на спутник, которые представлены на рисунке. *Надписи на рисунке:* - Вверху слева: Поле зрения телескопа спутника соответствует пятну диаметром около 10 км на поверхности Земли. - Вверху справа: Направление движения спутника, примерно 7 км/с. - В центре: (с) Лазерное пятно сфокусировано на линейку детектора. (b) Лазерное пятно находится в поле зрения телескопа, но не сфокусировано на линейку детектора. - Внизу слева: Поле зрения линейки детектора, содержащей около 10000 пикселей. Каждый пиксель соответствует участку поверхности размером 1 м x 1 м. - Внизу справа: (a) Лазерное пятно находится вне поля зрения телескопа.

Если лазерный импульс точно совпадет с моментом (10^{-4} секунды), когда телескоп спутника видит лазер, то похоже, что лазер видят фильтр и пиксели, так что несколько окружающих пикселей могут испытать постоянное повреждение. Энергия, выделяемая импульсом в 0.1 Дж, примерно в 100 раз превышает энергию, требуемую для такого повреждения. Впрочем, поскольку лазер испускает импульсы каждые 0.1 с, вероятность того, что лазер повредит датчик или фильтр при единичном прохождении, составит 0.1%, или 1: 1000 (10^{-4}

/0.1).

Лазеры с мощностью 40 Вт и с частотой повторения 20 Гц имеют более высокую вероятность повреждения фильтров или датчиков, поскольку каждый импульс содержит 2 Дж. Если лазер с мощностью 40 Вт проходит через фильтр, участок вокруг лазера с размером несколько десятков км²⁸ внезапно окажется ослепленным²⁹. В маловероятном случае, когда лазер испускает импульс в интервале 10⁻⁴ сек, если датчик находится в поле зрения лазера, то фильтр и/или пиксели, смотрящие на лазер, и примыкающие пиксели, вероятнее всего, получают постоянные повреждения. Предположим, что лазер выстреливает через каждые 0.05 сек. В этом случае вероятность создания лазером постоянного повреждения в фильтре и/или в датчике равна 10⁻⁴/0.05 = 0.2%. Этот пример предполагает, что спутник оборудован надежным датчиком на основе кремния, так как другие материалы для датчика обладают меньшими порогами повреждения³⁰.

Даже если лазер находится не в поля зрения телескопа спутника, случайный свет от освещения может рассеяться в оптику спутника и (если нет фильтра) изменить уровень фона датчика. Любые аномальные уровни фона, скорее всего, обнаруживаются операторами спутника во время регулярных (обычно ежедневных) проверок качества аппаратуры и ее временного ее состояния³¹.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ – ВОЗМОЖНЫЕ “ДОРОЖНЫЕ ПРАВИЛА”

Если станция СЛД осветила фотоспутник, когда спутник не видит участок земной поверхности, где расположен лазер, любой рассеянный свет, попавший на детектор или на фильтр, не будет достаточно интенсивным, чтобы вызвать повреждение. Таким образом, если предположить, что секции спутника, предназначенные для фотографирования Земли, находятся внизу, то станция СЛД может работать безопасно, когда спутник находится низко над Землей относительно этой станции. Например, французский спутник SPOT 4 имеет наклонную полосу зрения с максимумом 27° относительно локальной вертикали³². Поэтому, создание зоны, исключаяющей СЛД и занимающей 30° от локальной вертикали, для станций СЛД, работающих с не сотрудничающими спутниками (то есть, не имеющими обратные отражатели и не предназначенными для измерений расстояния до них), может оказаться достаточно разумным для обеспечения уверенности в том, что детекторы фотоспутников не будут подвергаться опасности. Впрочем, если данная страна заинтересована в определении расстояния до своих не сотрудничающих спутников, можно будет одобрены исключения и созданы каталоги в рамках некоторой согласованной организации, например, МССЛД.

Наконец, отметим, что мощности лазеров, используемые для СЛД достаточно невелики, чтобы вредить спутникам путем нагрева или причинения физических повреждений деталям спутника, отличным от оптических датчиков.

Будущие системы СЛД могут уменьшить тревоги по поводу повреждений детекторов, работающих в космосе, путем понижения мощности в импульсе и увеличения частоты повторения импульсов. НАСА разработала систему SLR2000, которая работает с частотой повторения 2000 Гц (в 200 раз выше, чем у обсуждавшихся систем) и с энергией в импульсе 135 мкДж³³. (примерно в тысячу раз меньше, чем у обсуждавшихся систем).

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Годовой отчет Лаборатории земной физики Центра космических полетов имени Годдарда за 2001 год, <<http://www.gsfc.nasa.gov/ltp/2001.annual.report/4.laserinst.pdf>> (декабрь 2006).
2. Vago, Muradian, “Китай пытался ослепить лазером американские спутники”, *Defense News*. 28 September 2006 <<http://www.defensenews.com/story.php?F=2125489>> (January 2007).
3. “США утверждают, что Китай использовал лазеры для нападения на спутники,” *Janes Defense Weekly*, 16 October 2006 <http://www.janes.com/aerospace/military/news/jdw/jdw061016.1.n.shtml> (January 2007).
4. Andrea Shalal-Esa. “Китай заглушает испытания вспышками, США встревожены”, Reuters, 5 October 2006.
5. Elaine M. Grossman. 2006. Top Commander: Китайское вмешательство в спутники США не определено. *Inside the Pentagon* 22(41) (12 October), <<http://www.world-political-swatch.com/article.aspx?id=267>>

6. Международная служба спутниковой лазерной дальнометрии (МССЛД) создала вебсайт <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>
7. Ежегодный доклад МССЛД за 2001 год, 1-3 <<http://ilrs.gsfc.nasa.gov/reports/ilsaar/2001/Section/4/web.pdf> (December 2006).
8. Хотя это не связано со станциями СЛД, имеет смысл отметить, что исследователи из 55-го Института Министерства промышленной электроники Китая, расположенном в соседнем городе Жинсу (Jinzhou) (провинция Ляонин), сообщили, что Китай владеет отражательными зеркалами и возможностями адаптивной оптики, сравнимыми с тем, что использовано в американских оптических дальнометрах STARFIRE. Смотрите Wang Min, 1999, "Anti-Satellite Optical Sensor Laser Countermeasure Technology," *Electro-Optics and Passive Countermeasures* 2: 19-22 (на китайском языке).
9. Подробности о станции в Сан Хуане можно найти на вебсайте МССЛД <<http://ilrs.gsfc.nasa.gov/stations/sitelist/>> (December 2006)
10. W.A.Baum, The Detection and Measurement of Faint Astronomical Sources, *Astronomical Techniques, Stars and Stellar Systems II* (Chicago, University of Chicago Press, 1962), 1-33.
11. Обсерватория в Чанчуне расположена на широте 43.7905°N и долготе 125.4433°E <<http://www.cho.ac.cn/s> (December 2006).
12. F.Yang, "Current Status and Future Plans for the Chinese Satellite Laser Ranging Network," *Surveys in Geophysics* 22(5) (2001), 465-471..
13. You Zhao et al. "Progress for Daylight Tracking in Changchun SLR System" (Доклад на 14-ой встрече международной рабочей группы по лазерной дальнометрии, 7-11 июня 2004, Сан Фернандо, Испания. http://cddis.nasa.gov/lw14/docs/papers/upg2_yzm.pdf (December 2006).
14. You Zhao et al. "Fulfillment of SLR daylight tracking of Changchun Station", (paper presented at the 15th International Laser Ranging Workshop, 15-20 October 2004, Canberra, Australia) <<http://ilrscanberraworkshop2006.com.au/workshop/abstracts/Fulfillment%20of%20SLR%20daylight%20tracking%20of%20Changchun%20station.pdf>> (December 2006).
15. Низкоорбитальный спутник облетает Землю на высоте примерно 200-2000 км, двигаясь с высокой скоростью (примерно 27000 км/час), чтобы преодолеть земное притяжение, и совершает оборот за 90 минут.
16. Niu Yanxiong et al. "Investigation of Laser Disturbance and Damage to Satellite-borne Photoelectric System" *Acta Photonica Sinica* 33 (7) (2004).
17. Chengzhi Liu et al. "The Performance of Changcyun SLR Station" (paper presented at the 14th International Workshop on Laser Ranging, San Fernando, Spain, 7-11 June 2004).
18. Yang Funin et al. "The Experimental Laser Ranging System for Space Debris at Shanghai" (paper presented at the 15th International Laser Ranging Workshop, in Canberra, Australia, 15-20 October, 2006).
19. Greene, "Laser Tracking of Space Debris" (paper presented at the 13th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, October 2002).
20. Годовой доклад Международной Службы СЛД за 2001 год..
21. Альтернативой служит метод "сделай шаг и посмотри", когда двухмерный набор пикселей детектора, напоминающий датчик цифровой камеры, смотрит за участком земной поверхности и снимает его изображение, а затем переходит к следующему участку.
22. G.Petrie, "Optical Imagery from Airborne and Spaceborne Platforms", *GeoInformatics*, 5(1) 2002: 28-35.
23. Например, пиксели ПЗС-датчиков на борту рентгеновской обсерватории "Чандра" непрерывно проверяются на правильность функционирования и безопасность, а операторы ставятся в известность, если обнаружено что-то ненормальное. <http://cxc.harvard.edu/mta.days/mta.bad.pixel/mta.bad.pixel.list.html>
24. D..Wright, L.Grego, anf L.Gronlund, *The Physics of Space Security, A Reference Manual* (Cambridge: American Academy of Arts and Sciences, 2005) 117-147. <http://www.ucsusa.org/assets/documents/ngws/space.security.pdf>
25. Смотрите [24].
26. Смотрите [24].
27. Это предполагает, что у спутника нет подвижек или других систем для защиты детектора от света большой интенсивности.

28. Если поле зрения детектора занимает меньше нескольких десятков км (на поверхности Земли), то частичное ослепление может произойти только в полном поле зрения.
29. Смотрите [24].
30. F. Bartoli et al. "Irreversible Laser Damage to IR Detector Materials," *Applied Optics* 16 (1977): 2934-2937.
31. Смотрите [23].
32. Вебсайт системы СПОТ для наблюдения за Землей (общая структура). http://spot4.cnes.fr/spot4_gh/satellit.htm
33. J. McGarry, T. Zagwodski and J. Degnan. "SLR2000 Closed Loop Tracking with a Photon-Counting Quadrant Detector" (paper presented at 13th International Workshop on Laser Ranging, 7-11 2002 in Washington, D.C.). http://cdis.nasa.gov/lw13/docs/_papers/auto.mcgarry.1m.pdf (December 2006).
34. Смотрите [24].
35. Смотрите [24].
36. Смотрите [24].
37. Прозрачность атмосферы (Т) для лазерного света видимого диапазона при углах возвышения над горизонтом выше, чем примерно 10°, занимает диапазон от ~ 0.5 до ~ 0.8. Так как очень низкие углы возвышения не рассматриваются, для консервативного рассмотрения принимаем значение Т=1. Если нужна более высокая точность, то $T = \exp\{-t \sec(Z)\}$, где $t = 0.009\lambda^{-4} + 0.223$, а Z.- угол от зенита, и λ – длина волны лазерного света (мкм). Смотрите, например, Kaula W.M.. 1962, *Advances in Geophysics, Volume 9*, Edited by H.E. Landsberg and J.van Mieghem (New York, Academic Press, Inc, 1962), 191-293.
38. Смотрите [30].

ПРИЛОЖЕНИЕ: ЧАСТИЧНОЕ ОСЛЕПЛЕНИЕ ЛАЗЕРОМ И ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Частичное ослепление

Частичное ослепление – это временный и обратимый процесс, происходящий, когда интенсивность лазерного света (прямого или рассеянного), падающего на данный пиксель, достаточно велика, чтобы превзойти свет, который должен собираться от участка Земли, соответствующего этому пикселю. Фактически, сигнал от Земли "тонет" в лазерном свете.

Рассеяние лазерного света в оптике спутника происходит благодаря двум основным механизмам. Во-первых, конечный диаметр зеркала телескопа приводит к дифракции, которая распределяет, грубо говоря, 16% интенсивности падающего света среди набора концентрических колец, возникающих вокруг главного отображения лазерного пятна. Во-вторых, несовершенства в оптике телескопа приводят к "утечке" интенсивности из идеального, похожего на точку изображения лазерного пятна в слегка расширенную область. Такие несовершенства могут также вызвать "вспышки", или яркие отражения от краев оптических элементов и/или поддерживающей их структуры³⁴. Мы оценили размер участка датчика, который окажется частично ослепленным лазером, следующим образом. Пролетающий по низкой орбите спутник пройдет над метровым участком поверхности, грубо говоря, за 10⁻⁴ секунды. Для спутника с метровым разрешением по поверхности Земли можно ожидать, что пиксели, составляющие датчик, будут собирать фотоны примерно за такой же промежуток времени до того, как они сосчитают величину полученного сигнала и сбросятся, чтобы подготовиться к сбору фотонов с соседней метровой площадки.

Пиксель, обнаруживающий импульс длительностью 200 пикосекунд с энергией 0.1 Дж, соберет такое же число фотонов, что и непрерывный лазер мощностью 1 кВт за 10⁻⁴ сек. В обоих случаях эффект частичного ослепления будет одним и тем же, а изображение будет затронуто примерно на расстоянии 10 км от лазера³⁵. Максимальный участок, который может ослепиться, не превысит поля зрения датчика.

Длительность частичного ослепления определяется временными характеристиками пикселя, а не длительностью импульса, так что ослепление будет продолжаться, примерно, 10⁻⁴ сек, а не 20 пикосекунд.

Повреждение

Если освещение лазером длится 10^{-4} сек или меньше, порог повреждения материалов датчика, основанных на кремнии, составляет³⁶ 100 Дж/см^2 (10^6 Дж/м^2). Это справедливо как для лазеров непрерывного действия, так и для импульсных лазеров, поскольку длительность освещения определяется временем, нужным спутнику, чтобы пройти единицу разрешения на поверхности (10^{-4} сек).

Предположим, что длина волны лазера $\lambda = 0.5 \text{ мкм}$, а диаметр фокусирующего зеркала лазера $D_L = 15 \text{ см}$, что аналогично лазерам на китайских станциях СЛД. На расстоянии $R = 800 \text{ км}$ лазер сфокусируется в пятно диаметром $1.22\lambda R/D_L = 3.25 \text{ м}$.

Чтобы остаться консервативным в оценке повреждения, не будем рассматривать влияние атмосферной дефокусировки лазера, которая расширяет размер пятна на спутнике.

Предположив, что импульс несет энергию 0.1 Дж (и прозрачность атмосферы $T = 1$)³⁷, а телескоп спутника имеет диаметр 1 м , получим количество энергии, прошедшей через этот телескоп: $0.1 \times (1.3/2.5)^2 \sim 0.01 \text{ Дж}$.

Эта энергия будет фокусироваться оптикой спутника на один пиксель, размер которого для фотоспутника составляет примерно 10 мкм (10^{-5} м). Тогда плотность энергии составит $0.01/(10^{-5})^2 = 10^8 \text{ Дж/м}^2$.

Полученное значение в 100 раз превышает порог повреждения 10^6 Дж/м^2 . При такой плотности энергии пиксель окажется поврежденным, если не фильтровать свет. Правда, тогда могут пострадать и фильтр, и пиксели. Как отмечалось ранее, вероятность события, при котором лазерный импульс возникает в момент, когда спутник видит участок поверхности с лазером, составляет всего 0.1% .

Обратите внимание, что датчики, основанные на кремнии, примерно на порядок величины более устойчивы к повреждениям, чем датчики из других материалов.