

ЛАЗЕРНЫЙ ПЕРЕДАЮЩИЙ МОДУЛЬ С ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ДЛЯ ДАЛЬНОМЕРА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА “ФОБОС-ГРУНТ”

© 2011 г. В. М. Поляков; В. П. Покровский; Л. Н. Сомс, канд. физ.-мат. наук

НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: vadim-m-polyakov@yandex.ru

Описан принцип работы и приведены основные характеристики лазерного передающего модуля для дальномера, предназначенного для работы в длительной космической экспедиции на спутник Марса – Фобос, старт которой назначен на 2011 г. Отличительной особенностью лазера, входящего в состав передающего модуля, является быстрое, немеханическое переключение направления диаграммы направленности для измерения наклонных дальностей и вычисления нормали к поверхности.

Ключевые слова: Nd:YAG-лазер, лазерный дальномер, жидкокристаллические ячейки, космическое базирование, дифракционный предел.

Коды OCIS: 280.3400

Поступила в редакцию 29.06.2011

Введение

Лазерный дальномер является стандартным измерительным средством для автоматических космических кораблей. В качестве примера такого использования лазерных дальномеров можно привести следующие проекты: *BepiColombo* (совместная для ЕКА и JAXA космическая автоматическая миссия к Меркурию) [1], *Lunar Orbiter Laser Altimeter* (программа NASA *Lunar Reconnaissance Orbiter* по картографированию поверхности Луны) [2], *Mercury Laser Altimeter* (программа NASA *Messenger* по картографированию поверхности Меркурия) [3]. Обычные требования, предъявляемые к энергии импульса излучателя дальномера, находятся в пределах от 1 до 30 мДж при частоте следования импульсов 1–20 Гц. Эти требования тривиальны для современной лазерной техники. Однако обеспечение высокой надежности в условиях длительной космической экспедиции (вакуум, различные виды радиации, перепады температуры, вибрация на этапе вывода в космос и пр.) существенно осложняет задачу построения лазера с учетом минимизации его массы и энергопотребления. Наиболее близким к описываемому в данной работе является лазер, созданный по программе *Messenger* – твердотельный лазер с лазерной диодной накачкой, построенный по схеме генератор–уси-

литель и обладающий расходимостью пучка, близкой к дифракционной.

Требования к лазерному передающему модулю высотомера – вертиканта космического аппарата “Фобос-Грунт”

В 2011 г. намечен старт межпланетной космической экспедиции “Фобос-Грунт”, целью которой является посадка космического аппарата (КА) на поверхность спутника Марса – Фобоса, забор образцов грунта и доставка их на Землю [4]. Основным средством синхронизации орбит Фобоса и КА, начиная с дистанции около 100 км, а затем снижения до 500 м является лазерный высотомер – вертикант (ЛВ-В). Об источнике излучения ЛВ-В – лазерном передающем модуле (ЛПМ) и пойдет речь в статье.

Дальномер ЛВ-В КА “Фобос-Грунт” имеет существенные отличия от лазера, созданного по программе *Messenger*. Измерение дальности в ЛВ-В осуществляется по четырем направлениям – одно по оси КА и три направления под наклоном. Это позволяет получить, кроме сведений о дистанции, информацию о положении нормали к поверхности в месте посадки. Кроме того, у этого дальномера широкий температурный диапазон работы, большой динамический диапазон измерения дальности (от 100 км до

Сравнение характеристик лазеров для программ *Messenger* и “Фобос-Грунт”

Характеристики	<i>Messenger</i>	“Фобос-Грунт”
Длина волны излучения	1,064 мкм	1,064 мкм
Длительность импульса	8 нс	10 нс
Энергия в импульсе	20 мДж	регулируемая, 1–36 мДж
Расходимость излучения	близкая к дифракционной	близкая к дифракционной
Переключаемая диаграмма направленности	нет	4 коммутируемых направления излучения
Циклограмма работы	8 Гц	пачками, с частотой 1 Гц
Частота внутри пачек	нет	250 Гц
Количество импульсов в пачке	1	4
Температурный диапазон работы	от +5 °С до +35 °С	от –10 °С до +30 °С
Вероятность безотказной работы за время экспедиции	—	0,9993

500 м), а масса излучателя лазера находится в пределах всего 1 кг.

Для решения задачи измерения дальности по четырем направлениям использованы генерация в короткий промежуток времени пачки импульсов и последовательная коммутация направления каждого из импульсов в пачке с помощью работающих на Твист-эффекте жидкокристаллических (ЖК) ячеек [5], изменяющих состояние поляризации излучения. Такое решение позволяет измерять наклонные дальности с помощью одного фотоприемника с волоконным сведением каналов [6].

Конструкция системы накачки обеспечивает нужную эффективность в интервале температур диодов более 12 °С. Использование высокотемпературных решеток лазерных диодов (РЛД) (рабочая температура выше 50 °С, производство НПП “Инжект”, Саратов) позволяет конструктивно отводить тепловой поток на корпус через калиброванное тепловое сопротивление при максимально допустимой его температуре и подогревать квантроны за счет мощности накачки диодов и специальных нагревателей, использующихся при низких температурах.

Для снижения требований к широте динамического диапазона фотоприемника применена схема задающий генератор–усилитель со ступенчатой регулировкой длительности накачки усилителя от максимальной до полного выключения по сигналу с приемного блока.

Монтаж элементов лазера на шасси ЛВ-В позволил избавиться от его тяжелого корпуса. Кроме того, такое решение обеспечивает жест-

кость конструкции одними и теми же элементами и передающего, и приемного каналов, что позволило существенно снизить общую массу ЛВ-В.

Сравнительные характеристики описываемого прибора и лазера проекта *Messenger* приведены в таблице.

Оптическая схема

Для решения поставленных задач было предложено применить твердотельный моноимпульсный лазер на Nd:YAG с боковой накачкой неколлимированными РЛД и коммутатор-формирователь диаграммы направленности на ЖК ячейках. Оптическая схема лазерного передающего модуля представлена на рис. 1. Задача лазера – генерация пачки из четырех импульсов, в дальнейшем переключаемых коммутатором-формирователем между четырьмя каналами – направлениями измерения дистанции. По навигационным условиям длительность цикла измерения дистанции по четырем направлениям не должна превышать 15 мс, поэтому реализован режим работы лазера пачками по 4 импульса с внутренней частотой в пачке 250 Гц.

Основные блоки оптической схемы – задающий генератор, согласующий телескоп, усилитель, формирующий телескоп, коммутатор-формирователь.

Задающий генератор формирует импульсы с требуемой длительностью и расходимостью. Излучение задающего генератора через

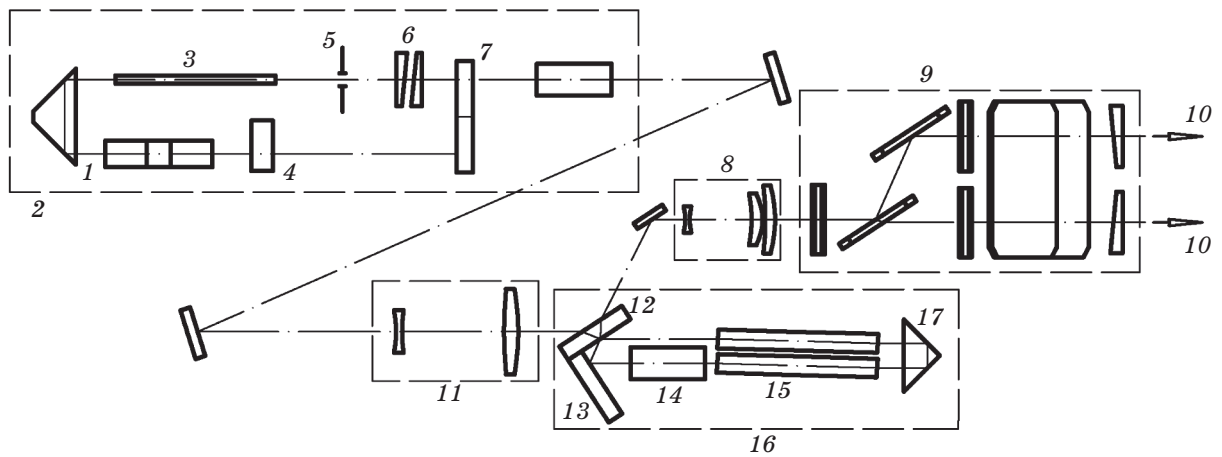


Рис. 1. Оптическая схема лазерного передающего модуля. 1 – призмный узел, 2 – задающий генератор, 3 – активный элемент, 4 – пассивный затвор, 5 – диафрагма, 6 – юстировочные клинья, 7 – зеркало резонатора, 8, 11 – телескопы, 9 – коммутатор-формирователь, 10 – выход излучения, 12 – поляризатор, 13 – зеркало, 14 – вращатель, 15 – активные элементы, 16 – усилитель, 17 – призма.

согласующий телескоп и поляризатор вводится в кольцевой двухпроходовой усилитель. Усиленное до необходимого уровня излучение вводится в коммутатор-формирователь через формирующий телескоп. Каждый из импульсов в пачке коммутатором-формирователем направляется в свой канал.

Коммутатор-формирователь

Схема коммутатора-формирователя представлена на рис. 2. Он состоит из трех переключателей

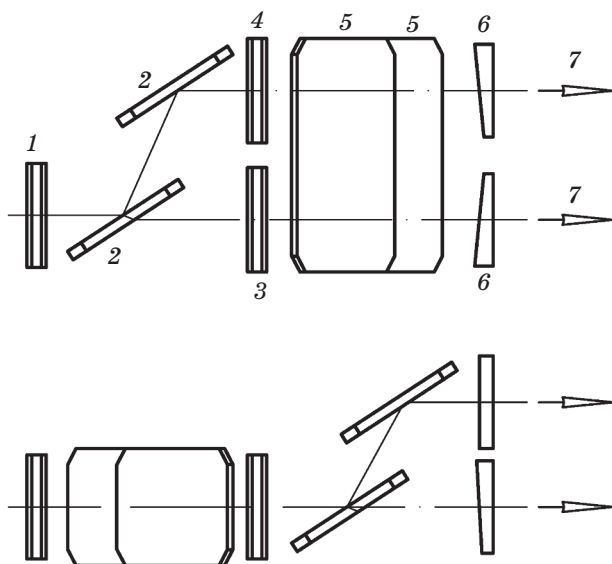


Рис. 2. Принципиальная схема коммутатора-формирователя в двух проекциях. 1, 3 и 4 – ЖК ячейки, 2, 5 – поляризаторы, 6 – отклоняющие клинья, 7 – выход излучения.

чателей положения плоскости поляризации – трех твист-нематических ЖК ячеек, четырех поляризаторов и клиньев с углом отклонения 1° . Коммутатор-формирователь обеспечивает переключение между четырьмя направлениями в пределах конуса с углом при вершине 2° при точности поддержания каждого из направлений не хуже $20''$ (рис. 3).

Использованные ЖК ячейки рассчитаны и выполнены таким образом, чтобы в исходном состоянии плоскость поляризации пучка поворачивалась на $(90 \pm 1)^\circ$ на рабочей длине

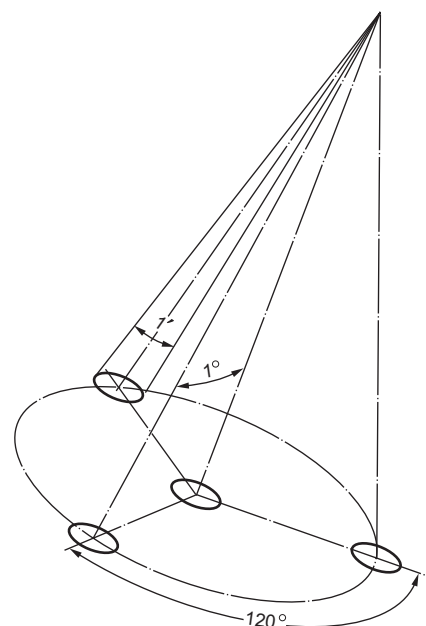


Рис. 3. Диаграмма направленности ЛПМ.

волны относительно расположения поляризатора. При подаче напряжения на прозрачные электроды директор жидкого кристалла ориентируется по полю, начиная с порогового управляющего напряжения около 2 В, и вплоть до 20 В. Бистабильность твист-нематического эффекта позволяет исключить зависимость контраста между каналами от флуктуаций управляющего напряжения на ЖК ячейках.

ЖК ячейка и поляризатор функционально составляют оптический ключ: ЖК ячейка в выключенном состоянии поворачивает плоскость поляризации, во включенном – не поворачивает; поляризатор пропускает *p*-поляризованное излучение и отражает *s*-поляризованное.

Порядок работы коммутатора-формирователя следующий: в момент поступления первого из пачки импульса все ЖК ячейки находятся в выключенном состоянии. При выключенном напряжении питания все ЖК ячейки (в том числе и первая) поворачивают плоскость поляризации лазерного излучения, и импульс отражается от первой пары поляризаторов *s*-поляризованным. Вторая по ходу луча ЖК ячейка также поворачивает плоскость поляризации излучения, и импульс претерпевает отражение от второй пары поляризаторов *s*-поляризованным.

При включенном управляющем напряжении первая ЖК ячейка не влияет на положение плоскости поляризации лазерного излучения, и импульс проходит через первый поляризатор *p*-поляризованным. Выключенная вторая ЖК ячейка поворачивает плоскость поляризации лазерного излучения и импульс отражается от второй пары поляризаторов.

При соответствующих комбинациях состояния ЖК ячеек лазерный импульс переключается между четырьмя каналами коммутатора-формирователя.

Для измерения наклонных дальностей три луча отклоняются клиньями на угол 1° , нулевой луч (все ЖК ячейки выключены) проходит плоскопараллельную пластину.

Nd:YAG-лазер

Для решения задачи формирования пучка с качеством, близким к дифракционному, выбрана схема “задающий генератор–усилитель”. Как задающий генератор, так и усилитель выполнены с боковой накачкой РЛД.

В приборе использован задающий генератор с пассивным затвором и плоским резонатором.

Генератор базируется на радиационно стойком активном элементе размером $\varnothing 1,6 \times 30$ мм. Две РЛД мощностью 300 Вт для накачки активного элемента включены в нагруженном (горячем) резерве. Ток РЛД фиксирован на оптимальном уровне (превышения порога), обеспечивающем высокий коэффициент полезного действия и необходимую надежность. Если обе РЛД и все элементы задающего генератора исправны, то длительность импульса накачки составляет около 100 мкс; при появлении моноимпульса накачка прекращается. Максимально допустимая длительность накачки составляет 350 мкс. При выходе из строя одной РЛД или частичном повреждении обеих автоматика блока питания увеличивает длительность импульса вплоть до появления импульса генерации или до максимально возможного значения. Блок питания дублирован.

Для обеспечения устойчивости генератора к возможным деформациям конструкции применена схема с единой подложкой для глухого и выходного зеркал и призмным ретрорефлекторным узлом. Для тонкой юстировки резонатора в схему введены юстировочные клинья.

Для усиления импульса до необходимых значений энергии используется двухпроходовой кольцевой усилитель. Два прохода в усилителе достаточны для достижения эффективного съема запасенной энергии. Двойной обход кольца обеспечивается поляризационной развязкой (вращатель плоскости поляризации и диэлектрический поляризатор). Излучение задающего генератора (*p*-поляризованное) проходит через поляризатор, вращатель поворачивает плоскость поляризации излучения на 90° , и оно после первого обхода кольца отражается от поляризатора *s*-поляризованным. Вновь поменяв положение плоскости поляризации за счет вращателя, после второго обхода кольца излучение проходит через поляризатор *p*-поляризованным, после чего выходит из усилителя. В усилителе использованы два активных элемента размером $\varnothing 4 \times 30$ мм. Призма, зеркало и поляризатор образуют кольцевую схему обхода активных элементов, устойчивую к деформациям конструкции в плоскости рисунка (см. рис. 1).

Система накачки усилителя основана на двух РЛД с пиковой мощностью 1,8 кВт. Они включены в нагруженном (горячем) резерве, аналогично задающему генератору. Ток РЛД усилителя фиксирован. Управление энергией накачки осуществляется изменением длитель-

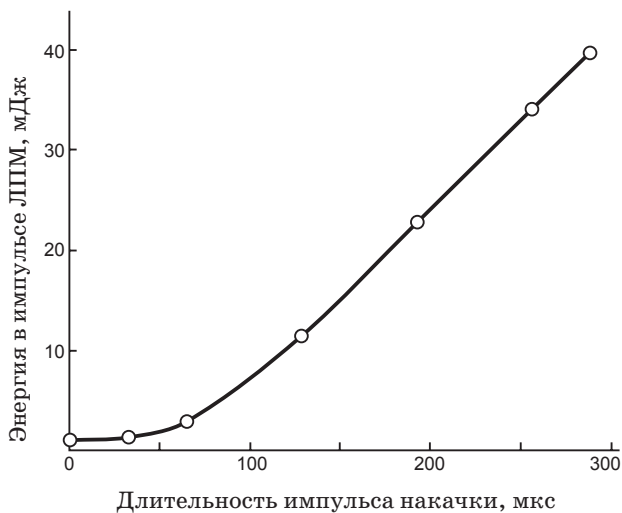


Рис. 4. Зависимость энергии на выходе ЛПИМ от времени накачки усилителя.

ности накачки. Автоматика блока питания обеспечивает оптимальную задержку между импульсами накачки задающего генератора и усилителя во всем диапазоне их возможных значений.

Для поддержания принимаемого ЛВ-В сигнала на уровне, оптимальном для его обработки, выходная энергия регулируется изменением времени накачки усилителя при постоянном ее токе (рис. 4). При выключенной накачке усилителя работает только задающий генератор. Сигналом для регулировки энергии лазера служит уровень сигнала на фотодиоде приемного канала.

Необходимыми условиями нормальной работы ЛВ-В являются точная союстировка и высокая стабильность диаграмм направленности передающего и приемного модулей. Для обеспечения низкого уровня шумов на приемнике дальномера предложена схема со сведением четырех каналов в фокальной плоскости объектива с помощью оптических волокон. Входные торцы волокон, обращенные к объективу, служат полевыми диафрагмами. Выходные торцы волокон сведены на площадке приемного фотодиода. Для точной союстировки каналов передающего модуля с приемной системой используются вращающиеся клинья.

На рис. 5 показано распределение энергии в дальнем поле. Изображение получено в фокальной плоскости объектива стенда для союстировки приемного и передающего каналов. Сечение лазерного пучка наблюдается на фоне

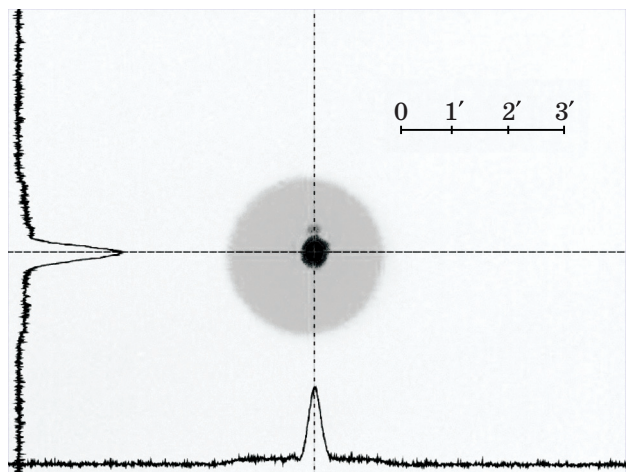


Рис. 5. Распределение энергии в лазерном пучке на фоне изображения полевой диафрагмы приемного канала дальномера.

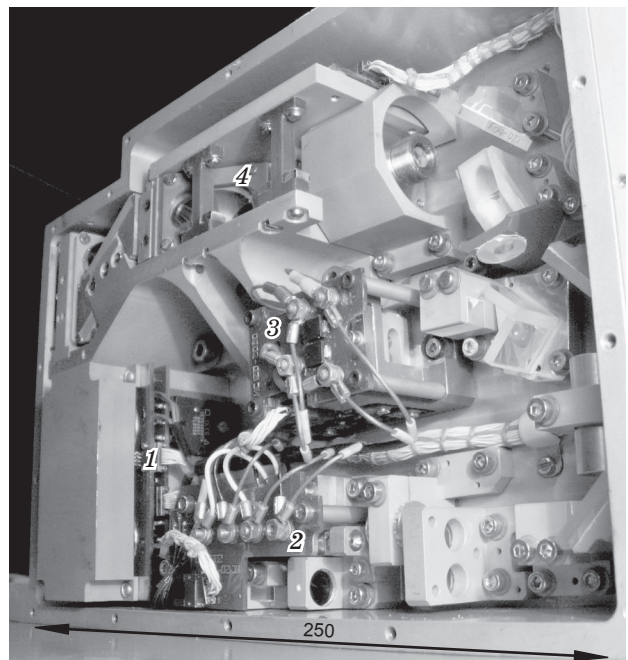


Рис. 6. Лазерный передающий модуль со снятой крышкой на шасси ЛВ-В. 1 – силовой модуль блока питания, 2 – задающий генератор, 3 – квантрон усилителя, 4 – генератор-формирователь.

изображения полевой диафрагмы приемного канала дальномера, подсвеченной в обратном ходе лучей светодиоидом. Размер полевой диафрагмы – 3'.

Заключение

Представленный в статье ЛПМ (рис. 6) прошел как автономные, так и испытания в составе ЛВ-В. Программа автономных испытаний ЛПМ проводилась с целью подтверждения энергетика лазера, расходимости пучка, циклограммы работы, длительности импульса, переключения диаграммы направленности. Вакуумные испытания в составе ЛВ-В состояли из проверок союстировки каналов ЛПМ и приемного модуля в вакууме и вакуумных поправок. Комплексные испытания в составе ЛВ-В включали термовакуумные и вибрационные испытания, а также получение сигнала дальности на атмосферной трассе.

Лазерный передающий модуль в составе лазерного дальномера поставлен для установки на КА в НПО им. С.А. Лавочкина.

Создание прибора явилось результатом коллективного труда большого числа специалистов, которым авторы выражают глубокую благодарность: В.С. Павлову и А.М. Пономареву, Г.Т. Микаэлян, С.А. Студенцову, профессору Збигневу Рашевски и доктору Эдварду Новиновски из Варшавского военного технологического университета, В.Ф. Захаренкову и А.Ф. Корневу, К.С. Фадееву, С.Н. Мартынову и Г.А. Кононовой, В.М. Волынкину, Г.Е. Новикову, М.М. Халееву, С.В. Кащееву, А.Г. Мурзину, И.Г. Кучме, Д.О. Оборотову, С.С. Терехову, А.Г. Ершову, А.Ю. Евсееву, Н.В. Захаренкову.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Thomas N., Spohn T., Barriot J.-P., Benz W., Beutler G., Christensene U., Dehant V., Fallnichg C., Giardini D., Groussini O., Gundersona K., Hauber E., Hilchenbache M., Iess L., Lamyk P., Loral L.-M., Lognonnem P., Lopez-Morenol J.J., Michaelis H., Oberst J., Resendes D., Reynaudk J.-L., Rodrigol R., Sasaki S., Seiferlina K., Wiczorekm M., Whitbya J.* The BepiColombo Laser Altimeter (BELA): Concept and baseline design // *Planetary and Space Science*. 2007. V. 55. P. 1398–1413.
2. *Ramos-Izquierdo L., Scott III S.V., Connelly J., Schmidt S., Mamakos W., Guzek J., Peters C., Liiva P., Rodriguez M., Cavanaugh J., Riris H.* Optical system design and integration of the Lunar Orbiter Laser Altimeter // *Appl. Opt.* 2009. V. 48. № 16.
3. *Krebs D.J., Novo-Gradac A.M., Li S.X., Lindauer S.J., Afzal R.S., Yu A.W.* Compact, passively Q-switched Nd:YAG laser for the MESSENGER mission to Mercury // *Appl. Opt.* 2005. V. 44. № 9.
4. *Копик А.* Марс в области наших интересов // *Новости космонавтики*. 2004. № 5.
5. *Polyakov V., Pokrovsky V., Studentsov S., Soms L., Tomilin M.* High accuracy TN optical commutator of laser radiation for application in space navigation // *ALT09 Advanced Laser Technologies, book of abstracts*. 2009. P. 166.
6. *Kuvaldin E.V., Ershov A.G., Zakharenkov V.F., Polyakov V.M., Arkhipova L.N.* Testing unit for laser rangefinder // *Proc. SPIE*. 2010. V. 7544. P. 754457; doi: 10.1117/12.885857.