

## Телекомунікації та захист інформації

УДК 621.391

# Рассмотрение ключевых параметров и выбор лазера для передающего модуля системы лазерной космической связи

Голуб И. А.

e-mail [ee1golub@gmail.com](mailto:ee1golub@gmail.com)Денбновецкий С. В., к.т.н., проф., ORCID [0000-0002-8102-9571](https://orcid.org/0000-0002-8102-9571)e-mail [sdenbno@gmail.com](mailto:sdenbno@gmail.com)

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" [kpi.ua](http://kpi.ua)

Киев, Украина

**Реферат**—В статье рассматриваются параметры передающего модуля системы лазерной космической связи, на которые следует обратить особое внимание, поскольку они имеют наибольшее влияние на скорость передачи информации, мощность сигнала и точность наведения луча системы. Для передачи информации с помощью лазерной энергии на длительные расстояния важны такие параметры лазера, как расходимость излучения, энергия луча, КПД, плотность импульсов. На основе этих сведений подбирается наиболее подходящий для использования в модуле лазер. Поскольку доставка грузов на околоземную орбиту очень дорогостояща, прежде чем запускать какой-либо аппарат в космос, следует убедиться в рациональности использования его компонентов, для этого передающий модуль системы космической связи должен быть долговечным, энергоэффективным, иметь относительно небольшой вес и габариты. Большое влияние на эти параметры оказывает непосредственно лазер, используемый в системе.

Библ. 11, рис. 2, табл. 1.

**Ключевые слова** — лазер; система; излучение; параметры; связь; мощность; передающий модуль.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Лазерная связь двух объектов осуществляется только посредством соединения лазерным лучом принимающего и передающего устройств через атмосферу или вакуум. Информация поступает в приёмно-передающий модуль, фокусируется оптической системой передатчика в узкий лазерный луч, и передается.

На принимающей стороне оптическая система фокусирует луч на высокочувствительный фотодиод (или лавинный фотодиод), который преобразует оптический пучок в электрический сигнал. Далее сигнал демодулируется и преобразуется в сигналы выходного интерфейса. Ключевыми элементами для осуществления лазерной связи являются непосредственно лазер, как основной элемент передающего блока системы, и высокочувствительный фотоэлемент в качестве приёмника. Чтобы построить подобную систему, необходимо чётко представлять её параметры и их взаимосвязь с конструктивными элементами [1], [2].

Целью данной статьи является рассмотрение ключевых для оптической коммуникации на дальних расстояниях параметров и определение наиболее подходящего для использования в космической связи лазера.

### II. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ

В общем случае методы расчёта систем радиосвязи пригодны для лазерных систем связи. И для оптических каналов связи, и для радиоканалов параметры систем и их функциональные возможности описываются обычно уравнением связи [1]. Это уравнение позволяет рассчитать энергию сигнала, выделенного в приёмном устройстве, на основе излучаемой мощности, коэффициентов передачи элементов системы и возникающих в них потерь, а также с учётом особенностей распространения луча в среде:

$$M = 10 \lg(P) - L_t + G_t - L_p - L_n - L - L_{link} + G_r - L_r \cdot 10 \lg(QE) - L_{proc} - 10 \lg(S_{reg}), \quad (1)$$



где  $M$  – отношение мощности выделенного сигнала к минимальной мощности сигнала, требуемой для нормального функционирования, дБ;  $P$  – мощность сигнала на выходе передающего устройства, Вт;  $L_t$  – потери в антенно-фидерном устройстве передающей системы, дБ;  $G_t$  – коэффициент усиления передающей антенны (телескопа), дБ;  $L_n$  – потери за счёт искажения волнового фронта в передающей антенне;  $L_p$  – потери наведения луча передающего устройства, дБ;  $L$  – потери распространения в свободном пространстве, дБ;  $L_{link}$  – дополнительные потери распространения, связанные с поляризацией и затуханием в среде, дБ;  $G_r$  – коэффициент усиления приёмной антенны, дБ;  $L_r$  – потери в антенно-фидерном устройстве приёмной системы, дБ;  $QE$  – квантовая эффективность детектора;  $S_{reg}$  – минимальная мощность сигнала, требуемая для нормального функционирования при наличии шума в канале и собственных шумов детектора;  $L_{proc}$  – потери на обработку информационного сигнала.

Основываясь на приведённом уравнении, можно выделить некоторые ключевые параметры, особо важные для передающего устройства, на которые при разработке системы связи следует обращать особое внимание, если ставится цель достичь высокой эффективности работы.

Мощность сигнала на выходе передающего устройства в лазерной системе связи определяется в основном мощностью лазера. Излучение лазера может быть непрерывным, с постоянной мощностью, или импульсным, достигающим предельно больших пиковых мощностей. Мощность лазерного луча определяется количеством энергии, доставляемой лазерным лучом за единицу времени, что выражено в формуле [3]:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}. \quad (2)$$

Способ накачки лазера и качество оптической системы также существенно влияют на мощность излучения.

Динамический диапазон [4] выходного сигнала равен отношению максимального выходного сигнала

до минимального, при которых обеспечиваются технические характеристики и параметры системы.

$$D_k = 10 \lg \left( \frac{P_{k \max}}{P_{k \min}} \right), \quad (3)$$

где  $P_{k \max}$  – максимальная неискажённая мощность, которая может быть передана по каналу;  $P_{k \min}$  – минимальная мощность сигнала, при которой обеспечивается необходимая защищённость от помех.

Как правило, минимальный выходной сигнал определяется собственными шумами ЕС, а максимальный – разрешением и допустимыми нелинейными искажениями амплитудных характеристик. В некоторых случаях динамический диапазон определяется как отношение максимального сигнала к эффективному значению собственных шумов ЕС.

Расходимость луча зависит как от типа лазера, так и от оптической системы. Полупроводниковые лазеры имеют высокую расходимость, но оптика может сфокусировать излучение в тонкий пучок. Чем меньше расходимость пучка, тем больше энергии луча может быть сконцентрировано на меньшей площади улавливателя, и тем точнее можно навести луч. Расходимость лазерного луча и радиус пятна наглядно показаны на рис. 1.

Угловая расходимость пучка определяется выражением [5]:

$$\alpha = A_d \frac{\lambda}{b_d}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – полный угол расходимости луча;  $\lambda$  – длина волны;  $b_d$  – характерный размер выходного окна лазера, ответственного за дифракцию;  $A_d$  – коэффициент, отвечающий за распределение интенсивности в поперечном сечении луча.

Отношение сигнал/шум – безразмерная величина, равная отношению мощности полезного сигнала к мощности шума.

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}. \quad (5)$$



Рис. 1 Расходимость лазерного луча и радиус пятна

КПД лазера – параметр, показывающий насколько эффективно лазеры могут преобразовывать входную энергию в выходной свет, колеблется в широких пределах – от 0,001% до свыше 50% входной мощности. КПД имеет особое значение в устройствах большой мощности, потому энергия, не преобразованная в лазерное излучение, уходит в тепло, требующее отвода от лазера [3], [6].

Качество исходного лазерного излучения обычно характеризуется параметром  $M2 = 2N + 1$  (где  $N$  – номер поперечной генерирующей моды наивысшего порядка). Этот параметр показывает, во сколько раз расхождение пучка излучения превышает дифракционный предел. Высокое качество пучка (низкий  $M2$ ) может быть получено в результате оптимизации конструкции резонатора и значительному уменьшению влияния тепловых эффектов в активной среде, что приводит либо к полному исключению вредного влияния тепловой линзы, либо к его компенсации. Последнее требование может быть выполнено, если, например, тепловой поток будет коллинеарным направлению лазерного пучка в активной среде. Это достигается в конструкции лазера с активным элементом в виде тонкого диска, который охлаждается с одной или обеих сторон (дисковые лазеры).

Некоторые из параметров, наиболее характерные для распространённых лазеров, которые применяются в космической связи, представлены в табл. 1 [5], [7], [8].

Для большинства оптических подсистем требуются сложные конструкции, содержащие на пути

прохождения луча до 50—100 оптических поверхностей. Даже реализации коэффициента пропускания в 50% добиться очень сложно из-за этих ограничений оптики. Дальнейшее усовершенствование технических параметров не приводит к значительному улучшению характеристик линии связи (если только нельзя уменьшить общее число поверхностей). На характеристики линии связи значительно влияет точность наведения передающего устройства. Ошибка наведения определяется прежде всего статическими смещениями оси взаимной ориентации (и лишь в небольшой степени случайной шумовой составляющей, связанной с обработкой результатов угловых измерений). Значительного снижения ошибок наведения можно достичь за счет усовершенствования методов отслеживания заданного направления, структурной и температурной стабильности [1].

### III. ВЫБОР ЛАЗЕРА

Лазеры, применяющиеся в космической связи, в основном имеют три типа активных сред: полупроводник, газ или твёрдое тело.

Основные элементы лазера представлены на рис. 2 [9].

В полупроводниковых лазерах относительно невелики мощности излучения, определяемые стойкостью его излучающей поверхности к воздействию собственного излучения. Обычно импульсная мощность отдельного лазера не превышает 100 Вт при комнатной температуре.

ТАБЛИЦА 1 ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Тип лазера	Длина волны, $\lambda$ , мкм	Энергия в импульсе, $W$ , Дж	Длительность импульса, $\tau$ , с	Частота повтор. импульсов, $f$ , Гц	Мощность (непр.) $P$ , Вт	Угловая расходимость, $\alpha$ , мкрад	КПД, %
<i>Nd: YAG, импульсный режим</i>							
Nd: YAG, свободная генерация	1.06	1	10-3	102		1...10	1...3
Nd: YAG, диодная накачка	1.06	10-2 10-5	10-8	102 104		1...10	1...5
<i>Nd: YAG, непрерывное излучение</i>							
Nd: YAG, ламповая накачка	1.06				10...200 0	1...10	3
Nd: YAG, диодная накачка	1.06				20...100	1...10	10
<i>CO<sub>2</sub>, импульсный режим</i>							
CO <sub>2</sub> с радио-частотной накачкой	10.6	$5 \cdot 10^{-2}$	10-4	100-2500		4	$\leq 10$
CO <sub>2</sub> -TEA	10.6	10-1 20	10-5 10-6	102 200		2.5 10	$\leq 10$ $\leq 10$
<i>CO<sub>2</sub>, непрерывное излучение</i>							
CO <sub>2</sub> с медленной продольной прокачкой	10.6				100...10 00	1	10
CO <sub>2</sub> с высокой мощностью	10.6				200		
<i>Основные полупроводниковые лазеры</i>							
GaAs	0.635...0.95	10 мВт...20 Вт ( $P_n$ до 100 Вт) (stacks 5 кВт)		103	0.04	250x150	>10
InP	0.95...1.55	10...100 Вт					
Тройные полупроводники типа InGaAs	0.75...0.98	Средняя мощность 100 Вт и более				250x150	>10





Рис. 2 Основные элементы лазеров

Твердотельные лазеры работают, как правило, с оптической накачкой, в качестве которой используется световая энергия импульсных или непрерывных ламп, а также полупроводниковых светодиодов и лазеров. Отличительной особенностью таких приборов является сравнительно большая мощность излучения в импульсе по сравнению с другими лазерами.

Среди твердотельных лазеров особенно стоит выделить лазер на алюмоиттриевом гранате с примесью неодима (Nd: YAG-лазер). Он широко используется в таких областях, как космическая связь, дальнометрия и локация. Благодаря хорошим теплофизическим и спектрально-люминесцентным характеристикам кристаллов Nd: YAG, лазеры на их основе позволяют получать практически все известные режимы генерации.

Отличительной чертой газовых лазеров является работа в широком диапазоне длин волн от ультрафиолетовых до инфракрасных как в импульсном, так и в непрерывном режиме. В них более четко проявляется высокая направленность и монохроматичность, что обусловлено меньшей плотностью и более высокой однородностью газов по сравнению с твердыми телами. Вместе с тем малая плотность газов препятствует получению высокой плотности возбужденных частиц, которая характерна для твердых тел. Поэтому удельная энергия излучения газовых лазеров гораздо ниже, чем у лазеров на основе конденсированных сред [1], [2], [7].

Рассмотрим существующие решения для лазеров, которые можно применить в оптических системах данного вида связи.

Лазеры передающих систем межспутниковой связи должны иметь следующие характеристики.

- небольшую массу;
- большую мощность излучения при средних (порядка 1 Мбит/с) и высоких (более 100 Мбит/с) скоростях передачи информации;
- устойчивую временную и пространственную моды излучения для обеспечения простого и эффективного сопряжения;
- эффективный способ модуляции для импульсной или ЧМ связи.

В качестве источников лазерного излучения можно использовать в основном четыре вида лазеров: AlGaAs-диоды; лазеры на алюмоиттриевом гранате с примесью неодима (Nd: YAG-лазеры) с накачкой AlGaAs-диодами и такого же типа лазеры с удвоением частоты, CO<sub>2</sub>-лазеры.

Лазерные диоды имеют небольшие размеры, относительно высокий коэффициент полезного действия, относительно широкий диапазон рабочих длин волн (приблизительно от 0,8 до 1,7 мкм), потенциально большой срок службы (до 100 000 ч.), а также допускают непосредственную модуляцию.

Основным недостатком таких лазеров является ограниченная выходная мощность каждого диода, поэтому в большинстве случаев используются решетки диодов, что приводит к необходимости решения проблем объединения пучков.

Полупроводниковый лазер на AlGaAs-диодах характеризуется малым потреблением энергии и массогабаритными параметрами. Более того, его излучение можно непосредственно модулировать импульсным током с КПД около 10%. Обычно отдельный луч диода необходимо сначала преобразовать в круглый луч для эффективной оптической обработки, а затем сложить лучи для повышения общей мощности излучения [2].

Проблемы объединения пучков не существует для Nd: YAG-лазеров с накачкой AlGaAs-диодами, для которых хорошо разработаны методы модуляции. Обычно они имеют необходимую мощность для организации связи. Этот лазер может работать в режимах модуляции добротности резонатора, открытия резонатора и синхронизации мод, допускает импульсную модуляцию от низкой (порядка 0,1 Мбит/с) до высокой (порядка 200 Мбит/с) скорости передачи информации. Nd: YAG-лазер имеет низкий, но приемлемый общий коэффициент полезного действия (обычно 1...10%), существенно зависящий от вида источника накачки, а также длительный срок службы – до 100 000 часов [1], [10], [11].

Накачка лазерными диодами более эффективна, чем ламповая, что с одной стороны связано с большей эффективностью преобразования диодами электрической энергии в световую, а с другой - с возможностью настроить длину волны излучения светодиода на заданную линию поглощения активной среды твердотельного лазера. Кроме того, диоды работают при низких напряжениях, более компактны, долговечны и имеют большую механическую прочность и надежность, чем лампы. Однако такая накачка предполагает возбуждение твердотельных лазеров линейками или матрицами лазерных диодов. Она может обеспечить в импульсном режиме интенсивность излучения более 1 кВт/см<sup>2</sup>. Средняя мощность Nd: YAG лазеров с такой накачкой может достигать 6 кВт [11].

Недостатком Nd: YAG лазера является то, что электрооптические модуляторы, которые хорошо разработаны, весьма сложны. Также для этих лазеров наблюдается смещение длины волны с течением времени.

Существенные отличия имеют лазеры на углекислом газе (CO<sub>2</sub>-лазеры). Они по существу представляют собой газоразрядные трубки, обычной проблемой которых является надежность.

Для CO<sub>2</sub>-лазера не возникает никаких специальных вопросов построения передающих устройств,

даже если речь идет о когерентном детектировании и частотной модуляции. Более высокая расходимость излучения, возникающая в результате дифракции на более длинной волне, заметно снижает точность наведения. Влияние большой расходимости излучения частично компенсируется более эффективным процессом детектирования с гетеродинированием в приёмном устройстве и более высоким КПД лазеров (более 10%).

Этот вид лазеров имеет три недостатка: ограниченный срок службы, дополнительная сложность гетеродинного или гомодинного приема, при котором требуется точное согласование излучения местного генератора и принимаемого сигнала на поверхности кристалла смесителя, а также необходимость применения детекторов с криогенным охлаждением [2], [10].

#### Выводы

Основываясь на изложенных сведениях и параметрах, представленных в табл. 1, можно сделать вывод, что наиболее сбалансированные параметры для использования в космической связи в настоящее время имеет Nd: YAG лазер с накачкой AlGaAs диодами. Хотя Nd: YAG-лазер с оптической накачкой дороже и сложнее по конструкции, чем лазерный диод или CO<sub>2</sub>-лазер, он формирует луч с очень малой расходимостью (порядка 3...8 мкрад), ограниченной дифракционными характеристиками передающего устройства, что очень полезно при работе в области космической связи. Использование полупроводниковой накачки позволит более эффективно преобразовывать электрическую энергию в световую, а также существенно продлить срок службы лазера (от нескольких тысяч до 10<sup>4</sup>-10<sup>6</sup> часов) за счёт отсутствия необходимости менять лампы накачки с необходимым интервалом, что имеет критическое значение в космосе, а также, в сравнении с ламповой накачкой,

Надійшла до редакції 23 лютого 2017 р.

УДК 621.391

## Розгляд ключових параметрів і вибір лазера для передавального модуля системи лазерного космічного зв'язку

Голуб І. А.

e-mail [ee1golub@gmail.com](mailto:ee1golub@gmail.com)

Денбновецький С. В., к.т.н., проф., ORCID [0000-0002-8102-9571](https://orcid.org/0000-0002-8102-9571)

e-mail [sdenbno@gmail.com](mailto:sdenbno@gmail.com)

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" [kpi.ua](http://kpi.ua)

Київ, Україна

снизить энергопотребление лазера в 3-10 раз, в зависимости от конструкции накачки. Используя такую накачку, Nd: YAG-лазер за счёт уменьшения длины резонатора может стать более компактным, чем, например, CO<sub>2</sub> лазер. К тому же, Nd: YAG-лазер может работать в режимах модуляции добротности резонатора, открытия резонатора и синхронизации мод. Выбор режима зависит от скорости передачи информации и вида модуляции.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] M. Katzman, *Lazernaya kosmicheskaya svyaz [Laser space communication]*. Moscow: Radio i svyaz, 1993.
- [2] L. A. Asnis, V. P. Vasiliev, and V. B. Volkonskiy, *Lazernaya dalnometriya [Laser Rangemetry]*. Moscow: Radio i svyaz, 1995.
- [3] S. V. Denbnovetsky and O. V. Leschishin, *Elektronnyie sistemy [Electronic systems]*. Kyiv: NTUU "KPI," 2011.
- [4] D. J. Sakalema, *Podvizhnaya radiosvyaz [Mobile radio communication]*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2015.
- [5] V. Veiko, *Opornyiy konspekt lektsiy po kursu «Fiziko–tehnicheskie osnovy lazernyih tehnologii» [A basic summary of lectures on the course "Physical and technical fundamentals of laser technologies"]*, 2nd ed. St.-Peterburg, Russia: StPbGU ITMO, 2007.
- [6] J. Hetch, *Understanding lasers*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [7] A. S. Batrakov, M. M. Butusov, and G. P. Grechka, *Lazernyie izmeritelnyie sistemy [Laser measuring systems]*. Moscow: Radio i svyaz, 1981.
- [8] M. Ross, P. Freedman, J. Abernathy, G. Matassov, J. Wolf, and J. D. Barry, "Space optical communications with the Nd: YAG laser," *Proc. IEEE*, vol. 66, no. 3, pp. 319–344, 1978. DOI: [10.1002/9780470332306](https://doi.org/10.1002/9780470332306)
- [9] U. V. Bajborodin, *Osnovi lazernoy tehniki [Laser science base]*, 2nd ed. Kyiv: Vyshcha shkola, 1988.
- [10] G. G. Unger, *Opticheskaya svyaz [Optical communication]*. Moscow: Svyaz, 1979.
- [11] V. O. Chadyuk, *Optoelektronika: vid makro do nano. Generatsiya optichnogo vyprominyuvannya [Optoelectronics: from macro to nano. Generation of optical radiation]*. Kyiv: Kyiv, 2012.



*Реферат*—В статті розглядаються параметри передавального модуля системи лазерного космічного зв'язку, на які слід звернути особливу увагу, оскільки вони мають найбільший вплив на швидкість передачі інформації, потужність сигналу, точність наведення променя. Для передачі інформації за допомогою лазерної енергії на значні відстані важливі такі параметри лазера, як розходження випромінювання, енергія променя, ККД, щільність імпульсів. На основі цих відомостей підбирається найкращий для використання в модулі лазер. Оскільки доставка вантажів на навколосезну орбіту дуже дорога, перш ніж запускати будь-який апарат в космос, слід перекопатися в раціональності використання його компонентів, для цього передаючий модуль системи космічного зв'язку повинен бути довговічним, енергоефективним, мати відносно невелику вагу і габарити. Великий вплив на ці параметри чинить безпосередньо лазер, який використовується в системі.

Бібл. 11, рис. 2, табл. 1.

*Ключові слова* — лазер; система; випромінювання; параметри; зв'язок; потужність; передаючий модуль.

UDC 621.391

## Consideration of most important parameters and selection of the laser for transmitting module of space laser communication system

I. A. Holub

e-mail [ee1golub@gmail.com](mailto:ee1golub@gmail.com)

S. V. Denbnovetskyi, PhD, Prof., ORCID [0000-0002-8102-9571](https://orcid.org/0000-0002-8102-9571)

e-mail [sdenbno@gmail.com](mailto:sdenbno@gmail.com)

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" [kpi.ua](http://kpi.ua)  
Kyiv, Ukraine

*Abstract*—Laser communications through optical fibers move tens of terabits of data every second between cities and across oceans. But for the majority of Earth's surface, where running fiber is impractical physically or financially, communication satellites in space provide connectivity—to remote ground users and also to mobile platforms such as aircraft, ships and even other satellites. These links rely on radio-frequency communications, which, while reliable, are orders of magnitude slower in moving data than optical fiber links, and have issues related to antenna footprint, power requirements and limited available spectrum. Also the requirements of a number of future planned space missions in low earth orbit, mainly in the field of earth observation, ask for high data rate capability to a geostationary data relay satellite. In the field of communication satellites, increasing traffic demand requires the use of inter—satellite links to conserve bandwidth and improve link quality by shorter transmission delays. The potential for the laser to overcome these issues in space was realized soon after its invention. Recent and upcoming deployments of satellite laser communication systems are bringing Internet-like speeds for data transmission in space. The result could be a revolution in communication, both on Earth and across the solar system.

Laser communications uses collimated laser beams to transmit information at high data rates in the multigigabit regime, preventing interference problems and exhaustion of radio-frequency bandwidths. Laser transmitters, at wavelengths some 10,000 times shorter than RF waves, result in beams that are far narrower for the same unit aperture size—providing more concentrated communications power at the receiver with lower required transmitted power from smaller, lighter apertures. The upshot is a lower size, weight and power requirement for transmit and receive apertures of a laser communications terminal. Perhaps just as important, there is almost no spatial overlap among various users, so the optical spectrum of free-space optical communication is at present unregulated — a significant advantage for space-based users.

In this article parameters of the transmitting module of laser cosmic space communication system are considered. These parameters require special attention, because they have the greatest influence on the quality of data transmission in such system. The laser with the more suitable parameters for applying it in the transmitter has been selected based on this information.

Such parameters of the laser beam as sufficiently low divergence, high energy efficiency, high impulse density are very important for information transmission over long distances through laser energy. Since delivery of cargo into space is very expensive, before launching any device in space is important to be sure about effective use of its components so transmitting module of space communication system must be durable, energy efficient, must have a relatively small weight and size. The laser used in system have great influence on these parameters.

Ref. 12, fig. 2, tabl. 1.

*Keywords* — laser; system; radiation; parameters; communication; power; transmitter.

