

Бортовая лазерная силовая установка для борьбы с космическим мусором

Авдеев А.В.*, Метельников А.А.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: alex021894@mail.ru*

***e-mail: Metelnikov91@gmail.com*

Аннотация

Лазерные бортовые энергетические установки (ЛБЭУ) рассматриваются для решения задачи борьбы с фрагментами космического мусора (ФКМ) [1, 2, 3]. В работе проведен анализ требований, предъявляемых к ЛБЭУ, решающим подобные задачи. Предметом исследования является система ЛБЭУ - космический аппарат (КА) – ФКМ (объект воздействия). Объектом исследования являются тактико-технические характеристики (ТТХ) основных подсистем ЛБЭУ для борьбы с ФКМ. Целью работы является определение основных ТТХ ЛБЭУ для решения задачи борьбы с ФКМ.

Ключевые слова: космический мусор, бортовая лазерная силовая установка, DF-лазер.

1. Построение системной модели ЛБЭУ для борьбы с КМ

Целью лазерной установки, решающей задачу борьбы с ФКМ, является создание на поверхности удаленного объекта излучения с заданной плотностью мощности в заданном промежутке времени:

$$E_u = f(E_0, \sigma, t), \quad (1)$$

где E_0 – энергия, излучаемая лазерной установкой; σ – общая ошибка наведения и сопровождения объекта; t – время воздействия. Основными факторами внешней среды, влияющими на эффективность работы комплекса, являются вибрации носителя [4] и турбулентность пограничного слоя атмосферы, возникающая вблизи выходной апертуры носителя [5].

Вибрации носителя β_n приводят к разъюстировкам оптической системы и, как следствие, снижению ТТХ ЛБЭУ. Задача минимизации влияния колебаний решается двумя способами: введением гиropлатформенных систем/ систем амортизации, что приводит к увеличению массогабаритных характеристик установки, или созданием системы динамической настройки – автоюстировки [4,6]. Введение систем динамической настройки не ведет к значительному увеличению массогабаритных характеристик установки, поэтому их использование наиболее рационально при разработке ЛБЭУ [6].

Возникновение турбулентного пограничного слоя атмосферы вблизи выходной апертуры β_m приводит к снижению оптического качества и пространственно-энергетических характеристик пучка [5].

По времени воздействия ЛБЭУ можно разделить на две группы:

- 1) непрерывные ЛБЭУ,
- 2) импульсные и импульсно-периодические ЛБЭУ.

Установки, относящиеся к первой группе, позволяют передавать большие энергии без возникновения эффектов плазмообразования и электрического пробоя [1,3]. Основной проблемой таких установок является поддержание точности сопровождения объекта в течение длительного времени (до 4-х секунд) при постоянных вибрациях носителя [7].

На установки, относящиеся ко второй группе, накладываются ограничения по передаваемой энергии за счет порогов плазмообразования и элетрического пробоя [3]:

$$I_{пор} \leq I \leq I_{зар},$$

где $I_{пор}$ – пороговая плотность мощности при которой начинается испарение материала ФКМ (для металлов, при воздействии DF излучением, составляет 10^6 Вт/см²) [3], $I_{зар}$ – порог развития электронной искры.

При работе в импульсном режиме времена воздействия составляют меньше миллисекунды, то целевую функцию можно считать не зависящей от времени. Следовательно, к установкам данного типа не предъявляется таких жестких требований по точности сопровождения. Поэтому импульсные ЛБЭУ [3] подходят для решения задачи борьбы с ФКМ.

Функциональная схема системы ЛБЭУ представлена на рис. 1.

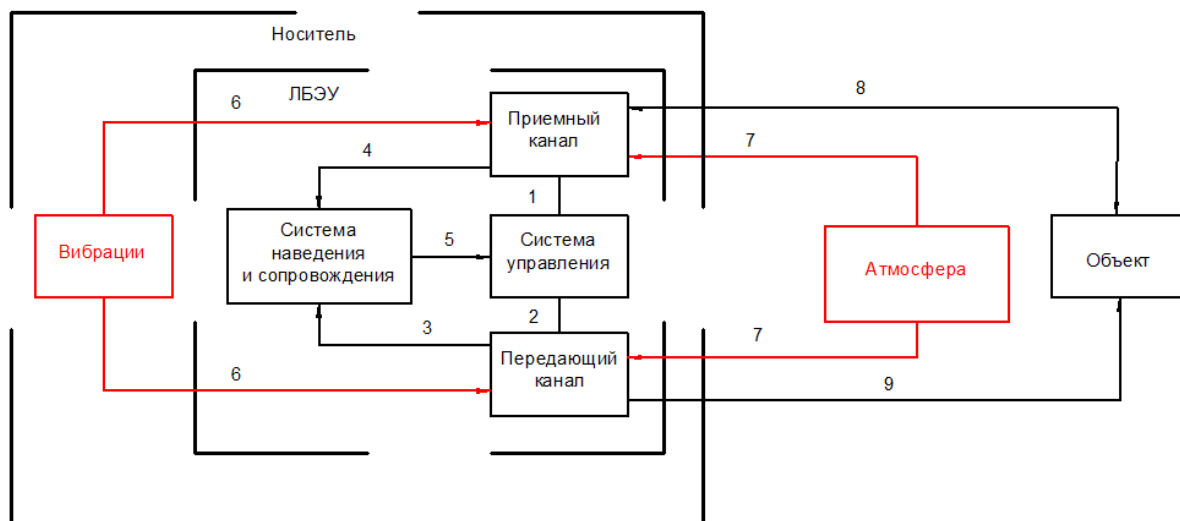


Рис. 1. Функциональная схема системы ЛК. Функциональные связи: 1 – приемный канал передает данные о цели системе управления; 2 – система управления выдает управляющие команды передающему каналу; 3,4 – система минимизации ошибок наведения и сопровождения получает информацию о разъюстировках приемного и передающего каналов; 5 – передача данных о разъюстировках системе управления; 6 – действие вибраций носителя на комплекс; 7,8 – действие атмосферы на точность определения координат цели приемным каналом и на излучение, генерируемое передающим каналом.

Задачи, решаемые подсистемами ЛБЭУ, приведены в табл. 1.

Табл. 1 - Описание задач, решаемых основными подсистемами ЛБЭУ.

Подсистема	Задача
Передающий канал	Формирование лазерного излучения с требуемой энергией, оптического качества и расходимости в заданном системой наведения и сопровождения направлении.

<i>Подсистема</i>	<i>Задача</i>
Приемный канал	Прием информации о фоноцелевой обстановке, ее преобразование и передача в систему наведения и сопровождения.
Система управления	Направлять, сформированное силовым лазерным модулем, излучение в заданную системой наведения и сопровождения точку пространства, осуществлять динамическую настройку (автоюстировку) ЛБЭУ.
Система наведения и сопровождения	Обнаружение целей. Передача команд по наведению и сопровождению системе управления. Передача данных о разъюстировках в приемном и передающем каналах системе управления.

Порядок работы ЛБЭУ:

Лазерный комплекс обнаруживает цель. Осуществляется первичное наведение на цель:

- 1) Система наведения и сопровождения формирует команды для наведения и передает их системе управления.
- 2) Система управления выдает управляющие команды на привода передающего канала.
- 3) Система наведения и сопровождения и система управления сопровождают цель.

После чего проводится уточнение координат цели с применением активных методов разведки (дальнометрирование) и повторное наведение на цель с учетом уточненных координат цели. Система наведения и сопровождения передает данные

о рассогласовании осей приемного и передающего каналов системе управления. Система управления осуществляет совмещение осей приемного и передающего каналов. Передающий канал осуществляет воздействие на удаленный объект.

В работах [1, 3] обосновано применение непрерывных химических лазеров (НХЛ) для борьбы с ФКМ. Химический HF лазер обладает большей энергией излучения, чем химический DF лазер, но так только как излучение молекул DF лежит в окне прозрачности земной атмосферы, то при работе в верхних слоях земной атмосферы необходимо использовать именно лазеры на молекулах DF [1].

Приведем основные преимущества импульсных ЛБЭУ на основе DF лазеров:

- 1) Спектр излучения молекулы DF лежит в окне прозрачности земной атмосферы.
- 2) Возможность осуществления воздействия лазерного излучения на удаленные объекты с верхней границы земной атмосферы, что позволяет избежать поглощения и рассеяния в атмосферных аэрозолях искусственного происхождения [8].
- 3) Точность сопровождения ЛБЭУ объекта может быть снижена из-за малых времен воздействия (до миллисекунды).
- 4) Лазеры на основе молекулы DF позволяют создавать на ФКМ плотность мощности I , достаточную для решения задачи борьбы с ФКМ ($I > I_{нор}$ [2, 3]).

Так как длительность импульса подобных установок лежит в диапазоне от миллисекунд до наносекунд, то целевую функцию (1) будем считать не зависящей от времени:

$$E_u = f(E_0, \sigma),$$

Генерируемую ЛБЭУ энергию можно представить в следующем виде:

$$E_0 = f(\alpha_i, \beta_n), i = 1..n,$$

где α – параметры системы передающего канала; n – количество параметров.

Общую ошибку наведения можно представить в виде аддитивной функции (рис. 2):

$$\sigma = \sigma_{np} + \sigma_{пер},$$

где σ_{np} – ошибка определения координат цели приемным каналом, $\sigma_{пер}$ – ошибка отработки целеуказания передающим каналом.

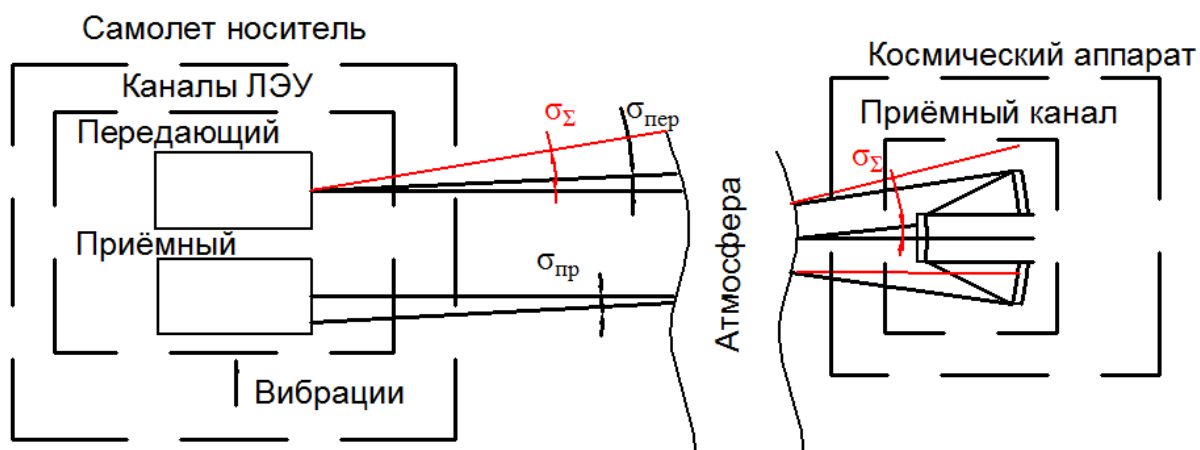


Рис. 2. Принципиальная схема передачи энергии ЛБЭУ на приемный канал КА.

Ошибки определения координат и отработки целеуказания:

$$\sigma_{np} = f(\gamma_i, \beta_m), i = 1..m,$$

$$\sigma_{пер} = f(\alpha_i, \beta_n), i = 1..n,$$

где γ – параметры системы приемного канала, m – количество параметров. Так как на установки, работающие в импульсном режиме, накладываются ограничения по плотности мощности создаваемой на объекте, то при разработке системы необходимо учитывать следующие ограничения [3]:

$$I_{\text{нор}} \leq I \leq I_{\text{зар}},$$

$$\sigma \leq \Delta,$$

где Δ – допустимая ошибка наведения.

2. Определение основных ТТХ ЛБЭУ на основе DF НХЛ для борьбы с ФКМ

В работе [1] описаны алгоритмы борьбы с космическим мусором. Сделан вывод, что из опасных ФКМ (размером от 1 до 10 см в поперечине) наибольшую угрозу представляют ФКМ из металлов с габаритными размерами $d_{\text{км}} = 10$ см. В работе [3] рассматривалась ЛБЭУ с высотой базирования 20 км, передающая энергию на приемную апертуру спутника (рис. 2) с орбитой 200-250 км. Размер приемной апертуры принимался равным $d_{\text{нр}} = 15$ м.

Плотность мощности, создаваемая на объекте должна лежать в диапазоне $I_{\text{нор}} \leq I \leq I_{\text{зар}}$ [8]. Для металлов значение $I_{\text{зар}}$ рассчитывается по формуле [10]:

$$I_{\text{зар}} > 1,8 \cdot 10^8 / \lambda^2,$$

где λ – длина волны излучения (DF лазер излучает в диапазоне 3,5..4,5 мкм).

Проведем оценку требуемой точности наведения ЛБЭУ. Найдем требуемую расходимость лазерного пучка для создания пятна с диаметром, равным $d_{\text{нр}}$ на расстоянии 250 км:

$$\varphi = \arctg(d_{\text{нр}}/L) = \arctg(15/250 \cdot 10^3) = 6 \cdot 10^{-5} \text{ (рад)}.$$

Считая, что расходимость равна дифракционному пределу, найдем значение выходной апертуры передающего канала ЛБЭУ:

$$D_{\text{вых}} = 1,22 \cdot \lambda / \varphi = 1,22 \cdot 4 \cdot 10^{-6} / 6 \cdot 10^{-5} = 0,08 \text{ (м)}.$$

Проведем оценку требуемой точности по методике, приведенной в работе [9].

На рис. 3 представлена зависимость плотности мощности, создаваемой ЛБЭУ на поверхности ФКМ, от ошибки наведения σ при работе на расстоянии 250 км. При расчетах был взят DF НХЛ [1,2] с параметрами импульса: $E_{\text{имп}} = 1,35$ Дж, $\tau_{\text{имп}} = 10$ нс.

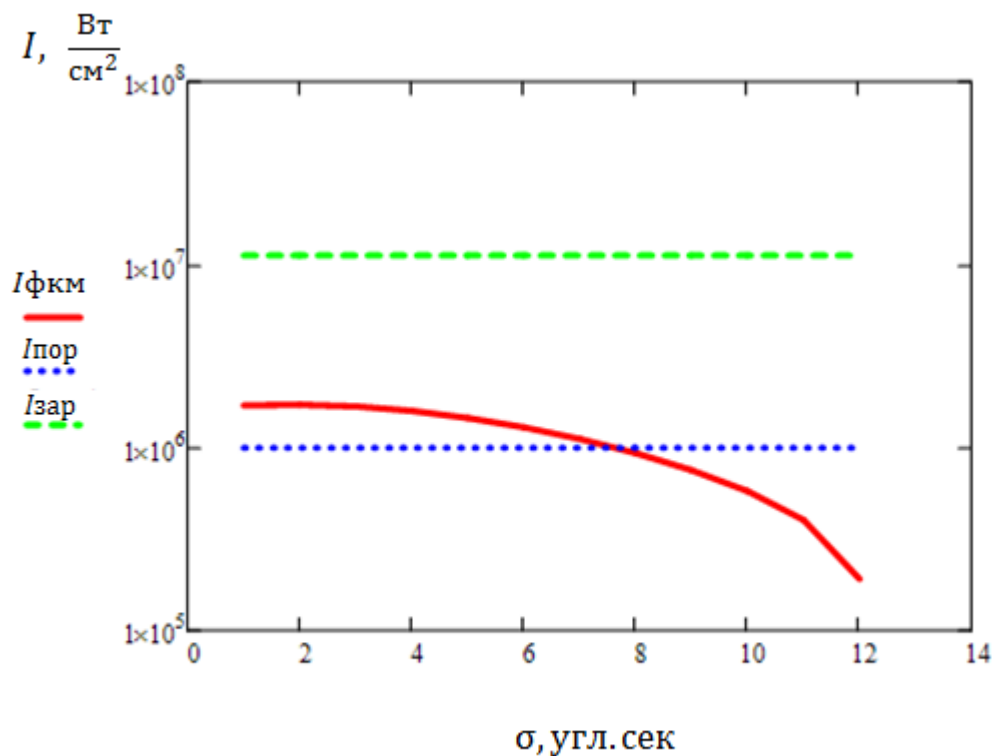


Рис. 3. Зависимость создаваемой на ФКМ плотности мощности $I_{\text{ФКМ}}$ от ошибки наведения ЛБЭУ при работе на расстоянии 250 км.

На рисунке 3 видно, что пороговая плотность мощности достигается при ошибке наведения $\Delta = 7,5$ угл. сек. Наиболее целесообразно снижение σ до 3 угл. сек., что соответствует превышению создаваемой плотности мощности на ФКМ

порогового значения на 39%. Дальнейшее повышение точности наведения не приводит к значительному росту плотности мощности, создаваемой ЛБЭУ на поверхности ФКМ.

В результате можно сделать вывод, что для решения поставленной задачи точность наведения должна лежать в диапазоне $3 \text{ угл. сек.} \leq \sigma \leq 7,5 \text{ угл. сек.}$.

3. Выводы

В работе проведено системное исследование ЛБЭУ для борьбы с ФКМ и передачи энергии. Разработана функциональная схема системы ЛБЭУ и сформулирован алгоритм работы установки. Выделены основные факторы, влияющие на эффективность подобных комплексов.

Проведен расчет плотности мощности на поверхности ФКМ, создаваемой ЛБЭУ на основе импульсно-периодического DF-НХЛ (энергия импульса 1,35 Дж, длительность 10 нс). Рассчитана требуемая выходная апертура передающего канала ЛБЭУ $D_{\text{вых}}=0,08$ (м). Определена допустимая ошибка наведения, которая составила $\Delta \leq 7,5$ угл. сек.. Сделан вывод, что ошибка наведения ЛБЭУ должна лежать в диапазоне $3 \text{ угл. сек.} \leq \sigma \leq 7,5 \text{ угл. сек.}$.

Библиографический список

1. Авдеев А.В., Башкин А.С., Каторгин Б.И., Парфеньев М.В. Анализ возможности очистки околоземного пространства от опасных фрагментов космического мусора с помощью космической лазерной установки на основе

- автономного непрерывного химического HF-лазера // Квантовая электроника. 2011. 41 (7). С. 669–674.
2. Авдеев А.В. К вопросу борьбы с космическим мусором с помощью лазерной космической установки на основе HF-НХЛ // Труды МАИ, 2012, №61: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35496>
 3. Ашурбейли И.Р., Лаговьер А.И., Игнатъев А.Б., Назаренко А.В. Возможности использования авиационной лазерной системы для борьбы с космическим мусором и поддержания орбит космического аппарата // Труды МАИ, 2011, № 43: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=24856>
 4. Барышников Н.В. Разработка методов и оптико-электронной аппаратуры автоюстировки бортовой локационной станции с мощным источником лазерного излучения: Автореферат дисс. ... доктора тех. наук. М.: 2012.
 5. Eric J. Jumper, Stanislav Gordeyev, David Cavalieri, Phil Rollins, Matthew Whiteley, and Matthew Krizo. "Airborne Aero-Optics Laboratory - Transonic (AAOL-T)", 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech, Kissimmee, Florida, 2015, January. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2015-0675>
 6. Червонкин А.П. Оптическая система многоспектральной моноапертурной оптиколокационной станции самолёта с динамической стабилизацией осей функциональных каналов: Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. М.: 2006.
 7. Brij Agrawal Improved beam jitter control methods for high energy laser systems//Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2009.

8. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. Т. 4. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1987. – 250 с.
9. Игнатъев А.Б. Вопросы обеспечения ориентации в пространстве и точного наведения мощного лазерного пучка на удаленные объекты: Учебное пособие. - М.: МИРЭА, 2004. – 87 с.
10. Бункин Ф.В., Прохоров А.М. Использование лазерного источника энергии для создания реактивной тяги // Успехи физических наук. 1976. Т.119. № 3, С. 425-446.
11. Campbell I.W. Project ORION: orbital debris removal using ground-based sensors and lasers // NASA Technical Memorandum 108522. 1996.