

激光远距离无线传能系统效率的分析与提高方法

李 密^{1,2*}, 齐 予^{1,2}, 易亨瑜^{1,2}, 尚建力^{1,2}, 黄吉金^{1,2}, 匡 艳^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 先进激光与高功率微波全国重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 激光具有亮度极高、方向性好的特殊优势, 因此有可能被用于远距离无线传能、发挥特殊的作用。为了延长高空无人机的飞行时间, 使用激光对高空无人机进行无线传能是一种理论上可行的方法。通过对激光无线传能技术的现状进行调研, 发现目前激光无线传能的距离不够远、传输功率和传输效率均不高。为解决这些问题, 首次提出了以掺 Yb 光纤激光器为光源、InGaAs 光伏电池为光电转换模块, 同时使用激光中继技术以实现激光远距离无线传能的技术路线。根据激光无线传能的工作流程, 调研了激光产生、传输、接收和光电转换等流程的效率, 在忽略天气状况、跟踪瞄准误差和激光强度不均匀等因素的前提下推算出使用激光对相距 60 km 的高空无人机进行无线传能的系统效率(电-激光-电的转换效率)可达 11%~14%。目前, 尚未发现有对激光远距离无线传能的系统效率进行定量计算的公开文献。同时, 对提高激光远距离无线传能系统效率的技术途径进行了初步的探讨, 为未来开展高功率激光远距离无线传能技术研究和设计激光无线传能系统提供了参考。

关键词: 激光器; 无线能量传输; 光伏电池; 光电转换效率; 激光中继技术; 系统效率

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240396

引用格式: LI Mi, QI Yu, YI Hengyu, et al. Analysis and enhance method on the system efficiency of laser wireless energy transmission at long distance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(1): 20240396.

李密, 齐予, 易亨瑜, 等. 激光远距离无线传能系统效率的分析与提高方法[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(1): 20240396.

0 引 言

激光是一种亮度极高、发散角极小的人造光源, 它具有方向性好、可以定向传输能量的特点。1968 年, 美国的 GLASER 博士首先提出了利用激光进行无线传能的设想^[1]: 在近地轨道或者同步轨道建设空间太阳能电站, 将太阳光转化为激光, 再发射到地面接收站, 通过光电转换变为电能进行使用或者存储。除了在空间太阳能电站方面的用途外, 激光无线传能技术还有许多其他的用途, 例如: 为处于背阴面的卫星和夜幕下的月球基地供能; 为空间飞行器提供变换轨道的动力; 对无人机和飞艇供能以延长飞行时间; 对在极端条件下工作的机器人供能从而使其正常工作等。由于激光无线传能技术的潜在影响力, 该技术受到了许多国家和科研机构的关注同时得到了持续的发展。1994 年, NASA 和美国国防部提出的 SELENE

计划拟在多地建立地面激光发射站, 对空间飞行器全覆盖供能以实现连续工作^[2]。2003 年, TAKEDA 等人对 100 m 距离远的月球车开展了激光无线传能验证实验取得了成功^[3]。2003 年, STEINSIEK 等人对地面上的小车开展了激光无线传能验证实验, 激光器的输出功率为 5 W, 激光的波长为 532 nm、使用 InGaP 光伏电池, 实现了小车的正常行驶, 光电转换效率达到 25%^[4]。2004 年, 欧洲提出了光可持续发展计划, 通过位于地球同步轨道的空间太阳能电站驱动激光器以产生高功率激光再向地球传送能量^[5]。2005 年, NASA 对小型飞行器开展了室外激光无线传能实验, 激光光源为 940 nm 的固体激光器, 输出功率为 300 W 和 500 W, 实现了小型飞行器的长时间续航^[6]。2007 年, KAWASHIMA 等人使用波长 808 nm、输出功率 200 W 的半导体激光器对电动风筝进行无线传

收稿日期: 2024-09-09; 修订日期: 2024-10-26

通讯作者: 李密, 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光技术方面的研究。

能, 电动风筝在空中的盘旋时间达到 1 h, 经光电转换输出的功率达到 40 W^[7]。2007 年, 萨斯卡彻温大学团队在由 NASA 举办的激光驱动太空电梯的比赛中获胜, 他们使用了 DILAS 研制的 10 kW 半导体激光器对太空电梯进行无线传能, 使太空电梯在 52 s 内爬升了 100 m^[8]。2009 年, LLNL 提出了一种新的空间太阳能电站向地面传输能量的设想, 同时对工程上需要解决的问题以及经济上的可行性进行了详细分析^[9]。2012 年, 洛·马公司和激光动力公司利用激光无线传能技术将 Stalker 无人机的续航时间从 2 h 延长到 48 h 以上^[10]。激光动力公司研制的便携式激光无线传能装置, 可以将数百瓦的激光功率传输到 1 km 以外的飞行器^[11]。2013 年, 美国海军研究实验室使用波长为 1070 nm、功率 2 kW 的单模光纤激光器对安装了 InGaAs 光伏电池的无人机进行无线传能, 获得了 160~190 W 的电功率, InGaAs 光伏电池的光电转换效率达到 40%~50%^[12]。山东航天电子技术研究所开展了飞艇之间的激光无线传能实验, 两个飞艇相距数十米, 实验获得最大电功率为 13.4 W, 传输效率达到 16%^[13]。2017 年, 日本提出了激光驱动汽车的设想^[14]。2019 年, 美国海军研究实验室与 Power Light 公司开展了激光无线传能技术演示, 激光器输出功率为 2 kW, 激光传输距离为 325 m, 实验获得了 400 W 的电功率^[15]。2020 年, 姚博文等人使用 910 nm、500 W 的光纤耦合激光器对相距 60 m 的单晶硅光伏电池进行无线传能, 光电转换效率达到了 15%^[16]。2023 年底, 美国国防部国防高级研究计划局委托雷神公司开发机载中继的激光无线传能系统^[17]。

综合上述文献可知, 激光无线传能技术虽得到了持续关注和研究, 但目前基本上还处于传输功率和传输效率不高、传输距离不够远的验证阶段, 要实现真正可用还有许多工程技术问题需要解决, 其中如何提升激光远距离无线传能的系统效率是需要重点关注的问题。

文中开展了激光远距离无线传能技术理论研究和分析, 提出了一条可能适合激光远距离无线传能的技术路线。根据激光无线传能的流程, 从激光的产生、传输、接收和光电转换等方面着手, 推算了激光远距离无线传能的系统效率, 对提高激光远距离无线传能系统效率的方法进行了初步探讨, 为未来开展高

功率激光远距离无线传能技术研究提供了参考。

1 激光远距离无线传能的技术路线

图 1 为地面激光器向空中飞行器传输能量的示意图, 地面激光器发射的激光束可以直接向空中飞行器传输能量, 也可以通过中继系统向空中飞行器传输能量, 是否采用中继系统将由激光器与空中飞行器的相对位置、飞行器的外形和光电转换模块的位置等因素决定。

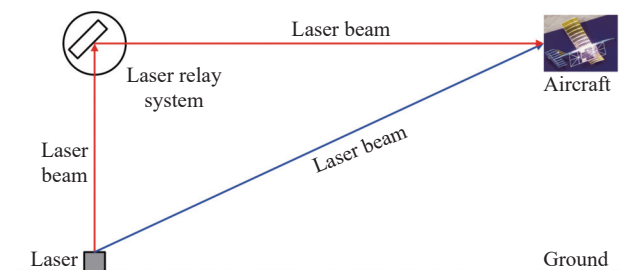


图 1 激光无线传能示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser wireless energy transmission

激光器和光伏电池的技术参数是影响激光远距离无线传能系统效率的主要因素, 因此需对激光光源和光伏电池进行比较和组合, 从中选择最适合远距离无线传能的组合。

目前, 高平均功率激光光源主要有二极管激光器、固体激光器、光纤激光器以及碱金属蒸汽激光器, 其中代表性的高平均功率激光器的主要技术参数如下: 以 DILAS 公司为代表的高平均功率半导体激光器的电光转换效率超过 60%、输出功率超过 10 kW, 快轴和慢轴方向的发散角分别为 6 mrad 和 30 mrad^[8]; 以诺·格公司为代表采用主振荡器功率放大 (MOPA) 和相干合成技术的 Nd:YAG 板条激光器输出功率超过 100 kW, 电光转换效率达到 19.3%, 光束质量因子 BQ 小于 3^[18]; 以 Trumpf 公司为代表的 Yb:YAG 薄片激光器的电光转换效率已经超过 30%、输出功率超过 10 kW、光束质量 M^2 因子为 1.76^[19]; 以 IPG Photonics 公司为代表的单纤单模光纤激光器的输出功率达到 20 kW^[20]; 以洛·马公司为代表的光谱合成的光纤激光器的输出波长为 1.07 μm 左右、电光转换效率高达 43%^[21]、最大输出功率为 300 kW^[22]; 以利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 为代表的碱金属蒸汽激光

器 (DPAL) 的输出功率达到 30 kW^[23]。

通过对上述激光器进行比较可知: 半导体激光器具有最高的电光转换效率, 但光束质量不好, 经过整形以后在两个方向的束参积均为 100 mm×1 mrad^[8], 当传输距离为 10 km 时光斑尺寸为 20 m×20 m, 因此接收端光电转换模块的面积将高达 400 m²; Nd:YAG 板条激光器和 Yb:YAG 薄片激光器的光束质量较好, 但前者电光转换效率小于 20%, 后者电光转换效率也只有 30%; DPAL 的电光转换效率很高, 但是技术难度比较大, 2017 年以后未见更高功率的报道; 基于光谱合成的光纤激光器的电光转换效率超过 40%, 光束质量因子 β 小于 2, 按照发射口径 100 mm 计算, 传输 10 km 以后光斑的直径仅为 0.5 m, 光斑面积仅为 0.2 m²。综合可知: 基于光谱合成的光纤激光器具有高光束质量、最高的输出功率和 40% 以上的电光转换效率, 适合作激光远距离无线传能的光源。

图 2 所示为主要光伏电池的光谱曲线^[2]。其中, GaAs 光伏电池在 0.84 μm 波长的光电转换效率最高将近 60%, Si 光伏电池在 0.92 μm 波长的光电转换效率最高为 40%, 但 GaAs 光伏电池比 Si 光伏电池贵得多。CuInSe₂ 和 GaSb 光伏电池的光电转换效率低于 30%, 虽然 AlGaAs 光伏电池在 0.58 μm 波长的光电转换效率最高可达 47%, 但是目前尚无该波段的高平均功率激光光源。根据 2013 年美国海军研究实验室的数据, 单芯片 InGaAs 光伏电池在 1.07 μm 波长的光电转换效率可以达到 40%~50%, 而且目前 InGaAs 光伏

电池已经实现商品化生产^[12]。

经综合分析, 文中最终选择波长为 1.07 μm 的高平均功率光纤激光器作为激光远距离无线传能的光源、InGaAs 光伏电池作为激光远距离无线传能的光电转换器件。

2 激光远距离无线传能的系统效率

激光无线传能系统主要由激光光源和光电转换模块组成, 在某些情况下还需要使用激光中继系统。激光无线传能的流程如下: 发电站提供电能驱动激光器, 激光器产生高平均功率和高光束质量的激光束, 激光束经过捕获跟踪瞄准 (Acquisition Tracking Pointing, ATP) 系统发射、直接传输或通过中继传输到达光电转换模块, 最终通过光电转换模块将激光能量转换为电能、使飞行器能够长时间工作。

因此, 激光远距离无线传能的系统效率 (电→激光→电的转换效率) η_t 可以表述如下:

$$\eta_t = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \quad (1)$$

式中: η_1 、 η_2 、 η_3 和 η_4 分别表示激光器电光效率、ATP 系统的发射效率、激光在大气中的传输效率和光电转换模块的光电转换效率, 而其中光电转换模块的光电转换效率又可以分解为光电转换模块对激光的接收效率 η_{4-1} 和光伏电池的光电转换效率 η_{4-2} 两个部分。

根据文献调研可知 η_1 为 40% 左右、 η_{4-2} 为 40%~50%, 根据中科院光电研究所的数据可知 η_2 为 97% 左右。 η_{4-1} 设计为 90%, 而 η_3 则与激光波长和激光传输的路径有很大的关系。

现在预计激光在大气中的传输效率 η_3 为 80% (下文将会给出该数据的推算过程), 再将上述各工作流程的传输效率代入到公式 (1) 即可计算出使用激光远距离无线传能的系统效率为 11%~14%。该计算结果未考虑天气状况、跟踪瞄准误差和激光强度不均匀性等的影响, 如果考虑这些影响, 系统效率将低于上述值。

3 激光远距离无线传能的优化设计

由公式 (1) 可知, 提高 η_1 、 η_2 、 η_3 和 η_4 即可提高激光无线传能的系统效率。由于激光器的电光效率和

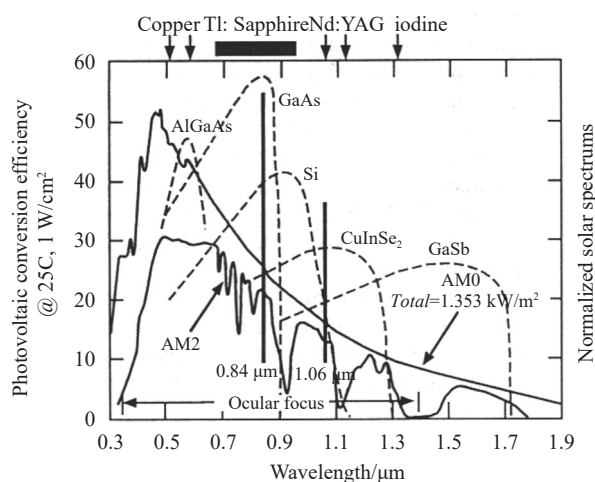


图 2 主要光伏电池的光谱响应曲线

Fig.2 Spectral response curves of main photovoltaic cells

ATP 系统的发射效率难以进一步提高, 因此提高激光在大气中的传输效率和光电转换模块的光电转换效率对提高激光远距离无线传能的系统效率更具有可行性。

如图 3 所示, 如果激光器与飞行器的连线与地面夹角较小, 不仅大幅增加激光在对流层中的传输距离、导致激光传输效率下降, 而且有可能因为障碍物的影响, 导致激光无法直接传输到飞行器。因此, 在进行激光远距离无线传能时, 使用激光中继技术不仅可以提高激光在大气中的传输效率、进而提高激光无线传能的系统效率, 而且可通过重新定向传输到由于障碍物而无法直接传输到的飞行器, 从而大大拓宽了激光无线传能的使用场景。

图 4 为激光中继技术的原理示意图, 激光中继系统的光学部分主要有接收望远镜、发射望远镜、变形

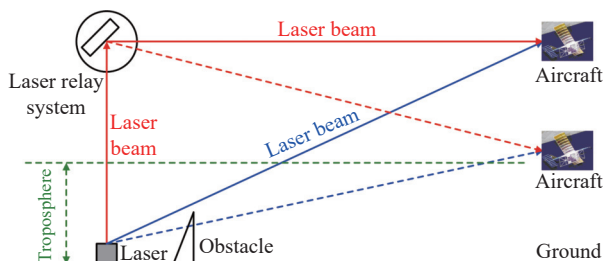


图 3 激光中继传输和直接传输的对比示意图

Fig.3 Schematic diagram of comparison between laser relay transmission and direct transmission

镜以及快速反射镜。地面激光器产生的激光经过 ATP 系统之后近似竖直向上传输到激光中继系统, 被接收望远镜缩束以后入射到变形镜表面, 经过变形镜进行光束质量校正以后再传输到发射望远镜进行扩束, 最终由快速反射镜重新定向发射到目标飞行器。

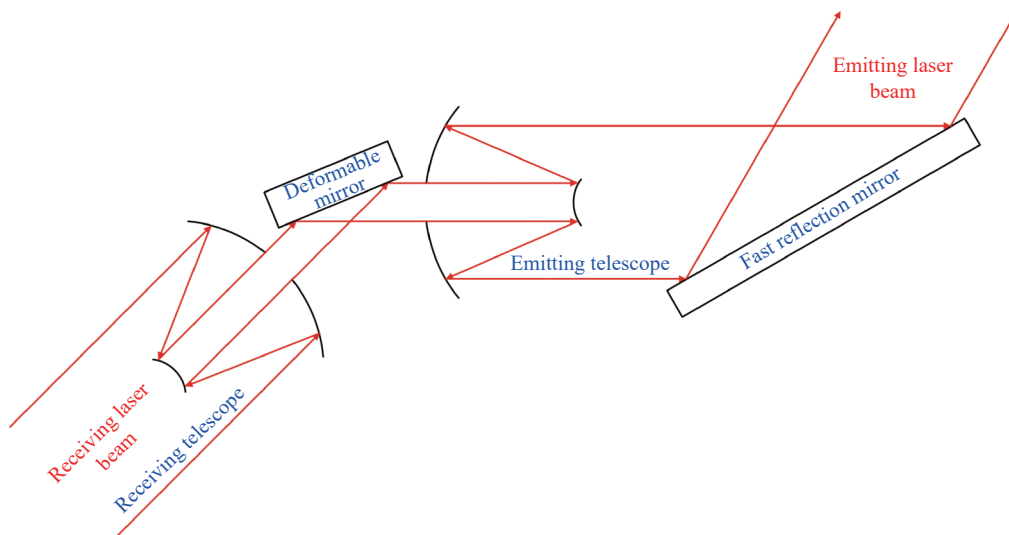


图 4 激光中继技术的原理示意图

Fig.4 Principle sketch map of laser relay technology

目前, 使用卡塞格林结构的望远镜的传输效率可以达到 98%, 而变形镜和快速反射镜的反射率则可以达到 99.5% 以上, 因此整个激光中继系统的传输效率可以达到 95%。

李建玉等人测量了 $1.064\ \mu\text{m}$ 和 $1.315\ \mu\text{m}$ 这两种波长的激光在大气中的透过率^[24], 发现 $1.064\ \mu\text{m}$ 波长激光比 $1.315\ \mu\text{m}$ 波长激光的大气透过率略高, 如图 5(a) 所示。胡晓磊给出了 $1.315\ \mu\text{m}$ 波长激光在不同发射仰角和不同传输高度时的大气透过率^[25], 如

图 5(b) 所示。综合图 5 中的数据可以认为 $1.07\ \mu\text{m}$ 波长的激光和 $1.315\ \mu\text{m}$ 波长的激光在大气中的传输特性基本一致。

根据图 5(b) 可知, 如果飞行器和激光器连线与地面夹角为 20° 、飞行高度为 $20\ \text{km}$ (飞行器与激光器相距大约 $60\ \text{km}$): 采用激光直接传输到飞行器的方式, $1.07\ \mu\text{m}$ 波长激光的大气透过率仅有 60%; 如果使用激光中继技术, 中继系统位于激光器上方 $20\ \text{km}$ 处, 激光从地面传输到中继系统时的传输效率为 84%, 中

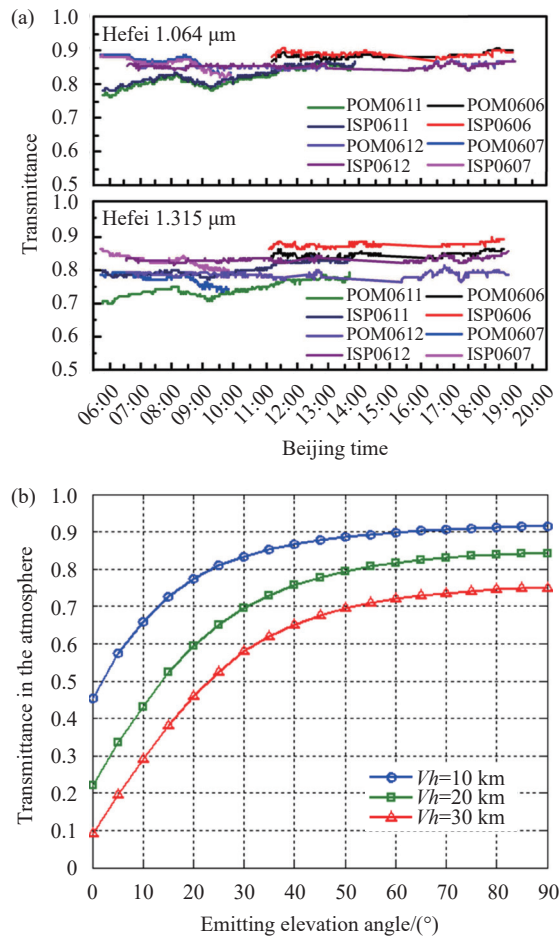


图5 (a) 不同波长激光的大气透过率; (b) 不同发射仰角时激光的大气透过率

Fig.5 (a) Atmospheric transmittances of lasers with different wavelength; (b) Atmospheric transmittances of laser at different emission elevation angles

继系统自身的传输效率为 95%, 两者相乘即可知激光通过中继系统传输到飞行器时的大气传输效率可以达到 80% 左右 (这与前文的预计一致)。

激光强度不均匀将会导致光电转换模块的光电转换效率下降^[26], 为提高光电转换效率可以采取两种方法: 一是对光伏电池组进行合理化布局; 二是设法提高激光强度的均匀性。

激光经过远距离传输后的强度分布通常为中间强、边缘弱, 因此可以参考图 6 中的环形布局对光伏电池进行排布: 激光强度相同或很接近的区域内的光伏电池相互串联, 再与激光强度差异大的区域内的光伏电池组并联, 从而同时提高输出电压和增大输出电流。

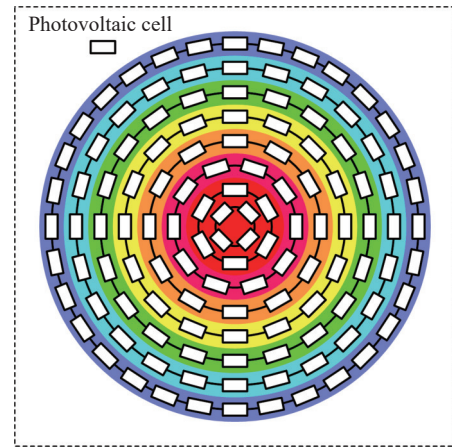


图6 光伏电池布局示意图

Fig.6 Schematic diagram of photovoltaic cells layout

为了提高光电转换模块上激光强度分布的均匀性, 可考虑采用相控阵技术^[27-29]。首先将光束分为若干个子光束, 再对每个子光束进行精确的相位调制, 就可以实现光束传输特性的主动控制、提高激光强度的均匀性, 使得不同光伏电池的工作负荷和温度更加接近, 多孔径光学相控阵系统如图 7 所示。由于工作温度对光伏电池的光电转换效率有直接影响^[30], 因此提高光伏电池表面激光强度分布的均匀性不仅可以提高光电转换模块的光电转换效率, 而且便于对光电转换模块实施更好地温度控制。

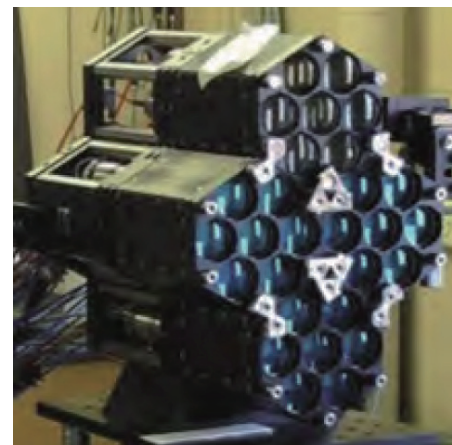


图7 多孔径光学相控阵系统^[27]

Fig.7 Multi-aperture optical phased array system^[27]

综合以上的分析可知: 在使用激光对高空无人机进行远距离无线传能时, 使用激光中继技术、对光伏电池进行合理布局、使用相控阵技术提高激光远场强度分布的均匀性均有助于提高激光远距离无线传能

的系统效率。

4 结 论

常规飞行器的视场受到飞行高度的限制而不够大,低轨卫星由于电离层的影响导致观测精度下降,在临近空间(距地面 20~100 km)进行对地观测则可以同时满足大视场和高精度的需求。此外,类地行星发射的紫外光传输到地面高度 30 km 处时几乎没有损耗,在此高度对类地行星进行观测的效果远远超过从地面对类地行星进行观测。太阳能高空无人机是为数不多的可以抵达临近空间的飞行器,相比利用太阳获取能量,通过激光对太阳能高空无人机进行远距离传能具有能量密度高、夜间也能够补充能量的优势,从而有效延长无人机的续航时间,在某些特殊场合发挥重要的作用。目前,激光光源技术和光伏电池技术基本满足了激光远距离无线传能的需要,但是激光中继技术还存在很多问题,其中,高精度快速跟踪瞄准能力是影响激光传能效率的主要因素。激光传能的距离越远,对跟踪瞄准精度的要求越高。未来需要对激光中继技术进行深入研究和验证。

文中调研了激光无线传能技术的发展历程和研究进展,开展了激光远距离无线传能技术的理论研究。通过对激光器和光伏电池的参数进行比较,提出了一条可能适用于激光远距离无线传能的技术路线,再根据激光无线传能的工作流程定量地推算了激光远距离无线传能的系统效率,目前尚未发现有公开文献对此进行定量地分析和计算。在不考虑天气状况、跟踪瞄准误差和激光强度分布不均匀等因素的前提下采用该技术路线对相距 60 km 的太阳能高空无人机进行激光无线传能的系统效率可以达到 11%~14%。如果以输出激光功率为参考,激光无线传能的效率可达 30%~40%。文中还对提高激光远距离无线传能系统效率的技术途径进行了初步的探讨,例如激光中继技术、光伏电池布局和光学相控阵技术等,为未来开展高功率激光远距离无线传能技术研究以及建设高功率激光远距离无线传能装置提供了参考。

参考文献:

[1] GLASER P E. Power from the sun: its future [J]. *Science*, 1968, 162(3856): 857-861.

- [2] BENNETT H E, RATHER J D G, MONTGOMERY E E. Free electron laser power beaming to satellites at China Lake, California [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1994, 341: 124-131.
- [3] TAKEDA K, KAWASHIMA N. 100 m laser energy transportation experiment to a model rover to explore the ice on the moon [J]. *Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2003, 51(594): 393-396.
- [4] STEINSIEK F, WEBER K H, FOTH W P, et al. Wireless power transmission experiment as an early contribution to planetary exploration missions[C]//54th International Astronautical Congress, 2003.
- [5] European Space Agency. Solar power from space: european strategy in the light of sustainable development[R]. Paris: ESA, 2004.
- [6] BLACKWELL T. Recent demonstrations of laser power beaming at DFRC and MSFC [J]. *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 2005, 766: 73-85.
- [7] KAWASHIMA N, TAKEDA K, YABE K. Application of the laser energy transmission technology to drive a small airplane [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(S1): S109-S110.
- [8] TREUSCH G, KOENNING T, SHELEF B. High-power diode laser boost power-beaming competition [J]. *Laser Focus World*, 2008, 44(3): 75-79.
- [9] RUBENCHIK A M, PARKER J M, BEACH R J, et al. Solar power beaming: from space to earth[R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 2009.
- [10] STAFF W. Lockheed martin performs first ever outdoor flight test of laser powered UAS [EB/OL]. (2012-08-07) [2024-09-01]. <https://www.defensedaily.com/lockheed-martin-performs-first-ever-outdoor-flight-test-of-laser-powered-uas/un categorized>.
- [11] YANG S F, LIN L X. Key technology and application of laser beaming motivation [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(5): 477-481. (in Chinese)
- [12] PHILIP S, BAHMAN H, ANTONIO T, et al. High power lasers for directed-energy application [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(31): F201-F209.
- [13] SHI D L, ZHANG L L, MA H H, et al. Research on wireless power transmission system between satellites [C]//IEEE Conference Proceedings, 2016:1-4.
- [14] TOMOYOSHI M, YASUHIKO T, HIROSHI I, et al. Concept of the solar-pumped laser-photovoltaics combined system and its application to laser beam power feeding to electric vehicles [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56: 08MA07.
- [15] EMANUEL C. Researchers transmit energy with laser in

- 'Historic' power-beaming demonstration[EB/OL]. (2019-10-28) [2024-09-01]. <https://phys.org/news/2019-10-transmit-energy-laser-historic-power-beaming.html>.
- [16] YAO Bowen. Design and implementation of laser wireless energy transmission and charging device [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [17] LOZ Blain. Raytheon to create DARPA's airborne "wireless internet for energy" [EB/OL]. (2023-12-14) [2024-09-01]. <https://newatlas.com/military/raytheon-airborne-wireless-power>.
- [18] WICKHAM M. Coherent beam combining of fiber amplifiers and solid-state lasers and including the use of diffractive optical elements [C]//IEEE Conference Proceedings, 2010: 1-2.
- [19] NAGEL S, METZGER B, BAUER D, et al. Thin-disk laser system operating above 10 kW at near fundamental mode beam quality [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 965-968.
- [20] SHINER B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market[C]//CLEO, 2013.
- [21] JEN J. US Army gets world record-setting 60 kW laser [EB/OL]. (2017-03-16) [2024-09-01]. <https://www.defensenews.com/digital-show-dailies/global-force-symposium/2017/03/16/us-army-gets-world-record-setting-60kw-laser/>.
- [22] EVERSDEN A. Lockheed Martin delivers 300 kilowatt laser to defense department [EB/OL]. (2022-09-16) [2024-09-01] <https://breakingdefense.com/2022/09/Lockheed-Martin-delivers-300-kilowatt-laser-to-defense-department>.
- [23] WISOFF P J. Diode pumped alkaline laser system: a high powered, low SWaP directed energy option for ballistic missile defense high-level summary[R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 2017.
- [24] LI J Y, LIU Q, XU W Q, et al. Solar radiometer for measurement of multi-waveband laser atmospheric transmittance [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2): 261-270. (in Chinese)
- [25] HU X L. Research on the combat concept on anti-hypersonic target with laser relay mirror system [J]. *Air Force Equipment Research*, 2015, 9(1): 1-4. (in Chinese)
- [26] LIU X G, HUA W S, LIU X, et al. Design of photovoltaic receiver with high circuitry efficiency for laser wireless power transmission system [J]. *Laser Journal*, 2015, 36(12): 100-103. (in Chinese)
- [27] TIAN B Y, PENG Y N, HU Q Q, et al. Review of optical phased array technology and its applications [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35(4): 041001. (in Chinese)
- [28] MA Y X, WU J, SU R T, et al. Review of optical phased array techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20201042. (in Chinese)
- [29] DING J. Review of the latest research progress of the optical phased array technology [J]. *Flight Control & Detection*, 2020, 3(6): 11-33. (in Chinese)
- [30] LI W, WU L Y, WANG W P, et al. Power conversion efficiency of photovoltaic cells in semiconductor laser wireless power transmission [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(11): 119001. (in Chinese)

Analysis and enhance method on the system efficiency of laser wireless energy transmission at long distance

LI Mi^{1,2*}, QI Yu^{1,2}, YI Hengyu^{1,2}, SHANG Jianli^{1,2}, HUANG Jijin^{1,2}, KUANG Yan^{1,2}

(1. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;

2. National Key Laboratory on Advanced Laser and High Power Microwave, Mianyang 621999, China)

Abstract:

Objective With the increasing emphasis on near space in various countries, the importance of high-altitude drones with the ability to fly in near space is also increased. In order to obtain more accurate real-time information, it is necessary to significantly extend the flight time of high-altitude drones. Using laser wireless energy transmission technology to transmit energy to high-altitude drones is a feasible route to extend their flight time. Therefore, this paper conducted theoretical research on laser wireless energy transmission technology at long distance and analyzed the feasibility of using laser for wireless energy transmission to high-altitude drones in theory.

Methods The current problems such as insufficient transmission distance, low transmission power and low transmission efficiency on laser wireless energy transmission are found by investigating the current development status on laser wireless energy transmission technology at home and abroad. In order to enhance the transmission distance, transmission power and transmission efficiency of laser wireless energy transmission, the technical route for wireless energy transmission to high-altitude drones is proposed by comparing the laser source and photovoltaic cells, which using Yb doped fiber laser as the laser source, InGaAs photovoltaic cell as the photoelectric conversion module and combining laser relay technology. Based on the workflow of laser wireless energy transmission, the efficiencies of multiple workflows such as laser generation, transmission, reception and photoelectric conversion are analyzed, and then the system efficiency of using this technical route for laser wireless energy transmission to high-altitude drones is calculated. At the same time, the technical approaches to enhance the system efficiency of laser wireless energy transmission are discussed preliminary.

Results and Discussions According to the workflows of laser wireless energy transmission and based on the investigation of efficiencies in multiple workflows such as laser generation, transmission, reception and photoelectric conversion, the system efficiency of wireless energy transmission to high-altitude drones at the distance of 60 km can reach 11% to 14% by using the technical route proposed in this paper, which demonstrates the feasibility of laser wireless energy transmission to high-altitude drones at long distance theoretically. At present, the high power laser sources and InGaAs photovoltaic cells have basically met the requirements of wireless energy transmission at long distance, but the laser relay technology is still immature and requires in-depth research. The technical approaches to enhance the system efficiency of laser wireless energy transmission at long distance are discussed preliminarily. Besides the laser relay technology (Fig.3), the rational layout of photovoltaic cell arrays (Fig.6) and the phase modulation to laser beam by using phased array technology (Fig.7) also can enhance the system efficiency of laser wireless energy transmission.

Conclusions The laser wireless energy transmission technology is a feasible solution to extend the flight time of the high-altitude drones. The investigation on the progresses of laser wireless energy transmission technology and the analysis on the current problems of laser wireless energy transmission technology are conducted in this paper. In order to solve the problems such as insufficient distance, low transmission power and low transmission efficiency of laser wireless energy transmission, a technical route is proposed to enhance the system efficiency of laser wireless energy transmission for the first time by using Yb doped fiber lasers as the laser source, InGaAs photovoltaic cells as the photoelectric conversion module and combining laser relay technology. The efficiencies of multiple workflows on wireless energy transmission are investigated and estimated, and then the system efficiency of ground laser wireless energy transmission to high-altitude drones at the distance of 60 km can reach 11% to 14% by calculation, which proves the feasibility of transmitting energy to high-altitude drones by laser theoretically. At present, the quantitative analysis and calculation about the system efficiency of laser wireless energy transmission at long distance aren't found in public literatures. At the same time, the technical approaches to enhance the system efficiency of laser wireless energy transmission at long distance are discussed preliminarily, such as reasonable layout of photovoltaic cell groups and using phased array technology to improve the uniformity of laser intensity distribution, which provides reference to the research on high power laser wireless energy transmission at long distance in future.

Key words: laser; wireless energy transmission; photovoltaic cell; photoelectric conversion efficiency; laser relay technology; system efficiency