

无人机匹配地形飞行的无线紫外光引导方法

赵太飞^{1,2*}, 刘萍², 马倩文²

¹陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710000;

²西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 使用紫外光引导无人机飞行, 具有抗干扰能力强、全天候非直视通信、保密通信能力强和适用于特殊场合等优点。因此, 提供一种无人机匹配地形飞行的无线紫外光引导方法, 以辅助无人机匹配不同地形飞行。提出一种基于紫外光的光功率控制方法, 调整紫外信标发送端的角度和发射功率, 使得到达无人机飞行平面的紫外光的功率相等, 从而保障无人机安全飞行。对功率控制方法进行了计算机仿真。实验结果表明, 紫外光 LED 发送张角不超过 80° 时, 功率容易控制, 信标集成易于实现, 且受地形、高度等因素影响较小。

关键词 光通信; 无线紫外光; 紫外信标; 功率控制; 地形匹配

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0206001

Wireless Ultraviolet Guided Method of Unmanned Aerial Vehicle Matching Terrain Flight

Zhao Taifei^{1,2*}, Liu Ping², Ma Qianwen²

¹ Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an, Shaanxi 710000, China;

² Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract Ultraviolet light guided flight offers many advantages for unmanned aerial vehicles (UAVs), such as strong anti-interference ability, all-weather operation, non-line-of-sight communication, strong secure communication ability, and suitability to special situations. This study presents a wireless ultraviolet guided method that assists UAV matching of different terrain flights, and proposes a control method of optical power based on ultraviolet light. By adjusting the angle and power of the transmitter of the ultraviolet beacon, the power of the ultraviolet light reaching the flight plane of the UAV is equalized, thereby ensuring the safety of the UAV flight. The power control method is simulated on a computer. When the transmission angle of the ultraviolet LED is 80° or less, the power is easily controlled; moreover, the beacon integration is easily achieved and is less affected by the terrain and height, among other factors.

Key words optical communications; wireless ultraviolet; ultraviolet beacon; power control; terrain matching

OCIS codes 060.4510; 060.2605; 140.3610

1 引 言

随着现代通信技术的发展, 无人机(UAV)体积小、成本低且具有准确、高效、灵活的作业能力, 在战争、航空勘测和农药喷洒等领域中发挥着显著的作用。导航系统作为一项关键技术也日益受到重视,

惯性/卫星组合导航(INS/GPS)方式结合了惯性导航系统(INS)和卫星导航系统(GPS)的优势, 可以为无人机提供长时间高精度的定位和导航信息^[1]。无人机执行诸如侦察监视、航空勘测、喷洒农药等任务时, 要求地形匹配系统能够适应更加多样的应用环境。地形匹配作为一种根据地形高程特征

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-08-03; 录用日期: 2019-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(U1433110)、陕西省重点产业链创新计划项目(2017ZDCXL-GY-05-03)、陕西省教育厅服务地方专项计划(17JF024)、特殊环境机器人技术四川省重点实验室开放基金(17kftk04)、西安市科学计划项目(CXY1835(4))、西安市碑林区科技计划项目(GX1617)

* E-mail: zhaotaifei@163.com

进行定位的辅助导航技术,是实现无人机自主导航和安全飞行的重要途径。

文献[2]采用桑迪亚惯性地形匹配算法,修正了战斗机与地形的相对位置误差,但该算法对起伏较大的地形并不适用。文献[3]采用激光雷达勘测地面实现无人机地形匹配,但激光通信要求收发端严格对准且受天气影响较大。近年来,我国在地形匹配技术的研究和应用方面也取得了一定的成果^[4-5]。

光电引导技术精度高,测量误差小^[6]。文献[7]提出了一种基于扩展卡尔曼滤波的 INS/光流/磁强计/气压计组合导航方案,有效解决了速度、位置和姿态估计的累积误差问题。无线紫外光(UV)通信作为一种新型的通信方式,是利用紫外光在大气信道中的散射进行通信的。它具有非直视通信、抗干扰能力强、全天候工作等优点,可以在复杂的通信环境中传播信息。使用无线紫外光作为无人机导航的引导光源,在一定程度上弥补了 GPS 导航的缺陷。文献[8]中搭载紫外成像系统使用紫外光进行人员搜救。文献[9]基于信号到达角度(AOA)的三维空间定位算法和四节点三维空间定位算法,实现了无

人机在低空环境中的三维定位。文献[10]将紫外光用于无人机装甲编队,多采用中继辅助方式建立协作通信链路,提高了通信链路质量,为无人机飞行引导提供了指导。本文提供了一种无人机匹配地形飞行的无线紫外光引导方法,无人机可以根据接收到的紫外光判断自身位置、地形等信息。并提出一种紫外光功率控制算法,使得到达无人机飞行平面的紫外光功率相等,从而辅助无人机安全飞行。

2 无线紫外光引导的无人机地形匹配系统

无线紫外光引导系统如图 1 所示,包括信号发送机、大气信道和信号接收机三大模块。发送机及信标引导装置里包括编码模块、调制模块、驱动电路和紫外 LED。接收机端包括 PMT(Photomultiplier)、译码模块、功率测量模块和运算模块,功率测量模块中包括三轴传感器。收发端这些模块依次通过电信号连接。信号发送机安装在地面信标引导装置上,信号接收机搭载在无人机上。

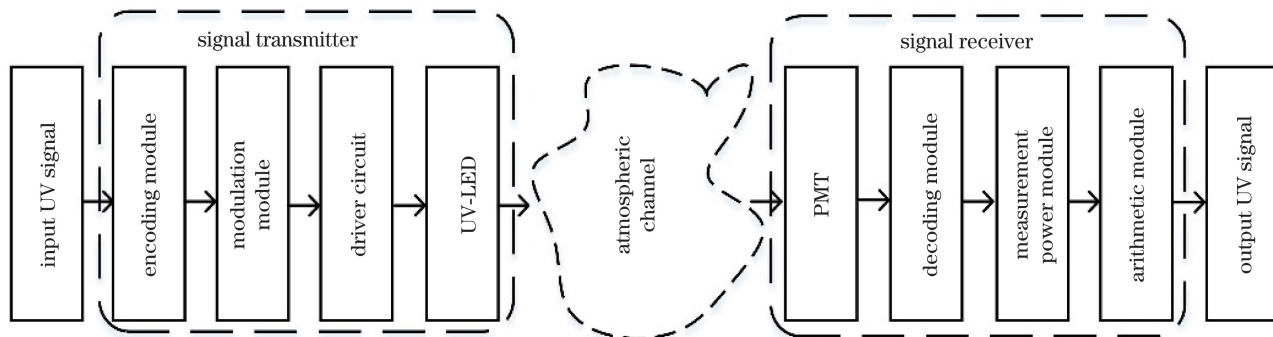


图 1 无线紫外光引导系统

Fig. 1 Wireless UV guidance system

图 2 所示信标引导装置为一个半球形紫外光 LEDs,被纵横相交的经纬线包围,经纬线交点处安装紫外 LED。每个 LED 都有不同的 ID 编号,此 ID 编号的第一位数字代表其经线号,第二位数字代表其纬线号,在每颗 LED 被点亮时,该 LED 即通过一定的编码方式发送包含有自身 ID 的信息^[11]。LED 的经纬编号确定以后,LED 发出的紫外光锥在固定高度处的位置也是确定的,将对应位置的地形信息录入该 LED 中,无人机飞行在该位置时,就可以根据接收到的紫外光获取对应地形信息,调整自身飞行姿态达到地形匹配的目的。

如图 3 所示,将多个信标引导装置安装在无人机飞行区域地面上的四个角,紫外光 LEDs 发出紫

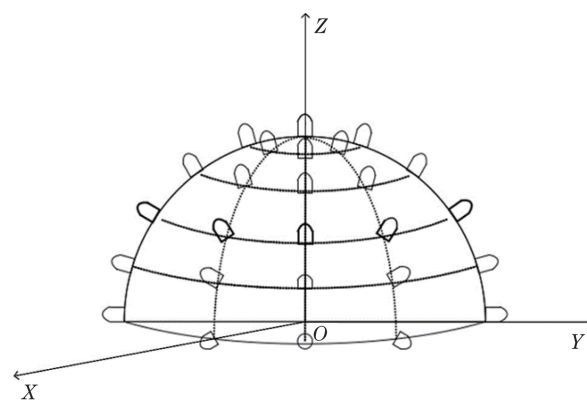


图 2 半球型紫外 LEDs 示意图

Fig. 2 Schematic of semi-spherical UV LEDs

外光覆盖在该区域上空。将平坦地形、模拟斜坡地

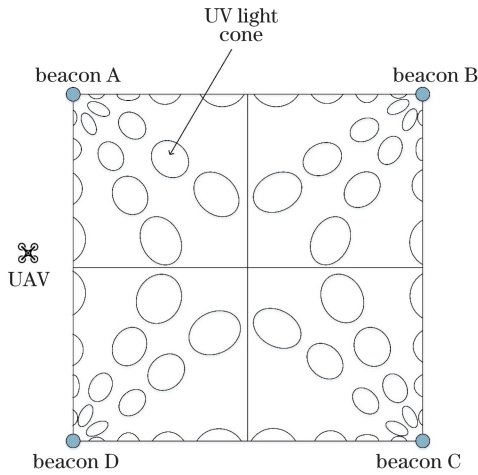


图 3 紫外光引导无人机匹配地形飞行示意图

Fig. 3 Diagram of UV-guided UAV matching terrain flight
地形、起伏地形等地形函数录入无人机运算模块,无人机根据接收到的紫外光功率和 LED 编码,可以获取

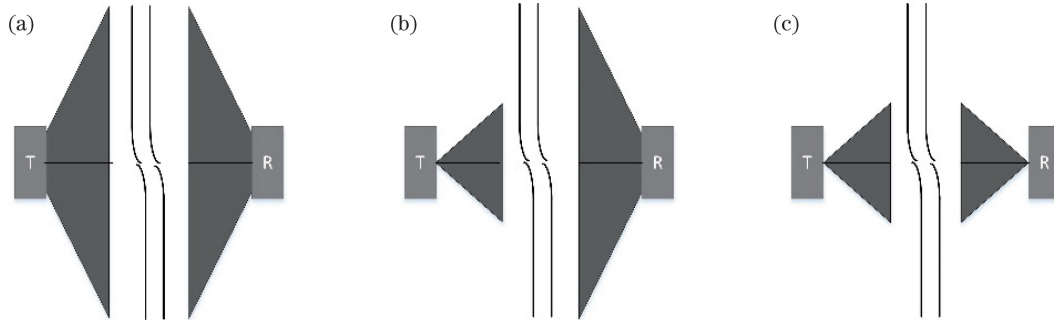


图 4 紫外光直视通信链路模型^[12]。(a) LOS(a); (b) LOS(b); (c) LOS(c)

Fig. 4 UV line-of-sight communication link model^[12]. (a) LOS(a); (b) LOS(b); (c) LOS(c)

无线紫外光直视链路在大气自由空间中的功率呈指数衰减。自由空间路径损耗与 r^2 成正比,通信距离 r 越大,路径损耗越大,接收到的能量与 r^2 成反比,即 $\left(\frac{\lambda}{4\pi r^2}\right)^2$ 。大气衰减可表示为 $\exp(-K_e r)$,探测器的接收增益为 $\frac{4\pi A_r}{\lambda^2}$ 。综合这些因素的影响,直视情况下无线紫外光通信链路的接收光功率的表达式^[13]为

$$P_r = \frac{P_t A_r}{4\pi r^2} \exp(-K_e r), \quad (1)$$

式中: P_t 为发射光功率; r 为发射端与接收端之间的基线距离; λ 为无线紫外光的波长; K_e 是大气信道衰减系数; A_r 为接收端孔径面积。

如图 5 所示,地形平坦时,设无人机位于坐标为 (x, y, r) 的 A 点,则紫外 LED 发送方向在 XOY 平面内的投影与 x 轴方向的夹角设为 α ,紫外 LED 发送端在 YOZ 平面上的投影与 z 轴方向的夹角设

自身的位置信息,然后根据自身位置和地形函数调整自身飞行姿态。

3 无线紫外光地形匹配关键技术

3.1 无线紫外光功率控制算法

紫外光通信是发射装置发射出载有信息的紫外光,紫外光被大气信道中的气溶胶等微粒散射,最终被紫外接收装置探测接收。紫外光信号在传输过程中受到强烈散射作用,因此紫外光通信不仅可以实现直视通信,也可以实现非直视通信^[12]。

根据发射端光束的发散角和接收视场角的对应关系,无线紫外光直视通信可以分为三种类型:直视(LOS)通信下的(a)类通信方式 LOS(a)、直视通信下的(b)类通信方式 LOS(b)、直视通信下的(c)类通信方式 LOS(c)。无线紫外光直视通信链路模型^[12]如图 4 所示。

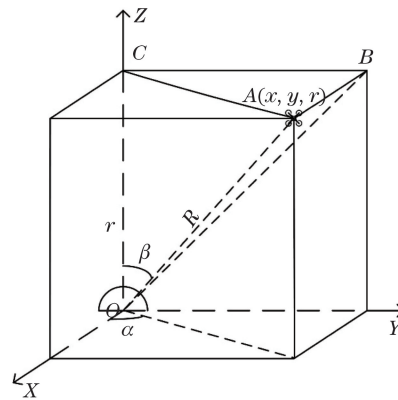


图 5 紫外信标与无人机通信示意图

Fig. 5 Diagram of UV-beacon and UAV communication
为 β 。 α 表示方位角, β 代表发射张角。

分析空间几何关系可得

$$R = \frac{r}{\cos \beta}. \quad (2)$$

假设无人机飞行高度为 r , z 轴上紫外光 LED 发射功率为 P_r ,其余方向的紫外 LED 的发送功率

为 P_T , 则有

$$P_T = \frac{P_r 4\pi R^2}{A_r} \exp(K_e R). \quad (3)$$

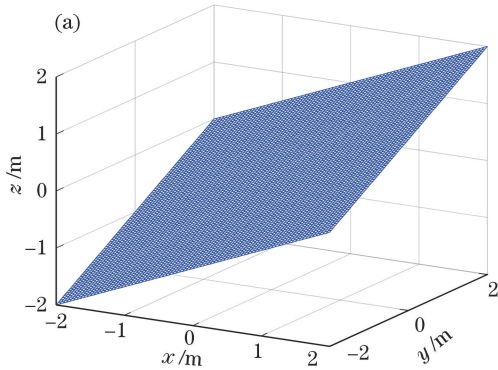
若要求高度 r 处接收光功率相等, 则根据(1)、(2)、(3)式可得

$$\frac{P_T}{P_i} = \frac{1}{\cos^2 \beta} \exp \left[K_e r \left(\frac{1}{\cos \beta} - 1 \right) \right]. \quad (4)$$

将该系统用于地面勘测、农药喷洒等特殊场合, 无人机可能会受斜坡、丘陵等地形的影响, 需要根据地形调整自身飞行姿态。安置在飞行区域四个角的紫外信标既可以辅助无人机测距定位, 也可以为无人机地形匹配提供引导。如图 5 所示, 无人机飞行高度 r 处的任意一个紫外 LED 光锥的圆心坐标为 (x, y, r) , 紫外 LED 与 X 轴方向的夹角 α , 紫外 LED 与 Z 轴方向的夹角 β , 则有

$$\begin{cases} x = R \sin \beta \cos \alpha \\ y = R \sin \beta \sin \alpha \\ r = R \cos \beta \end{cases} \quad (5)$$

无人机可以根据接收到的紫外光进行译码, 获



取对应 LED 的 α 和 β , 判定自身飞行位置信息; 不同位置对应着不同的地形信息, 无人机根据地形信息调整自身飞行姿态。

无线紫外光地形匹配图如图 6(a)所示。假设地表服从线性分布 $z=k(x+y)$, 其中 $x=r \tan \beta \cos \alpha$, $y=r \tan \beta \sin \alpha$, k 为斜坡系数, 则模拟斜坡地形的紫外光功率控制公式为

$$\frac{P_T}{P_i} = \frac{1}{\cos^2 \beta} \exp \left[K_e (r + k r \tan \beta \cos \alpha + r \tan \beta \sin \alpha) \left(\frac{1}{\cos \beta} - 1 \right) \right], \quad (6)$$

如图 6(b)所示, 假设地表服从曲面函数分布: $z = \sin(0.1x) + \cos(0.1y)$, 其中 $x = r \tan \beta \cos \alpha$, $y = r \tan \beta \sin \alpha$, 则模拟起伏地形的紫外光功率控制公式为

$$\frac{P_T}{P_i} = \frac{1}{\cos^2 \beta} \exp \left\{ K_e \left[r + \sin(0.1r \tan \beta \cos \alpha) + \cos(0.1r \tan \beta \sin \alpha) \right] \left(\frac{1}{\cos \beta} - 1 \right) \right\}. \quad (7)$$

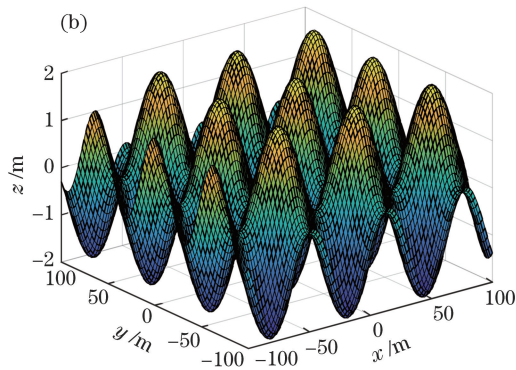


图 6 无线紫外光地形匹配图。(a)模拟斜坡;(b)模拟起伏地形

Fig. 6 Wireless ultraviolet terrain matching. (a) Simulation of slope; (b) simulation of undulating terrain

3.2 无线紫外光功率控制主要参数计算方法

使用一个常用模型估计 Mie 散射系数 K_{sM} , 表达式^[14-15]为

$$K_{sM} = \frac{3.91}{R_v} \times \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^q \quad (8)$$

式中: R_v 代表能见度(km); $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$; q 表示修正因子。表 1 给出不同能见度对应的修正因子。

使用 Rayleigh 散射的经典计算公式来估计散射系数 K_{sR} , 表达式^[15]为

$$K_{sR} = 2.677 \times 10^{-17} \frac{P \gamma^4}{T}, \quad (9)$$

式中: P 为大气压强; T 为绝对温度; γ 为波数 (cm^{-1}), $\gamma = 2\pi/\lambda$ 。

大气信道对“日盲”紫外光总的散射作用是 Mie

表 1 不同能见度对应的修正因子

Table 1 Correction factors corresponding to different visibilities

Visibility R_v /km	Visibility level	Meteorological condition	Modifying factor q
$R_v > 50$	9	Sunny	1.6
$6 < R_v < 50$	6-8	Little sunny	1.3
$1 < R_v < 6$	4-6	Frost	$0.16R_v + 0.34$
$0.5 < R_v < 1$	3	Fog	$R_v - 0.5$
$R_v < 0.5$	< 3	Heavy fog	0

散射作用和 Rayleigh 散射作用之和, 即散射系数为^[16]

$$K_s = K_{sM} + K_{sR}. \quad (10)$$

消光系数 K_e 为大气吸收系数 K_a 和大气散射

系数 K_s 之和, $K_e = K_a + K_s$ 。

4 分析与讨论

本文采用波长为 255 nm 的紫外光, 能见度为 5 km 时建立参数模型进行仿真实验。使用 Matlab 仿真软件分别仿真了直视情况下紫外光功率控制算法和非直视情况下紫外光功率控制算法。

4.1 地形平坦时功率控制算法仿真

从图 7 可以看出, 依次改变角度 β , P_T/P_i 的值随着高度 r 的增大而增大, 且角度 β 越大, 曲线增长越快, 角度 β 小于 80° 之后曲线增长趋于平稳。从图 8 可以看出, 依次改变高度 r , P_T/P_i 的比值随着角度 β 的增大而增大。角度 β 的值小于 82° 时, P_T/P_i 的值增长缓慢, 当角度 β 的值大于 80° 时, P_T/P_i 的值呈指数增长。且高度越高, 指数增长越快。

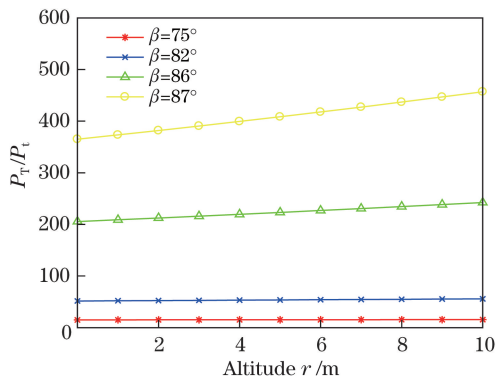


图 7 地形平坦时高度和功率比值的
关系曲线
Fig. 7 Relation between height and power ratio under flat terrain

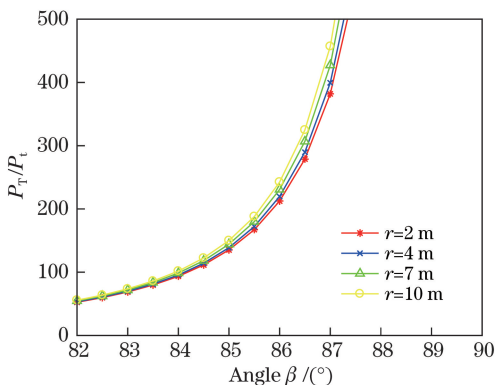


图 8 地形平坦时发射张角和功率比值的
关系曲线
Fig. 8 Relation between transmission angle and power ratio under flat terrain

4.2 模拟斜坡地形的功率控制算法研究

从图 9 可以看出, 坡度大约 10° 时, P_T/P_i 随着角度 α 的增大先增加后减小。曲线在 α 取值为 45°

达到峰值。而角度 β 的取值影响着它们的振幅, 角度 β 小于 82° 时, 振幅较小近似一条直线, 角度 β 大于 80° 时, β 的略微增大会引起振幅剧增。从图 10 可以看出, 当 $k \approx 0.17$ 即坡度约为 10° 时, P_T/P_i 随着高度 r 的增大而增大, 且呈指数增长。且随着 β 的增大指数增长越快。图 11 仿真了发射张角 β 和 P_T/P_i 的关系。从图 11(a) 可以看出, 当 $k \approx 0.17$ 即坡度约为 10° 时, P_T/P_i 随着角度 β 的增大呈指数增长, 且高度 r 越大指数增长越快。从图 11(b) 可以看出当 k 的取值分别为 0.17、0.34、0.50、0.71, 即坡度分别为 10° 、 20° 、 30° 、 45° 时, P_T/P_i 随着角度 β 的增大呈指数增长, 且斜坡越大指数增长越快。

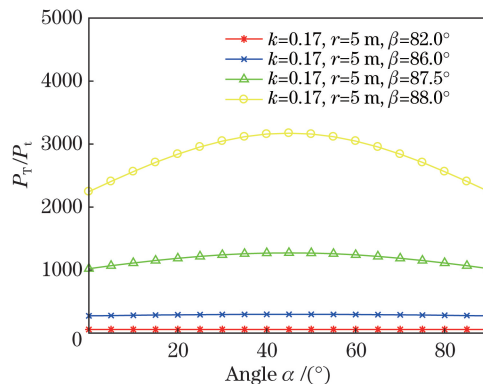


图 9 斜坡地形下方位角和功率之比的关系曲线
Fig. 9 Relation between azimuth angle and power ratio under cliniform

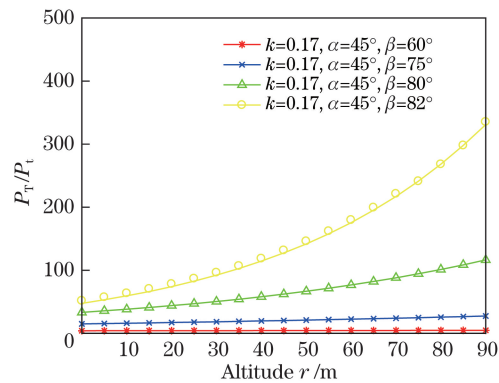


图 10 斜坡地形下高度和功率之比的关系曲线
Fig. 10 Relation between height and power ratio under cliniform

4.3 模拟山峰地形的功率控制算法研究

从图 12 可以看出, 随着角度 α 的增大, P_T/P_i 曲线趋势基本不变, 随着角度 β 的增大, 曲线振幅逐渐增大, β 小于 80° 时, 对振幅影响较小; 随着 β 的增大, 其对振幅影响越来越大。从图 13 可以看出, P_T/P_i 随着高度 r 的增加呈指数增长, 且随着角度 β 的增大指数曲线增长得越快。

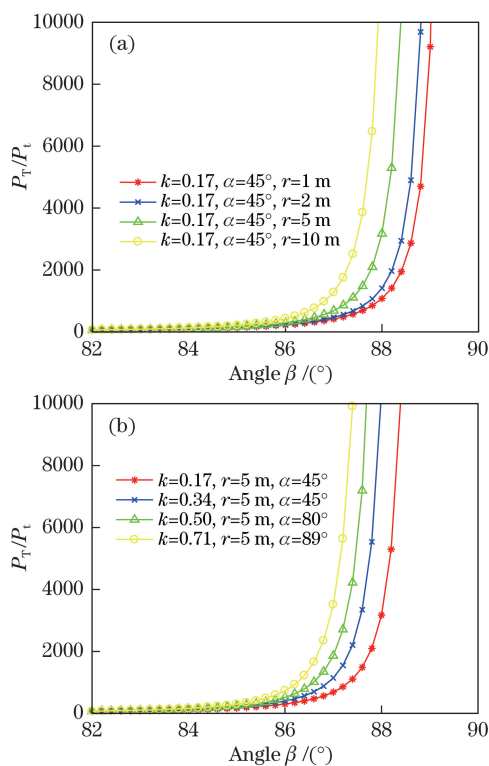


图 11 斜坡地形下发射张角和功率之比的关系曲线。
(a) 高度不同;(b) 高度一定

Fig. 11 Relation between transmission angle and power ratio under cliniform. (a) Height is different; (b) height is the same

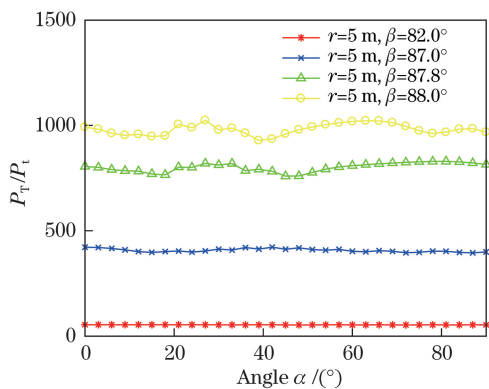


图 12 山峰地形下方位角和功率之比的关系曲线
Fig. 12 Relation between azimuth angle and power ratio under mountain terrain

从图 14 可以看出, P_T/P_t 随着角度 β 的增加呈指数增大, 且高度越高指数增长越快, 角度 α 的存在使得增长曲线不平坦, 随着角度 β 的增大, 曲线波动逐渐变大。

5 结 论

本文提出一种无人机匹配地形飞行的无线紫外光引导系统, 可以辅助无人机匹配不同地形飞行。

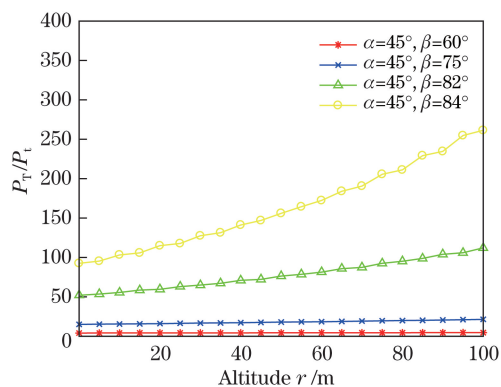


图 13 山峰地形下高度和功率之比的关系曲线
Fig. 13 Relation between height and power ratio under mountain terrain

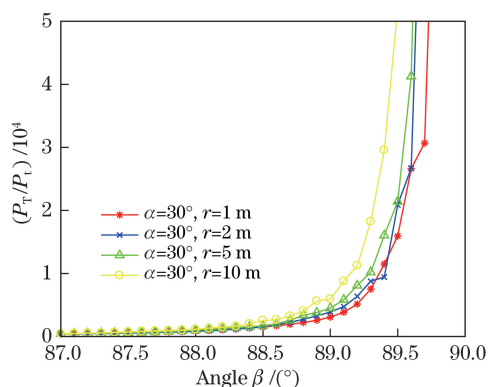


图 14 山峰地形下发射张角和功率之比的关系曲线
Fig. 14 Relation between transmission angle and power ratio under mountain terrain

该系统将紫外光作为引导光源, 将信标中不同的 LEDs 录入对应的地形信息, 无人机在经过被紫外光锥覆盖的高空处时可以根据接收到的紫外光获取自身位置、地形等信息, 调整自身飞行姿态。本文还提出一种紫外光功率控制算法, 调整不同角度紫外 LED 发送端发射功率, 使得到达无人机飞行平面的紫外光的功率相等, 为无人机喷洒农药提供一个安全稳定的飞行环境。另外还模拟了斜坡地形和山峰地形并给出相应的紫外光功率控制算法。使用 matlab 仿真验证了该算法的正确性。结果表明, 方位角 α 对功率比值影响较小, 发射张角 β 不超过 80° 时, P_T/P_t 较小, 信标引导装置易集成, 为无人机飞行引导问题提供了指导。

参 考 文 献

[1] Lü W T, Wang H L, Liu C, et al. Design and simulation of terrain matching aided navigation system for UAVs[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(5): 63-67, 87.

- 吕文涛, 王宏伦, 刘畅, 等. 无人机地形匹配辅助导航系统设计与仿真[J]. 电光与控制, 2014, 21(5): 63-67, 87.
- [2] Baird C A, Snyder F B, Beierle M. Terrain-aided altitude computations on the AFTI/F-16[C]//IEEE Symposium on Position Location and Navigation. A Decade of Excellence in the Navigation Sciences, March 20-20, 1990, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE, 1990: 474-481.
- [3] Wu J, Fei W K, Li Q R. A novel location method based on 2D laser scanning sensor terrain matching for UAV autonomous flight[C]//IET International Conference on Information Science and Control Engineering 2012 (ICISCE 2012), December 7-9, 2012, Shenzhen, China. UK: IET, 2012: 14031285.
- [4] Zhu S H, Wang F, Guo Z X, et al. A new air data attitude and heading reference system algorithm-applied to high-dynamic guidance flight[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(4): 14-16.
朱少华, 汪芳, 郭志想, 等. 一种适用于高动态制导飞行的大气航姿系统算法[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(4): 14-16.
- [5] Guo P F, Ren Z, Qiu H T, et al. Maneuvering acceleration assisted extended Kalman filter for attitude and heading reference system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(3): 625-628, 637.
郭鹏飞, 任章, 邱海韬, 等. 机动加速度辅助的航姿系统扩展卡尔曼滤波[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(3): 625-628, 637.
- [6] Song X R, Chen H, Xue Y G. Stabilization precision control methods of photoelectric aim-stabilized system[J]. Optics Communications, 2015, 351: 115-120.
- [7] Li T, Liang J Q, Yan H, et al. Application of INS/optical flow/magnetometer/barometer integrated navigation system in unmanned aerial vehicle[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 022801.
李涛, 梁建琦, 闫浩, 等. INS/光流/磁强计/气压计组合导航系统在无人机中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 022801.
- [8] Xian Y, Lai S Q. Military applications of the blind ultraviolet detection technology[J]. Helicopter Technique, 2016(2): 67-72.
鲜勇, 赖水清. 日盲紫外探测技术的军事应用[J]. 直升机技术, 2016(2): 67-72.
- [9] Zhao T F, Yu X X, Bao H, et al. Ranging and positioning method using wireless solar blind ultraviolet[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(9): 2324-2332.
赵太飞, 余叙叙, 包鹤, 等. 无线日盲紫外光测距定位方法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(9): 2324-2332.
- [10] Zhao T F, Li Y M, Yuan L. Research on relay selection of armored formations wireless UV covert communication[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(5): 180448.
赵太飞, 李永明, 袁麓. 装甲编队无线紫外光隐秘通信的中继选择研究[J]. 光电工程, 2019, 46(5): 180448.
- [11] Zhao T F, Wang J, Zhang J, et al. Neighbor discovery method for frogmen cooperation in underwater wireless optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1206002.
赵太飞, 王晶, 张杰, 等. 蛙人协作中的水下无线光通信邻居发现方法[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1206002.
- [12] Ke X Z. Theory of ultraviolet self-organizing [M]. Beijing: Science Press, 2011: 45-103.
柯熙政. 紫外光自组织网络理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 45-103.
- [13] Xu Z Y. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links[C]//2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing-ICASSP '07, April 15-20, 2007, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE, 2007: 577-580.
- [14] Tang Y, Ni G Q, Lan T, et al. Simulation and evaluation of transmission distance in solar-blind UV communication systems[J]. Optical Technique, 2007, 33(1): 27-30.
唐义, 倪国强, 蓝天, 等. “日盲”紫外光通信系统传输距离的仿真计算[J]. 光学技术, 2007, 33(1): 27-30.
- [15] Chen J H, Yang X L. Research of the atmospheric factors of solar blind ultraviolet communication[J]. Laser Journal, 2008, 29(4): 38-39.
陈君洪, 杨小丽. 非视线“日盲”紫外通信的大气因素研究[J]. 激光杂志, 2008, 29(4): 38-39.
- [16] Kerker M, Scheiner P, Cooke D D. The range of validity of the Rayleigh and Thomson limits for Lorenz-Mie scattering[J]. Journal of the Optical Society of America, 1978, 68(1): 135-137.