水平链路激光广播技术的功率传输方法与验证

赵凯强,母一宁,王 帅,李 平,朱 焱

(长春理工大学 理学院,吉林 长春 130022)

摘 要:当前传统点对点激光通信技术已经得到了长足进步,为了探索在有限范围内实现局域激光 广播的有效手段,提出了一种适用于短距离水平链路激光广播的有效方法,设计了相应的验证性广播 通信系统,并在光功率最优分配的角度上对激光广播进行了系统建模研究。首先,从光功率衰减的角 度对激光扩束理论模型和平行光幕理论模型进行了分析和对比,揭示了平行光幕通信模型的光功率 损失模型;其次,结合高斯光束光学成像变换理论模拟了平行光幕的远场场强分布情况,通过一个领 先的光学和照明设计软件,揭示了光幕远场分布与传输距离的关系;最后,通过在不同信道环境下的 野外通信实验验证了平行光幕理论模型的优越性与可行性。

关键词:激光广播; 平行光幕; 功率密度分布

中图分类号: TN934 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0922001

Means and verification of broadcast technology applied to laser transmission on horizontal link

Zhao Kaiqiang, Mu Yining, Wang Shuai, Li Ping, Zhu Yan

(School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: At present, there has been great progress in the field of the point-to-point laser communication technology. In order to search for an effective means of achieving localized laser broadcast communication within a limited range, an effective method of horizontal link laser broadcast communication was presented, and the corresponding verifiable broadcast communication system was designed. In addition, the laser broadcast was systematically studied by one physical model built at the optimal distribution of optical power. First of all, the theoretical model of laser beam expansion and the theoretical model of parallel light curtain were made comparisons and analyzed from the angle of attenuation of optical power, and the optical power loss model of the parallel light curtain was established as a result. Secondly, combined with the theory of optical imaging transformation based on Gaussian beam, the field distribution of far field of parallel light curtain was simulated by one leading optical and

作者简介:赵凯强(1992-),男,硕士生,主要从事专用集成电路技术方面的研究。Email:1432452641@qq.com

通讯作者:母一宁(1985-),男,副教授,博士,主要从事物理电子学与空间光通信方面的研究。Email:muyining1985@163.com

收稿日期:2018-04-05; 修订日期:2018-05-03

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51602028);吉林省科技发展计划重点科技攻关项目(20150204049GX,20150204083GX); 吉林省科技发展计划青年科研基金(20160520114JH);吉林省科技发展计划中青年科技创新领军人才及团队项目(20180519019JH); 吉林省教育厅"十三五"科学技术研究规划重点项目(JJKH20170602KJ);吉林省发改委产业创新专项资金(2018C040-3); 长春理工大学科技创新基金(XJJLG-2017-01)

illumination design software and the relation between the filed distribution of far field of light curtain and the distance of transmission was revealed. Finally, the superiority and feasibility of the parallel light curtain theory model were verified by field communication experiments in different information channels. **Key words:** laser broadcast; parallel light curtain; power density distribution

0 引 言

当前,空间光通信中的点对点通信模式已经相 对成熟,且各国对点对点通信已经开展了大量的研 究实验。随着我国逐步地开展轨道与轨道、轨道与地 面、地面与航空平台、地面站点间的相关空间激光通 信实验,标志着我国在该领域的技术水平已经处于 世界领先位置[1-2]。然而由于激光点对点通信模式是 为了追求远距离通信,要求远距离通信时光束扩展 很小,其通信光束发散角较小,并且其光功率密度的 衰减速度与传输距离呈现平方关系,该通信模式很 难实现局域广播激光通信。为了开辟这一新的技术 维度,国内外学者已展开了较为深入的研究;比如参 考文献[3]提出的广角扩束镜与双光楔相结合的多 点激光通信方式, 该激光通信方式可以通过调整双 光楔来实现一点对多点的通信,可以应用在飞机群 间、炮兵阵地间、低轨星座间的激光通信组网。但是 这种通信方式的通信对象较少,不能够覆盖大范围 区域的多个对象通信,而且应用于民用设备成本过 高,不易于市场推广;参考文献[4-5]提出的自由空 间一对多光通信系统,通信结构是一种多发多收结 构。这种多发多收结构对视场有所扩大,但是扩大仍 然有限,该种结构优点是不增加频谱资源和天线发 射功率的情况下,可以成倍地提高系统信道容量,但 是这种多发多收结构需要多个发射单元和接收单 元,通信时对对准和捕获技术的要求很高;参考文 献[6]提出一种视场扩大型一对多组网设计,该设计 是一种光纤阵列结构。这种结构视场有所扩大,但是 由于卡式系统的局限以及受到光纤数值孔径的限 制,视场依然有限,而且杂散光严重,光端机的排布 也很复杂。

以上的纤阵列结构和多发多收结构适用对象是 卫星间通信,其结构比较复杂且造价非常昂贵。通过 使用双光楔改变光束方向的方式,这种结构要想实 现多对象同时通信,就必须通过增加发射单元个数 的方式来实现。文中提出了一种在短距离范围内实 现局域激光功率高效广播传输的有效模式,使激光 功率密度衰减速度与激光传输距离由激光点对点通 信模式的平方关系变为线性相关,进而使水平链路 的短距离局域激光广播成为一种可能。

1 激光广播通信模型约束分析

图 1 为传统的激光扩准准直后的功率密度分布 情况。由于点光源发散后的截面是一个圆,假设光功 率一定的情况下,在圆上每个点的光功率将会是半 径平方的反比。不考虑大气信道、准直系统的光学像 差、激光光源模式漂移等非理想因素影响,其任意点 功率密度分布函数 ρ(x)为:

$$\rho(x) = \frac{\rho}{\pi (x \times \alpha)^2} \tag{1}$$

式中:ρ为初始功率密度;x为传输距离;α为视场角。 在这种通信方式中光功率随通信距离的平方成反比 例衰减,而减小视能实现大范围的区域广播通信。



图 1 激光扩束通信系统 Fig.1 Laser beam extension communication system

可见,这种光功率的传播方式很难满足局部广播的功率需求。基于此,文中提出的激光广播平行光幕生成的光功率传输方式如图2所示,准直后激光载波由光束横向展开系统在方位方向上以扇面发散

(2)

方式传播,形成激光载波扇面传播区域,进而使输出 光功率在俯仰方向被有效压制(β),而在水平方向被 明显发散(α),从而使有效输出光功率可以沿着水平 地面有效传播。这种方式单个发射单元就能够覆盖 大范围区域内的多个对象通信。同时,通信光功率损 失速度也由原来与传输距离成平方关系转换成线性 关系(α 为水平方向发散角,β 为俯仰方向发散角):

 $\rho(x) = \frac{\rho}{(x + \rho)^2}$

图 2 平行光幕通信系统 Fig.2 Parallel light curtain communication system

为了验证这种激光局域广播通信模式在实际空间激光通信场合的广播可行性与功率传输特性,文中采用了最为简洁的非球面柱面准直扩束光学模组,具体光路模拟如图3所示。



图 3 光幕生成装置简易示意图 Fig.3 Simple diagram of light curtain generating device

2 平行光幕建模与分析

由激光原理可知,为了追求激射效率,其大功率 谐振腔会为激光光束引入"快轴"和"慢轴"。所以真 实的出射光束的光强分布可近似认为为椭圆形高斯 分布,经第一级非球面准直后其光强分布模型被数 值匹配成了圆形高斯分布模型,其圆形高斯光束场 强与半径 *r* 及光斑半径 ω(z)的关系为:

$$E \propto \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right] \tag{3}$$

对光束进行分析时,可用分离变量的数学方法 在 *x-z* 平面和 *y-z* 平面内分别计算,其中 *z* 方向为 光束传播方向。文中为便于叙述,分别称之为 *x-z* 光 束和 *y-z* 光束。光束经二级非球面扩束变换后其 *x-z* 光束迅速扩散,而变换后的 *y-z* 光束被有效压制,即 把光束从圆形高斯光束变换为椭圆形高斯光束。随 着光束传播距离的增加,椭圆形光束近似形成平行 光幕,其场强与 *x*、*y* 的关系变为^[7-8]:

$$E \propto \exp\left[-\frac{x^2}{\omega_x^2(z)} - \frac{y^2}{\omega_y^2(z)}\right]$$
(4)

因此变换后的高斯光束模型包括两个方面,即 *x-z* 光束在 *x-z* 平面经透镜变换后的高斯光束模型 和 *y-z* 光束在 *y-z* 平面经透镜变换后的高斯光束模 型。首先分析其 *x-z* 光束的高斯变换,高斯分布变换 过程如图 4 所示。



图 4 高斯分布变换图 Fig.4 Figure of Gaussian distribution transform

高斯光束经准直扩束系统时只会改变其相位而 光强分布不会改变,因此经过透镜后的光束仍保持 高斯分布。图4中Z点为激光器的光束腰斑中心处, 经过一级L1变换后高斯光束的腰斑位置Z'和束腰 半径ω₀'为^[9-10]:

$$Z' = f - \frac{(Z + f)f^2}{(Z + f)^2 + (\omega_0^2 \pi / \lambda)^2}$$
(5)

$$\omega_0' = \frac{\omega_0}{\left[(1 + Z/f)^2 + (\pi \omega_0^2 / \lambda f)^2\right]^{1/2}}$$
(6)

经二级非球面凹柱面镜 L₂ 变换后高斯光束的 腰斑位置 Z"和束腰半径 ω₀"为:

$$Z'' = f' - \frac{(Z' + f')f'^2}{(Z' + f')^2 + (\omega_0^2 \pi / \lambda)^2}$$
(7)

$$\omega_0'' = \frac{\omega_0'}{\left[(1 + Z'/f')^2 + (\pi\omega_0'/\lambda f')^2\right]^{1/2}}$$
(8)

式中:*f*为准直系统的光学焦距;*f* 为凹柱面镜的焦距;λ为激光的波长。规定:正准直扩束系统的焦距为正;束腰在正准直扩束系统左边,腰斑位置 Z为负;束腰在正准直扩束系统右边,腰斑位置 Z为正。在 *x*-*z*平面变换后的高斯光束光斑半径表达式为:

$$\omega_x(z) = \omega_0'' [1 + (\lambda z / \pi \omega_0^{2})^2]^{1/2}$$
(9)

而 y-z 光束经一级正准直系统准直后的圆形高 斯分布模型与 x-z 光束准直后模型相同。二级非球 面凹柱面镜在 y-z 光束方向无变换作用,因此在 y-z 平面变换后的高斯光束光斑半径表达式为:

$$\omega_{\rm v}(z) = \omega_0' \left[1 + (\lambda z / \pi \omega_0^2)^2 \right]^{1/2} \tag{10}$$

将公式(9)和(10)代入公式(4)即得到变换后的高 斯分布的场强与 x、y 的关系。考虑到大气中的气溶胶 和微粒会对激光产生吸收和散射作用,而大气衰减可 用布格尔-朗伯定律描述和计算^[10-11],因此大气约束 条件下的高斯光束的场强与*x*,*y*的关系表达式为:

$$E \propto \exp\left[-\frac{x^2}{\omega_x^2(z)} - \frac{y^2}{\omega_y^2(z)}\right] * \exp[-k(\lambda)z] \qquad (11)$$

式中:k(λ)为吸收系数。

3 仿真及实验验证分析

文中设计的激光广播通信系统应用于短距离范围内实现局域激光功率高效广播,通信系统的特点是通信范围广。系统通信平均距离1km左右,最高通信距离1.5km。由于设计的激光广播通信系统通信距离短,大气信道对通信系统的影响不敏感,因此在仿真中没有考虑关于大气因素的影响的情况。仿真使用 ZEMAX 光学仿真软件对光学系统进行仿真,验证光学器件参数设置的合理性,从而实现对平行光幕的场强分布理论模型的验证。各光学元件参数如表1所示。

表 1 ZEMAX 仿真元件参数

Tab.1	Component	parameters	of	ZEMAX	simulation
-------	-----------	------------	----	-------	------------

Laser					Primary lens L_1					Secondary lens L_2				
P/W	$X_{ m Divergence}$	$X_{ m SuperGauss}$	$Y_{\rm Divergence}$	$Y_{ m SuperGauss}$	Material	Clear /mm	Thickness /mm	Radius /mm	<i>f</i> /mm	Material	Radial height	Thickness /mm	Radius /mm	<i>f</i> /mm
4.5	10	1	10	1	BK7	27	29	-51.85	100	BK7	30	10	180	310

图 5 为 50 m 通信距离(凹柱面镜后表面到探测 面距离)ZEMAX 仿真图,可以看出形成的光幕呈一 条直线分布,直线长度为5.6m,且光功率中间强,两 边弱(箭头所指表示光功率值最大,圆圈部分表示光 功率值最小)。图 6(a)为图 5 中平行光幕纵向光功率 分布图,图6(b)为图5中平行光幕横向光功率分布 图。光功率分布图中横坐标为0处表示平行光幕的 中心点,单位为mm;纵坐标表示单位面积功率,单 位为 W/cm²。从图 6(a)中可以看出平行光幕的纵向光 功率分布满足高斯分布,平行光幕纵向长度为5.6m; 从图 6(b)中可以得到平行光幕的横向光功率分布同 样满足高斯分布,平行光幕横向长度相比于纵向长 度非常小,仅为11 cm。而且通过增加通信距离,可以 发现平行光幕纵向长度增加地很快,而平行光幕横 向长度增加缓慢,200m通信距离时也低于30cm。 而且平行光幕的高斯分布也和 ZEMAX 仿真软件中

设置的激光二极管 SuperGauss=1 也相证,即高斯分 布非常尖锐。仿真时由于镜片设置的原因,平行光幕 的纵向长度大、横向长度小,但这并不影响结果分 析。实际实验时平行光幕应该是横向(即光束水平链 路方向)长度大、纵向(即光束垂直链路方向)长度小。



图 5 50 m 距离 ZEMAX 仿真图 Fig.5 ZEMAX simulation chart at 50 m distance



(a) 纵向功率分布

(a) Vertical power distribution



(b) 横向功率分布
(b) Horizontal power distribution
图 6 ZEMAX 功率分布图
Fig.6 Power distribution graphs from ZEMAX

根据仿真中设置的元件参数,设计并制作了激 光广播通信系统。图 7(a)、(b)分别为制作的光发射





Fig.7 Optical transmitter and receiver

机和光接收机。若是只用光电探测器测量,由于探测 面过小,环境的变化对数据影响非常大,为了得到更 可靠的数据,方便实验的分析,该实验在光接收机前 加一菲涅耳透镜(菲涅耳透镜尺寸 22 cm×14 cm),聚 光后通过光功率计测量光功率值。该实验增加菲涅 尔透镜仅是为了得到更稳定的数据,若是推广应用 激光广播技术,则不需增加菲涅耳透镜,因为大的探 测面会影响光电探测器的响应速度。系统光发射机 的激光二极管参数:功率 200 mW、波长 658 nm、快轴 发散角 30°、慢轴发散角 9°。

使用以上设备在进行了外场验证性广播通信实 验,图8、图9外场实验均是在夜间进行,使用的激 光二极管属于红光波段,因此可以很容易对光束长 度和光功率值进行测量。图8对应的实验环境:温 度-15~-20℃、阵雪、西风 3~4级、空气质量良好;实 验地点:吉林省长春市南湖公园湖冰面。测量方法: 通信距离以20m为最小单位距离,每隔20m测量 一组数据。每组数据根据该距离点形成光幕的长度 分别以 0.5 m 和 1 m 为最小水平间距选择测量点,测 量光幕上数据点的光功率值大小。由于每点的光功 率会起伏,因此实验总共进行了五次测量,最后取平 均值,根据实测数据生成的3D图如图8所示。图 中Z轴(0~2)表示光功率,单位mW;Y轴(0-200)方向 表示激光器离探测器的距离(即通信距离),单位 m; X轴(以0为中心点)表示激光广播形成的平行光幕 的长度,图中以中间点为原点,单位 m。





Fig.8 3D figure of power distribution with actual measurement (snow)

从图 8 中可以看出,首先从光束在水平链路的 扩展性来看(X 轴表示光幕水平方向的长度),通信距 离 20 m 时,光幕在水平链路上的长度约为 2.5 m;通 信距离 100 m 时,光幕在水平链路上的长度约为 10 m; 通信距离 200 m 时,光幕在水平链路上的长度约为 16 m;可见,随着通信距离的增加,光幕在水平链路 上的长度增长地非常快,而且光功率分布图大致呈 现出扇面的形状。其次从光功率角度来看(Z 轴表示 光功率),在通信距离小于 60 m 时,光功率分布呈高 斯分布,且波形尖锐;通信距离大于 60 m,光功率分 布也近似高斯分布,但是波形渐趋于平坦,这是由于 光衍射造成的。

而且实验中也测量了光幕在垂直链路上的长 度,但是由于其改变量很小,实验中没有绘制成图 表。光幕在垂直链路上的长度虽然也随着距离的增 加而增加,但是增加量很小,在 20 m 通信距离时,为 10 cm;在 200 m 通信距离时,也低于 30 cm。因此从 功率利用率的角度来看,20 m 的通信距离下 10 cm 的光幕宽度相比于 2.5 cm 的光幕长度,可以认为该 光幕为平行光幕。此时的功率密度分布函数为 ρ(x)= (ρ/x·tanα),即相比于激光扩束结构,平行光幕的光功 率损失速度由原来与传输距离成平方关系转换成线 性关系,也不影响在水平链路上的大范围通信,同时 由于其光功率利用率高,系统还有更大的通信距离。 图 9 为在另一地点测量的激光广播光功率分布曲线



图 9 实测光强分布 3D 图(晴朗) Fig.9 3D figure of power distribution with actual measurement (sunny)

图。实验环境:温度15~29℃、多云、风速 6~7级、空 气质量良好;地点:长春市新立城水库。测量方法同 图 8测量方法一致,测量时通信距离以 50 m 为最小 单位距离,光幕以 2 m 为最小测量单位。由于地点的 原因图 8测量的通信距离最大为 200 m,但是测量间 隔距离为 20 m,图 9测量的最大通信距离为 500 m, 以 50 m 为测量间隔距离。比较两图:在 100 m 时,图8 中最强点 0.18 mW, 图 9 中最强点 0.265 mW;200 m 时,图8最强点0.04 mW,图9最强点0.13 mW。可见,同样的设备,天气对于激光传输的影响非常大,小雪天气时大气会增加对激光的吸收,进而导致同样的光设备光功率衰减地更快^[12-14]。而且比较两图的整体轮廓,图8的光功率分布明显更加均衡,这是由于图9的测量点在水库边,风速很高且不稳定,大气环境对激光传输的影响非常明显。

图 10 为在白天环境下激光广播通信光功率分 布图。实验环境:温度 2~9℃、多云、风速 6~7 级、空 气质量良好;地点:长春市长春理工大学东校区操 场。测量方案:每隔 20 m 测量一组数据。每组数据根 据该距离点形成光幕的长度分别以 0.5 m 和 1 m 为 最小水平间距,测量每个点的平均光功率值。为了在 白天同样可以看到光束分布情况,通过在 CCD 摄像 机前加 650 nm 中心波长的介质膜窄带滤光片的方 式来观察光束。由于白天干扰光过强,因此在接收端 前部加上暗室来消除背景光干扰,并且每次测量前 先把光功率计调零。由图 10 可以看出,与图 8、图 9 在夜间环境下的测量值不同,白天环境下光功率值 衰减地更快,光功率起伏更加明显。



图 10 实测光强分布 3D 图(白天)

Fig.10 3D figure of power distribution with actual measurement (daytime)

4 结 论

首先从工程应用的角度分析了激光广播系统面 临的功率分布问题,通过研究激光扩束理论模型和 平行光幕理论模型指出平行光幕模型具有更高的光 功率利用率,为了验证这种激光局域广播通信模式 在实际空间激光通信场合的广播可行性,文中提出 一种适用于水平链路激光局域广播的光功率调制模 式,使输出光功率在俯仰方向被有效压制(β),而在 水平方向被明显发散(α),很大程度上提升了光束在 水平方向的光功率利用率,为民用大气无线激光局 域通信奠定理论基础。此外,光束视场角的大小、透 镜的焦距、透镜与透镜间的间距等参数也是系统的 重要影响因素^[15],由于时间的原因没有进行不同光 学参数的对比分析实验,后续可以通过各种实验的 验证得到最佳的激光广播设计。

参考文献:

- Gregory M, Heine F, Kämpfner H, et al. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(3): 031202.
- Jiang Huilin. Space Laser Communication Technology and System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 1–20. (in Chinese)
- [3] Zeng Fei, Gao Shijie, San Xiaoguang, et al. Development status and trend of airborne laser communication terminals
 [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 65–73. (in Chinese)
- [4] Zhang T, Mao S, Fu Q, et al. Networking optical antenna of space laser communication [J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(1): 012013.
- [5] Brady J, Behdad N, Sayeed A M. Beamspace MIMO for millimeter-wave communications: System architecture, modeling, analysis, and measurements [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(7): 3814–3827.
- [6] Li Shaohui, Chen Xiaomei, Ni Guoqiang. Highly precise ground certification system of satellite laser communication
 [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1149–1158. (in Chinese)
- [7] Okunkova A, Volosova M, Peretyagin P, et al. Experimental approbation of selective laser melting of powders by the use

of non-Gaussian power density distributions [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 48-57.

- [8] Kong D, Wang Z, Fang F, et al. Propagating of partially coherent laser beam in the near-resonant atomic gas [J]. *Optics Communications*, 2017, 399: 73–76. (in Chinese)
- [9] Wei Guanghui, Zhu Baoliang. Laser Beam Optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. (in Chinese)
- [10] Cao Shangwen, Zhou Yongjiang, Cheng Haifeng. Research progress of transformation optics lens antenna [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2017, 10(2): 164–175. (in Chinese)
- [11] Mu Yining, Wang He, Li Ping, et al. Pulse state-interval modulation and experiment in the hostile environments [J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(3): 225-230. (in Chinese)
- [12] Wang Jiao, Ke Xizheng. Speckle characteristics of partially coherent beam propagating in atmospheric turbulence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0722003. (in Chinese)
- [13] Wu Junpeng, Liu Quan, Yu Lintao. Speckle characteristics of partially coherent beam propagating in atmospheric turbulence
 [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (3): 0322004. (in Chinese)
- [14] Li Yimang, Gao Shijie, Sheng Lei. Experiment of restraint of atmospheric turbulence using diversity technology based on analysis of offshore laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0322021. (in Chinese)
- [15] Wei Peifeng, Lin Xudong, Wang Liang, et al. Simultaneous measurement of atmospheric coherence length [J]. Simultaneous Measurement of Atmospheric Coherence Length, 2016, 24(8): 1840–1845.