

文章编号:1007-2780(2017)09-0736-05

激光通信成像光斑处理方法研究

王玉坤, 贾娜, 张锐

(91550 部队 92 分队, 辽宁 大连 116023)

摘要:本文针对目前海域条件下激光通信的难题,对海域条件下激光通信过程中成像的光斑提取方法进行了研究。依据此研究,搭建了测试平台进行实验,通过测试平台得到光斑图像,对光斑图像进行了处理,通过图像比对验证了此种方法的可行性,为激光通信海面通信光斑提取提供了一种解决方法。实验结果表明:采用本文方法在图像复原时最大误差在 X 方向为 2.60 像素,在 Y 方向为 1.54 像素。此种方法对于海域条件下的激光通信系统信标光斑处理可达到应用所需效果。

关键词:激光通信;光斑提取;海域环境;图像算法

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173209.0736

Laser communication spots imaging process method

WANG Yu-kun, JIA Na, ZHANG Rui

(Unit 91550 of PLA, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to resolve the problem of laser communication under marine conditions, the extraction method of light spot image was studied. Based on the research, an experiment was carried out on the test platform, and then, light spot images were processed. The feasibility of this method was proved by the comparison of different images, which provided a solution to solve the issue on light spot extraction of laser communication on sea surface. Experimental results showed that the maximum error on X axis is 2.60 pixel and 1.54 pixel on Y axis. The effect of light spot image processing of laser communication was anticipated through adopting the method proposed under marine conditions.

Key words: laser communication; sub-pixel extraction; marine environment; algorithm for image analysis

1 引言

激光通信是一种新型的无线通信技术,它是
以激光作为信息通信的载体在自由空间中传播,

最显著的优势是通信距离长、带宽较宽、保密性好、架设灵活,并且能够与光纤通信进行对接,用于实现以光波为载体进行数据通信。但是,激光通信技术目前也存在一些应用瓶颈。比如激光通信数据在传输过程中,信号裸露于自由空间内,由

收稿日期:2017-02-20;修订日期:2017-05-27.

* 通信联系人, E-mail: 5499624@qq.com

于光的特殊性,当激光通信链路经过大气时,激光束受大气湍流影响,其强度、相位和传输方向均会受到扰动而出现相应的随机变化,进而影响端机间的跟瞄精度和通信质量。特别是在海域条件下,激光通信系统的信号传输媒介是位于海面上方十几米至几十米的大气,在这一区域大气湍流对通信链路保持和通信质量有着严重的干扰,信号在接收时会产生光强起伏、到达角起伏、光束漂移、光束扩展等情况^[1-4]这也正是与单纯的陆域或空域等应用环境的不同之处。因此,研究海域条件下激光通信成像光斑处理方法是设计并研制舰载激光通信系统的重要理论基础和必要前提条件。

伴随感知信息的多样化与感知维度的增加,国内外的学者与科研团队都致力于图像复原或提取的相关研究工作中,也取得了诸多的研究成果^[5-7]。但其在基础理论和应用技术层面仍有许多问题亟待解决。特别是我军近海激光通信系统应用的强烈需求下,激光通信成像光斑处理方法已成为研究的热点,本文就是在这样的背景下,开展激光通信成像光斑处理方法研究,通过采用盲解卷积算法对光束光斑图像进行复原,以提高激光通信光斑位置的提取精度,从而可以有效提高跟踪精度和通信质量。

2 图像降质模型与盲解卷积方法

2.1 海面大气扰动降质模型

大气的分布不均引起的折射率导致了波前的振幅和相位的扰动,是大气湍流扰动的主要成因。为了便于描述,本文将大气扰动模糊简化成线性移不变点扩散函数。点扩散函数就是光学系统的脉冲响应函数。根据 Kolmogorov 理论可知,大气扰动模糊的点扩散函数是高斯型的,其表达式如式(1)所示:

$$h(x, y) = K \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

式中: K 为归一化常数; σ^2 为均方差。式(1)变换到频域如式(2)所示。

$$H(u, v) = \exp\left[-c(u^2 + v^2) \frac{5}{6}\right], \quad (2)$$

式中 c 是随扰动类型变化的变量,一般通过实验可以确定,幂 $5/6$ 有时可以用 1 来代替^[8-10]。

迭代盲解卷积算法(IBD)和 NAS-RIF 盲复

原算法是图像盲复原算法中比较常见的算法,下面将分别对这两种算法进行简单描述。

2.2 迭代盲解卷积算法(IBD)

图 1 是迭代盲解卷积算法的结构图,如图中所示,迭代盲解卷积算法的基本步骤为:首先估计出图像的频域初始值,然后进行傅里叶逆变换,施加约束条件完再进行傅里叶变换,约束条件可以为支持域限制,正性约束等条件,利用图像的估计值和 G 得到点扩散函数的估计值,然后再进行傅里叶逆变换,施加约束条件在进行傅里叶变换得到图像的估计值,然后进行迭代。频域估计我们可以采用维纳滤波,其计算公式为:

$$\hat{F}(u, v) = \frac{1}{H(u, v)} \frac{\|H(u, v)\| 2G(u, v)}{\|H(u, v)\|^2 + S_{nn}(u, v)/S_{ff}(u, v)}, \quad (3)$$

$$\hat{H}(u, v) = \frac{1}{F(u, v)} \frac{\|F(u, v)\| 2G(u, v)}{\|F(u, v)\|^2 + S_{nn}(u, v)/S_{hh}(u, v)}, \quad (4)$$

其中 $S_{ff}(u, v)$ 、 $S_{hh}(u, v)$ 、 $S_{nn}(u, v)$ 分别表示原始图像、点扩散函数和噪声的功率谱,一般为未知量,一般情况下假设噪声较小,所以式(3)、(4)中的功率谱比值可以用较小的值来替换。

迭代盲解卷积算法是比较简单的一种图像复原算法,具有继承性,还能利用维纳滤波、逆滤波等非盲复原算法进行迭代但是其算法迭代收敛慢且不稳定,受噪声的影响变化较大。

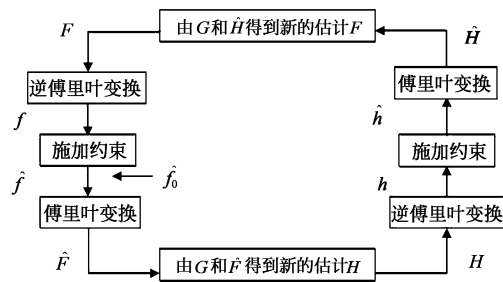


图 1 迭代盲解卷积算法的结构

Fig.1 Structure of iterative blind deconvolution method

2.3 NAS-RIF 盲复原算法

NAS-RIF 盲复原算法是由 Kundur 等人提出的,是具有支持域约束条件和非负性的递归算法(NAS-RIF),图 2 为 NAS-RIF 盲复原算法的

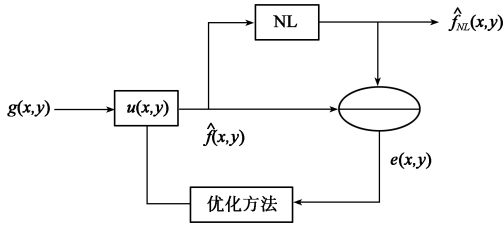


图 2 NAS-RIF 算法的结构

Fig.2 Structure of NAS-RIF method

结构图。

图中 $g(x, y)$ 为退化图像, $u(x, y)$ 为自适应逆滤波器, $\hat{f}(x, y)$ 为 $g(x, y)$ 和 $u(x, y)$ 的卷积值, $\hat{f}_{NL}(x, y)$ 是 $\hat{f}(x, y)$ 在真实图像空间上的投影, $e(x, y)$ 是 $\hat{f}(x, y)$ 和 $\hat{f}_{NL}(x, y)$ 的差值。

$$\hat{f}_{NL}(x, y) = \begin{cases} \hat{f}(x, y), (x, y) \in D_{sup} \text{ and } \hat{f}(x, y) \geq 0 \\ 0, (x, y) \in D_{sup} \text{ and } \hat{f}(x, y) < 0 \\ L_B, (x, y) \in \bar{D}_{sup} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: D_{sup} 为图像支持域中所有像素的集合, $\bar{D}_{sup}$ 为 D_{sup} 的补集, L_B 为图像中所有背景像素的均值。具体算法步骤为: 退化图像 $g(x, y)$ 经过自适应逆滤波器 $u(x, y)$ 后得到估计的原始图像 $\hat{f}(x, y)$, 利用公式(5)将 $\hat{f}(x, y)$ 投影得到 $\hat{f}_{NL}(x, y)$, 然后用 $e(x, y)$ 修正 $u(x, y)$, 经过多次循环最后得到最终的复原图像。递归过程中的代价函数由式(6)表示。

$$J(u) = \sum_{\forall (x, y)} e^2(x, y) = \sum_{\forall (x, y)} [\hat{f}_{NL}(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2 = \sum_{(x, y) \in D_{sup}} \hat{f}^2(x, y) \left| \frac{1 - \text{sgn}(\hat{f}(x, y))}{2} \right| + \sum_{(x, y) \in \bar{D}_{sup}} [\hat{f}(x, y) - L_B]^2 + \gamma \left[\sum_{\forall (x, y)} u(x, y) - 1 \right]. \quad (6)$$

等式中最右边的第一项可以确保递归过程中图像像素值为非负值; 第二项可以使得支持域外的像素值全为图像的背景值; 第三项可以防止图像背景全 0, 系数 γ 是调节系数。NAS-RIF 算法能够收敛到全局最小值, 但是算法有个假设前提: 均匀的图像背景, 其中逆滤波器的高通性还会引起递归过程中噪声的放大, 尤其对信噪比较低的图像, NAS-RIF 算法的复原效果并不理想。

依照以上模型及算法, 构建实验条件, 以检验算法的可行性, 具体实验如下。

3 图像复原验证实验

为了验证以上理论的有效性, 在大连海域搭建了实验平台, 示意框图如图 3 所示。

发射端选择钨灯作为光源发射光束。接收端由镜头、图像传感器(CMOS)、实时图像采集与处理卡以及计算机组成, 主要功能是接收来自发射端的光束, 对光束进行图像处理及记录, 并显示图像和数据结果^[11-13]。实验验证过程为, 由镜头和

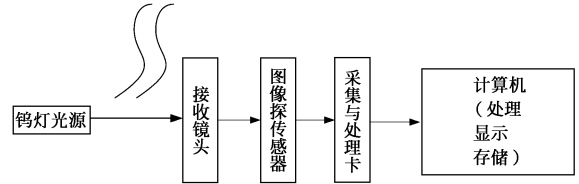


图 3 实验平台搭建示意图

Fig.3 Experimental platform



图 4 光束接收系统实物图

Fig.4 Beam receiving system

图像传感器所组成的成像系统接收来自远端的光束信号, 将光信号转换为电信号后传输至实时图

像采集与处理卡中,利用卡上的 FPGA 对数字图像信号进行去噪等预处理运算,并经由 PCI-e 协议传入计算机中,计算机完成对图像的分析 and 盲解卷积运算,并将图像和数据结果保存并显示。为了保证实验的正确性,避免因接收口径小于大气相干长度所带来的影响,选用了口径 150 mm,焦距 1 500 mm 的卡式镜头作为光学天线,如图 4 所示。



图5 实验位置示意图

Fig.5 Experimental position

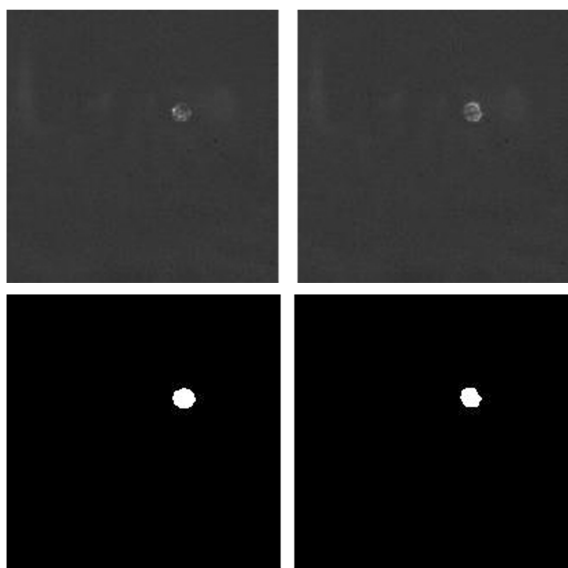


图6 处理前后图像质量

Fig.6 Comparison of image quality

实验于大连海域柏岚子、庙西两处开展,如图 5 所示。两处距离为 9 km,且为跨海,能有效反应出海域条件下光斑图像的特点。

对采集后的图像进行处理^[14-15]并进行比对,其结果如图 6 所示。数据对比结果如表 1 所示。

表1 复原前后结果比较

Tab.1 Comparison of recovery results

	复原前	复原后
X_{mean}	125.73	129.07
X_{min}	124.54	126.98
X_{max}	132.62	130.95
Y_{mean}	77.19	74.91
Y_{min}	72.25	74.08
Y_{max}	78.84	76.23

如表 1 所示,以事后多帧重构法所得结果为真值时,复原算法前的平均误差在 X 方向为 2.62 像素, Y 方向为 1.57 像素,最大误差在 X 方向为 5.81 像素, Y 方向为 3.37 像素;采用本文所提算法的平均误差在 X 方向为 0.72 像素,在 Y 方向为 0.71 像素,最大误差在 X 方向为 2.60 像素,在 Y 方向为 1.54 像素。

4 结 论

通过对比可见,复原后的图像在质量上较还原前的有很大的提高,说明此种方法对于海域条件下的激光通信系统信标光光斑处理可达到应用所需效果。现此种方法晴朗无风的天气中得以验证,而此种方法在复杂天气环境下应用的有效性和系统实时性还需进一步验证。

参 考 文 献:

- [1] 姜会林,胡源,丁莹,等.空间激光通信组网光学原理研究[J].光学学报,2012,32(10):1006003.
JIANG H L, HU Y, DING Y, *et al.* Optical principle research of space laser communication network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1006003. (in Chinese)
- [2] HENNIGER H, EPPLE B, HAAN H. Maritime mobile optical-propagation channel measurements [C]//*Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Cape Town: IEEE, 2010: 1-5.
- [3] 陈纯毅,杨华民,佟首峰,等.激光大气折射率结构常数测量实验与分析[J].红外与激光工程,2006,35(S):422-426.

- CHENC Y, YANG H M, TONG S F, *et al.* Measurement experiment and analysis of laser atmospheric structure constant of refractive index [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 423-426. (in Chinese)
- [4] THOMAS L M W, MOORE C I, BURRIS H R, *et al.* NRL's research at the lasercomm test facility: characterization of the maritime atmosphere and initial results in analog FM lasercomm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6951: 69510S.
- [5] 曹雷, 陈洪斌, 邱琪, 等. 盲图像复原研究现状[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 68-78.
CAOL, CHEN H B, QIU Q, *et al.* Research status of blind image restoration [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 68-78. (in Chinese)
- [6] 葛琪, 王可东, 张弘, 等. 长曝光大气湍流退化图像点扩散函数估计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1327-1331.
GEQ, WANG K D, ZHANG H, *et al.* Estimation of point spread function for long-exposure atmospheric turbulence-degraded images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1327-1331. (in Chinese)
- [7] 文玉梅, 李平. 用多项式近似的图象逆滤波及空间移变系统图象的恢复[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8A(9): 1021-1027.
WENY M, LI P. The image inverse filtering with polynomial approximation and the image recovery in spatially variant systems [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8A(9): 1021-1027. (in Chinese)
- [8] 许洁平. 空间目标图像盲解卷积技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2012.
XU J P. Research on blind deconvolution of space object images [D]. Changsha: Graduate School of National Defense Science and Technology University, 2012. (in Chinese)
- [9] 梁春, 沈建新, 钮赛赛. 基于半盲解卷积复原的高分辨率视网膜成像系统[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1374-1381.
LIANGC, SHEN J X, NIU S S. High resolution retinal imaging system based on semi-blind deconvolution restoration [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1374-1381. (in Chinese)
- [10] 文鹏程, 张亚棣, 王向军, 等. 楔环贫点阵探测器图像的形状恢复方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1366-1371.
WENP C, ZHANG Y D, WANG X J, *et al.* Shape recovery from images acquired by a wedge-ring poor-pixels detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1366-1371. (in Chinese)
- [11] 王先鹏. 大气激光通信系统误码特性的实验测量与分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
WANGX P. Experimental measure and analysis of the error code characteristic in the ALC system [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [12] 于林韬, 宋路, 韩成, 等. 空地激光通信链路功率与通信性能分析与仿真[J]. 光子学报, 2013, 42(5): 543-547.
YUL T, SONG L, HAN C, *et al.* Analysis and simulation of link power and communication performance in space-ground optical communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(5): 543-547. (in Chinese)
- [13] 王德飞, 楚振峰, 任正雷, 等. 大气湍流对激光通信系统误码率影响的研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 390-393.
WANGD F, CHU Z F, REN Z L, *et al.* Influence of atmospheric turbulence on BER of laser communication system [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(4): 390-393. (in Chinese)
- [14] 郎锐. 数字图像处理学: Visual C++ 实现[M]. 北京: 北京希望电子出版社, 2002: 27-45.
LANGR. *Digital Image Processing Visual C++ Realization* [M]. Beijing: Beijing Hope Electronic Press, 2002: 27-45.
- [15] 达选福, 张伯珩, 边川平. 高速 CCD 图像数据存储技术[J]. 光子学报, 2003, 32(11): 1393-1395.
DAX F, ZHANG B H, BIAN C P. A method of high speed image data storage [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(11): 1393-1395. (in Chinese)

作者简介: 王玉坤(1978—), 男, 大学本科, 工程师, 主要研究方向为光学测量。E-mail: 5499624@qq.com