

大气激光通信系统中频域反卷积抑制乘性噪声的研究

张彤^{1,2} 范研² 赵谦^{1*}

¹西安理工大学计算机科学与工程学院, 陕西 西安 710048

²西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 大气湍流会导致大气激光通信链路误码率性能的恶化,提出了一种频域反卷积方法抑制大气激光通信系统中的乘性噪声。该方法有效地把反卷积技术与大气激光通信相结合,算法中加入快速傅里叶变换(FFT)模块,将信号转换到频域进行反卷积滤波,降低了算法复杂度。利用大气激光通信实测系统在雨天天气下进行实验验证,对比反卷积前后调制信号的星座图并分析系统误码率。实验结果表明,频域反卷积能够降低大气激光通信系统的误码率,是一种抑制大气信道乘性噪声的有效方法。

关键词 大气光学; 大气激光通信; 乘性噪声; 频域反卷积; 快速傅里叶变换算法

中图分类号 E963

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0513002

Atmospheric Laser Communication System Frequency-Domain Deconvolution Algorithm of Restraining Multiplicative Noise

Zhang Tong¹ Fan Yan² Zhao Qian¹

¹School of Computer Science and Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

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

Abstract Atmospheric turbulence will lead to the deterioration of the atmospheric laser communication link bit error rate performance. A frequency domain deconvolution method restrained multiplicative noise is proposed in the atmospheric laser communication system. The method is effective to connect the atmospheric laser communication with deconvolution technology. Fast Fourier transform (FFT) module is added to the algorithm, converting the signal into frequency-domain, deconvolution filtering in the frequency-domain, reduces the algorithm complexity. Using atmospheric laser communication measurement system on a rainy day to experimental verification algorithm, contrast before and after deconvolution signal modulation constellation diagram and analyze the system bit error rate. The experimental results show that the frequency-domain deconvolution can reduce the bit error rate of atmospheric laser communication system and is a kind of effective method of multiplicative noise inhibition of atmospheric channel.

Key words atmospheric optics; atmosphere laser communication; multiplicative noise; frequency-domain deconvolution; fast Fourier transform algorithm

OCIS codes 010.3310; 010.1290; 270.2500

1 引言

大气激光通信系统中大气随机信道对激光通信的影响严重,根据影响机理的不同将信道噪声分为加性噪声和乘性噪声。加性噪声为通信系统的背景噪声,一般通过线性滤波器抑制^[1]。乘性噪声一般由信道不理想引起,其变化比较复杂,导致有用信号很难分离出来,该问题已成为目前大气激光通信实用化的瓶颈,也是国内外学者研究的热点。文献[2]提出一种去除乘性噪声的小波变分模型,模型采用交替分裂 Bregman

收稿日期: 2014-11-06; 收到修改稿日期: 2014-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(51308057)、西安市技术转移促进工程(CXY1340(3))

作者简介: 张彤(1968—),男,硕士,副教授,主要从事无线通信方面的研究。E-mail: zhangtong@xaut.edu.cn

*通信联系人。E-mail: friendisq@sina.cn

算法,这种模型和算法形式简单,推广性强。赵志龙等^[3]针对乘性噪声去噪算法进行了研究,通过取对数把乘性噪声模型转变成相加模型,改进正规化项成为自适应扩散模型,实践表明该模型在解决了阶梯效应的同时保持了图像的边缘。在噪声抑制和信号复原方面反卷积技术有着巨大贡献,特别是在图像复原^[4]和地质勘探^[5]中,最常用的方法有同态滤波^[6-7]和预测反卷积^[8]。随着光通信的发展也有学者将反卷积技术应用于光信号的复原,文献[9]提出了一种能在恢复光谱结构的同时又能抑制光谱噪声的模型,模型中利用Laplacian-Markov作为光谱数据的光滑性先验,提出加权光谱反卷积来恢复退化的光谱,并使用分裂Bregman迭代法求解。刘卫静等^[10]采用空域迭代反卷积和频域维纳滤波对多纵模激光器光谱进行数据仿真,仿真结果表明迭代反卷积和维纳滤波可以有效消除光谱仪仪器响应函数引起的光谱展宽,提高光谱仪分辨率。郭玲玲等^[11]提出了多通道盲反卷积的估计方法,结果表明估算精度和运行速度均优于常用的倾斜刃边法。这些方法均为典型的时域反卷积算法,其算法相对复杂。本文从实际工程应用出发,提出一种频域反卷积抑制大气信道中乘性噪声的方法。算法中加入快速傅里叶变换(FFT)模块,将信号转换到频域进行反卷积滤波。根据雨天条件下近地视距实验所得的数据建立大气激光通信信道模型,对接收到的调制信号采用频域反卷积的方法进行去噪处理,对实测数据反卷积前后信号的星座图进行对比,并分析去噪前后系统的误码率(BER)。实验结果表明,频域反卷积对大气信道乘性噪声的抑制作用明显。

2 频域反卷积基本原理

大气激光通信系统中频域反卷积过程如图1所示。对码元 $s(n)$ 进行四进制相移键控(4PSK)调制,根据实验测量数据 $z(n)$ 进行信道估计得到信道的传递函数 $h(n)$,对时域离散信号进行FFT算法运算转换到频域,再通过频域反卷积滤除乘性噪声,最后进行4PSK解调。

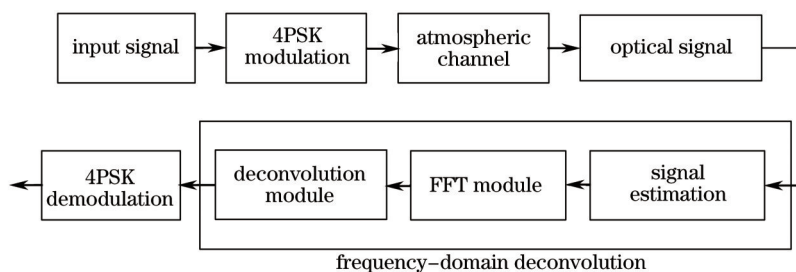


图1 大气激光通信系统中频域反卷积

Fig.1 Deconvolution algorithm in atmospheric laser communication system

由图1可知,大气激光通信频域反卷积方法主要分为三个部分,即信道估计、FFT频域转换和反卷积部分。

信道传递函数为 $h(n)$,对于输入信号 $x(n)$,经过大气信道后输出信号 $y(n)$ 可以表示为 $y(n) = x(n) \otimes h(n)$,对该式左边进行FFT变换可以得到 $Y(\omega)$ 。

信号经过大气信道后会染上乘性噪声,即经过大气信道后的信号又可以表示为

$$y(n) = x(n) \cdot z(n), \quad (1)$$

(1)式右边经过离散傅里叶变换(DFT),由频域卷积定理可得

$$Y(\omega) = X(\omega) \otimes Z(\omega), \quad (2)$$

式中 $Z(\omega)$ 是乘性噪声 $z(n)$ 的离散傅里叶变换。由 $Y(\omega)$ 和 $Z(\omega)$ 进行频域反卷积运算可以得到 $X(\omega)$,对其进行逆FFT变换就可以得到滤除乘性噪声的调制信号 $x(n)$ 。反卷积算法的具体实现以FFT变换为基础,下面将详细介绍FFT算法具体实现。

3 频域反卷积的FFT算法实现

从图1中可以看出FFT模块是实现频域反卷积算法的核心,FFT运算把时域信号转换到频域,降低了算法的复杂度。离散傅里叶变换公式为

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3)$$

式中 $x(k)$ 为频域信号, $x(n)$ 为时域信号, W_N^{kn} 表示旋转因子。旋转因子具有周期性和对称性, FFT 运算利用 W_N^{kn} 的性质减少离散傅里叶变换的运算次数。

时域序列 $x(n)$ 的长度为 N , 把序列分为奇数列 x_o 和偶数列 x_e , 表示为

$$\begin{cases} x_e(l) = x(2l), & l = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \\ x_o(l) = x(2l + 1), & l = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \end{cases}. \quad (4)$$

假设 $X_e(l) = \text{DFT}[x_e(l)]$, $X_o(l) = \text{DFT}[x_o(l)]$, $0 \leq l \leq N/2 - 1$, 由(3)式可得

$$\begin{cases} X(l) = X_e(l) + X_o(l)W_N^k \\ X\left(l + \frac{N}{2}\right) = X_e(l) - X_o(l)W_N^k, \quad 0 \leq l \leq \frac{N}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

这样原序列的离散傅里叶变换就转化为两个奇偶子序列离散傅里叶变换的线性组合。FFT 算法要经过两次分解, 其中包括一次复数乘法计算和两次复数加法运算, 计算量比 DFT 减少一半。设序列长度 $N = 2^M$, 其 FFT 运算流程图包含 M 级运算, 每一级要进行 $N/2$ 个蝶形运算, 其中包括 $N/2$ 次复数乘法和 N 次复数加法。因此, M 级 FFT 算法总共需要 $C_M = N/2 \cdot M = (N/2) \times \lg N$ 次复数乘法运算和 $C_A = N \cdot M = N \times \lg N$ 次复数加法运算。直接进行 DFT 运算需要 N^2 次复数乘法运算和 $N(N-1)$ 次复数加法运算。因此, 采用 FFT 算法减小了计算量, 降低了算法复杂度^[12]。

4 频域反卷积抑制乘性噪声

4.1 大气激光通信实测系统

光信号在大气信道中传输会受到信道中乘性噪声的影响, 要想准确地分析这种噪声的影响并且有效地抑制该噪声, 就必须对光信号在大气信道中的传输特性进行分析, 因此就需要对光信号进行准确的测量。大气激光通信测量系统的组成框图如图 2 所示。

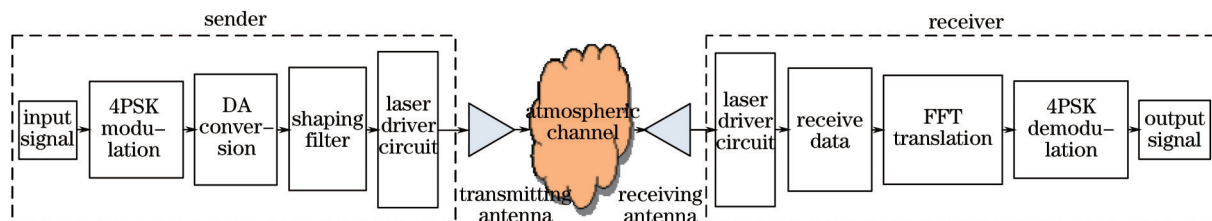


图 2 大气激光通信测量系统组成框图

Fig.2 Atmospheric laser communication measuring system block diagram

该系统主要包括发射端、大气信道和接收端三部分。本文在雨天天气情况下做了大量的场外实验。将测量得到的 4PSK 调制数据用于信道估计, 建立大气随机信道模型, 然后用频域反卷积滤除乘性噪声。

4.2 实验研究

不同天气情况下的大气信道对光信号的衰减情况也各不相同。下面就来分析在不同降水量下大气信道对光信号传输的影响效果。选取 5 个不同时段进行实验测量, 分别是 2013 年 7 月 18 日 09:30、2013 年 8 月 28 日 10:15、2014 年 2 月 18 日 15:30、2014 年 4 月 18 日 09:40 和 2014 年 4 月 21 日 10:00。其中, 2013 年 7 月 18 日为小雨, 2014 年 2 月 18 日为毛毛雨并伴随雾霾天气, 2014 年 4 月 21 日为中到大雨, 其余观测时段均为中雨。采用副载波调制频率为 1.5625 MHz, 抽样频率为 40 MHz 的 4PSK 调制, 发送码元为 16350 bit。图 3~7 是这 5 个时段实测数据经过频域反卷积前后调制信号的星座图。

可以看出, 频域反卷积后 5 组雨天实测数据星座图呈高斯分布, 收敛效果明显。中雨和中到大雨天气反卷积后星座图收敛效果最优, 小雨天气次之, 毛毛雨伴随雾霾天气效果最差。表 1 为调制信号反卷积前后的误码率对比。与星座图对应, 2013 年 7 月 18 日和 2014 年 2 月 18 日的误码率最大, 2013 年 8 月 28 日次之,

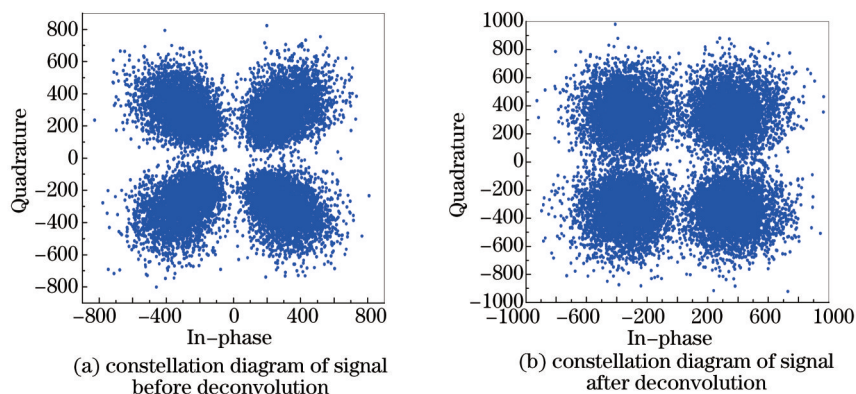


图3 2013年7月18日实测数据星座图

Fig.3 On July 18, 2013, constellation diagram of the test data

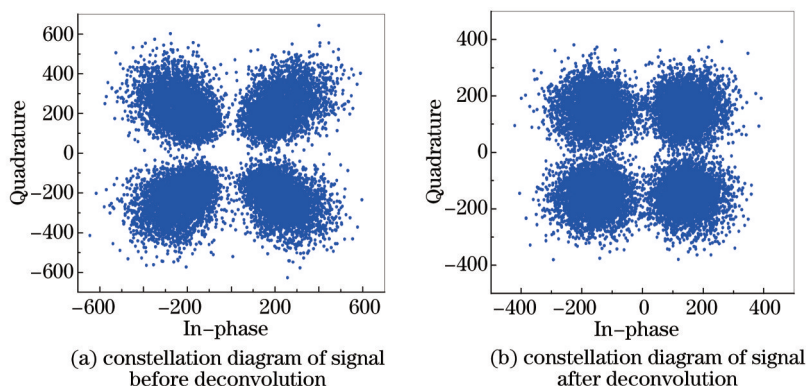


图4 2013年8月28日实测数据星座图

Fig.4 On August 28, 2013, constellation diagram of the test data

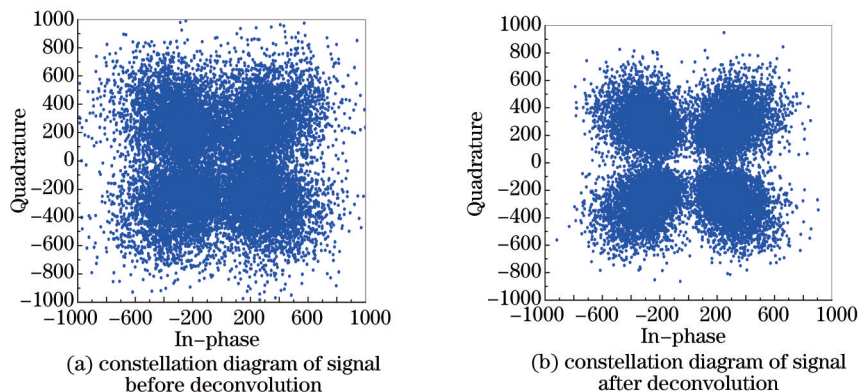


图5 2014年2月18日实测数据星座图

Fig.5 On February 18, 2014, constellation diagram of the test data

2014年4月18日和2014年4月21日的误码率最小。反卷积前后误码率均降低了一个量级,除了毛毛雨天由 10^{-2} 降低到 10^{-3} 以外,其余观测时段的误码率均由 10^{-3} 降低到 10^{-4} 。

表1 实测信道频域反卷积前后误码率对比

Table 1 Measured frequency domain deconvolution channel bit error rate before and after contrast

Observation time	BER (before the deconvolution)	BER (after the deconvolution)
2013.7.18	6.97×10^{-3}	8.56×10^{-4}
2013.8.28	3.49×10^{-3}	2.45×10^{-4}
2014.2.18	1.10×10^{-2}	1.22×10^{-3}
2014.4.18	2.45×10^{-3}	1.83×10^{-4}
2014.4.21	2.14×10^{-3}	1.22×10^{-4}

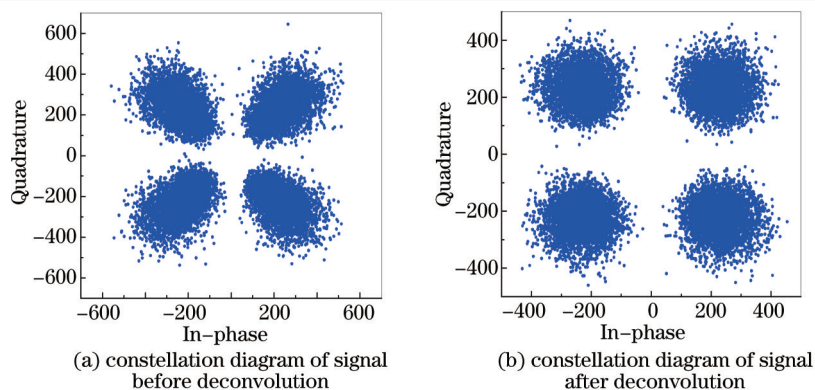


图 6 2014年4月18日实测数据星座图

Fig.6 On April 18, 2014, constellation diagram of the test data

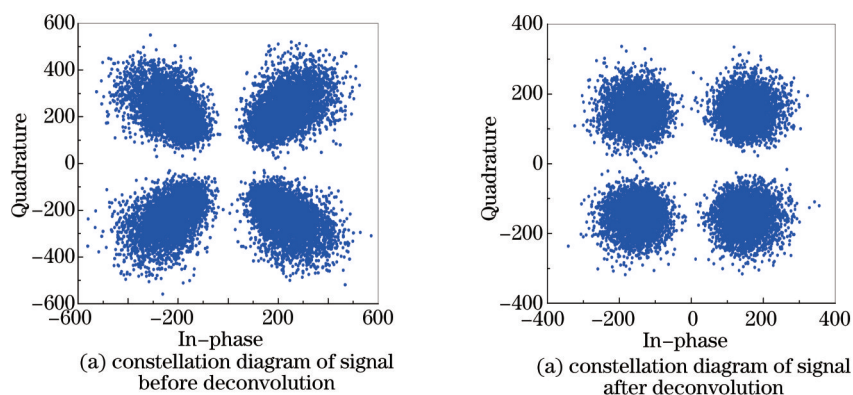


图 7 2014年4月21日实测数据星座图

Fig.7 On April 21, 2014, constellation diagram of the test data

同时,本文还对4月18日数据采用了同态滤波进行了数据处理,如图8所示。对比图8和图6(b),可以看出,频域反卷积后的正交相移键控(QPSK)信号星座图聚敛性更好。

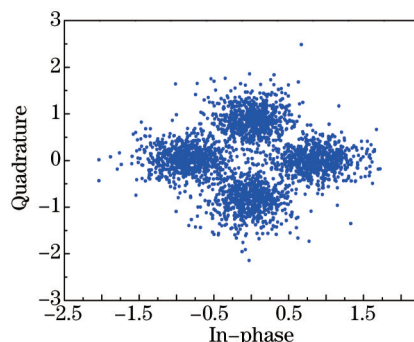


图 8 实测数据同态滤波后星座图

Fig.8 Constellation diagram of the test data after homomorphism filtering

5 结 论

针对大气信道乘性噪声对激光信号的影响,提出了一种频域反卷积的方法抑制大气信道中的噪声,利用实测系统进行大量场外试验,得到雨天天气数据并进行信道估计,建立起大气信道模型,对比分析了5个雨天时段下反卷积前后调制信号的星座图和误码率。结果表明,频域反卷积能够有效抑制大气湍流产生的乘性噪声,系统的误码率性能也相应提高一个量级。

参 考 文 献

1 He Bin. FPGA Digital Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.

- 何 宾. FPGA 数字信号处理实现原理及方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- 2 Li Yafeng, Feng Xiangchu. Wavelet based variational model to remove multiplicative noise[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(3): 477-482.
- 李亚峰, 冯象初. 去除乘性噪声的小波变分模型[J]. *电子学报*, 2012, 40(3): 477-482.
- 3 Zhao Zhilong, Liu Hui, Zhang Huan. Removal of multiplicative noise by the adaptive fidelity term[J]. *Electronic Science and Technology*, 2011, 24(1): 1-8.
- 赵志龙, 刘 卉, 张 欢. 自适应正则化项去除乘性噪声[J]. *电子科技*, 2011, 24(1): 1-8.
- 4 Nelly Pustelnik, Caroline Chaux, Jean-Christophe Pesquet. Parallel proximal algorithm for image restoration using hybrid regularization[J]. *Browse Journals & Magazines*, 2011, 9(20): 2450-2462.
- 5 A K Takahata, E Z Nadalin, R Ferrari. Unsupervised processing of geophysical signals: A review of some key aspects of blind deconvolution and blind source separation[J]. *Signal Processing Magazine*, 2012, 29(4): 27-35.
- 6 B Y Liao, T W Sheu, Y T Yeh, *et al.*. A rupture model for the 1999 Chi-Chi earthquake from inversion of teleseismic data using the hybrid homomorphic deconvolution method[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2013, 170(3): 391-407.
- 7 Chen Dan, Ke Xizheng, Qu Fei. Research on homomorphism filtering technology of wireless optical communication based on four frequency shift keying modulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(2): 0205001.
- 陈 丹, 柯熙政, 屈 菲. 基于四进制频移键控调制的无线光通信同态滤波技术研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 0205001.
- 8 Zhao Changlei, Ye Yueming, Yao Genshun, *et al.*. Prediction deconvolution in linear radon domain on the application of ocean multiples attenuation[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(2): 1026-1032.
- 赵昌垒, 叶月明, 姚根顺, 等. 线性拉东域预测反褶积在海洋多次波去除中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(2): 1026-1032.
- 9 Li Jiao, Zhang Tianxu. Data-weighted spectral deconvolution with Laplacian-Markov priori[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3464-3469.
- 李 姣, 张天序. 基于 Laplacian-Markov 先验数据的加权光谱反卷积模型[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(12): 3464-3469.
- 10 Liu Weijing, Li Bincheng, Han Yanling, *et al.*. Analysis of deconvolution algorithm based on spectral sampling rate[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 043001.
- 刘卫静, 李斌成, 韩艳玲, 等. 基于光谱采样率的反卷积算法分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(4): 043001.
- 11 Guo Lingling, Wu Zepeng, Zhang Liguang, *et al.*. Multichannel blind deconvolution based on-orbit estimation of point spread function for space optical remote sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0428001.
- 郭玲玲, 吴泽鹏, 张立国, 等. 基于多通道盲反卷积的空间光学遥感器在轨点扩展函数估算[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0428001.
- 12 Ai Hong, Chang Qingqing, Deng Dawei. Realization of FFT algorithm based on DSP[J]. *Manufacturing Automation*, 2012, 34(1): 17-20.
- 艾 红, 常青青, 邓大伟. 基于 DSP 的 FFT 算法实现[J]. *制造业自动化*, 2012, 34(1): 17-20.

栏目编辑: 史 敏