

doi:10.3788/gzxb20174612.1206003

基于散斑检测的逆向调制光通信

张忠玉,汪井源,徐智勇,赵继勇,韦毅梅

(解放军理工大学 通信工程学院,南京 210007)

摘 要:为了解决长距离逆向调制光通信系统中弱信号难以检测的难题,将散斑检测方式用于逆向调制光通信中,实现对逆向调制端弱小光信号抖动的检测,设计了系统方案和检测原理,并实验完成了 60 m 距离上 1.3 kHz 数字信号的传输和 330 m 距离上模拟语音的传输,该检测方式简单、便宜、易于模块化,在低速的逆向调制光通信系统中有良好的应用。

关键词:光通信;大气光通信;逆向调制;猫眼;散斑检测

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)12-1206003-8

Modulating Retro-reflector Communication System Based on Speckle Detection

ZHANG Zhong-yu, WANG Jing-yuan, XU Zhi-yong, ZHAO Ji-yong, WEI Yi-mei

(Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210014, China)

Abstract: In the long-range Modulating Retro-Reflector (MRR) communication system, the retro-reflective signal is weak and difficult to be detected. In this manuscript, a novel detection mode of MRR communication based on speckle technology is proposed, which can detect small fluctuation of the light from the modulator. The novel detection mode is simple, modular, inexpensive and suitable for low speed MRR communication. System design as well as the detection principle is described. The experiment part was completed the transmission of 1.3 kHz digital signal on 60m distance and analog voice transmission on 330 m distance.

Key words: Optical communications; Free space optical communication; Modulating retro-reflector; Cat-eye; Speckle measurement

OCIS Codes: 060.4510; 010.1290; 040.1880; 030.1670

0 引言

逆向调制光通信是一种新型的无线光通信方式^[1-3].在传统无线光通信中,接收机和发射机常常会被配置于不同的两端,传输中由于湍流、平台移动等因素的影响,光信号的传输路径常常会发生改变.为了确保实现点对点通信,传统的无线光通信对跟瞄系统提出了较高的要求^[1,4-5].和传统的无线光通信系统不同,逆向调制光通信系统应用一个光学的逆向调制器来调制光信号.首先询问端发出询问光束到逆向调制端,逆向调制端通过逆向调制器对询问光束进行信号调制,并使得调制后的光信号沿原光路返回询问端最终被询问端检测器接收.这样的结构就使得系统对逆向调制端的体积、重量、功耗、费用等需求大大降低,在小平台工作上有重大的应用价值^[2].

逆向调制光通信系统拥有诸多优点,其系统链路的研究也成为一大热点.美国海军实验室对不同种逆向调制器件进行了链路分析,并比较了不同逆向调制器件在数据传输中的优劣势^[6].国防科技大学对逆向调制

基金项目:解放军理工大学 2016 年度校预先研究基金项目(No.KYTYZLXY1602-1)

第一作者:张忠玉(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为逆向调制光通信.Email:zhang_zhong_yu@163.com

导师(通讯作者):汪井源(1975—),男,副教授,博士,主要研究方向为无线光通信.Email:13813975111@163.com

收稿日期:2017-06-28;录用日期:2017-08-29

<http://www.photon.ac.cn>

光通信系统传输中出现的散射问题进行了大量的研究,他们发现提高逆向调制器的面积、限制激光发射和接收时的发散角,系统性能将会有较大幅度的提升^[7-8].英国 BAE 系统公司对逆向调制无线光通信链路的功率损耗进行了估算,并且通过实验展现了几公里内的损耗情况^[9].瑞典国防研究局分析了应用猫眼逆向调制器件进行通信时的链路损耗,进行了相关实验验证^[10].和传统的无线光通信不同,逆向调制光通信需要在空间中进行两次传输,这就导致逆向调制光通信的损耗远远高于传统的无线光通信系统.传统无线光通信的链路损耗和距离的平方成正比,而对于逆向调制光通信系统,其链路损耗和距离的四次方成正比,所以逆向调制光通信的传输距离将受到严重的限制.在逆向调制光通信中,目前对于调制后的回波信号大多是采用光电二极管的检测方式(例如 PIN 或者 APD).但是这种检测方式缺乏对弱小抖动信号的检测能力,所以如何对逆向调制光通信中弱小抖动光信号进行检测成为一项难题.

本文提出了一种逆向调制无线光通信检测方式,即基于散斑照相术检测弱小信号的检测方式.构成的逆向调制光通信系统在检测端有对弱信号检测能力强、造价低廉、使用简单、易于集成化等优点,在 4 kHz 以下的低速逆向调制光通信系统中有较好应用.采用的检测方式是基于散斑运动的检测,而散斑本身在提供强度信息的同时,也能提供位置信息,位置信息的获取将会在系统的跟瞄中发挥巨大作用,所以这种新型的逆向调制无线光通信系统将会在无人机和海事上有着广泛应用.

1 系统设计及检测原理

当相干性高的光束照射到光学粗糙的物体表面时,物体表面的光场中便能观察到散斑现象.物体表面相对于相干性高的光束而言是光学粗糙的,所以物体表面反射的光束会发生相位冲突,从而产生一种明暗对比度高的颗粒状图案,这种无规则分布的颗粒状图案就是散斑.散斑不仅存在于空间中,而且可以在成像面处被收集,只需要在光场处放置一个特定的接收屏或者光电检测器件,便能收集到具有相位信息和幅度信息的散斑图案.散斑的幅度信息和相位信息会随着被照射物体的变化而变化,通过分析散斑的变化就能很容易得出被照射物体的变化情况,所以基于这个基本原理用散斑检测来提取逆向调制的回波信号的思路是可行的.

1.1 系统设计

散斑照相术拥有测量范围大、灵敏性高、检测方式简单等优点.近年来,随着高速 CMOS 的发展,散斑检测技术呈现精细化和高效化发展趋势,这对降低所设计系统的复杂性都有着巨大的帮助.

猫眼逆向调制器件是由一个透镜和一个位于焦点处的反射面组成.当调制信号加载到猫眼逆向调制器上时,位于焦点处的反射面便会发生微小的位移变化来改变光信号从而达到调制信号的目的.基于这个原理,我们设计用散斑照相术来检测这种微小的位移变化从而达到还原信号的效果.

所设计的系统框图如图 1:询问端,一束经过准直后的激光以较小的发散角度照射到猫眼逆向调制器上.在逆向调制端,压电陶瓷片将经过透镜汇聚的入射光束调制后,使询问光束原路返回,由于压电陶瓷片的表面相对于激光的波长量级来说是光学粗糙的,所以可以形成散斑图案.在询问端处,通过一个可调节的长焦镜头对散斑图案进行收集,并将收集后的数据导入计算机进行相应处理,最终可以还原出信号.

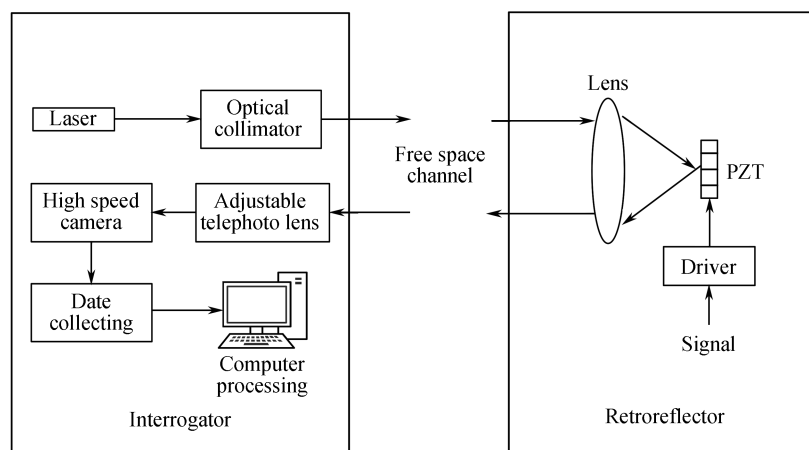


图 1 系统设计示意图

Fig.1 Schematic description of the proposed system

1.2 检测及处理

对散斑图案的处理可以是模拟化的也可以是数字化的,这里采用数字化的处理.获得的数字散斑图案是通过连续化的模拟散斑图案采样而获得的.在进行采样模拟和数字化转换储存进计算机时,每个像素上的强度信息便被转换成灰度值信息而记录.灰度值的大小与用于数字和模拟转换的微处理器有关,通常用的是 2^8 量级,其数值位于0和255之间.

本文采用数字散斑相关法来分析散斑图案.数字散斑相关法是一种受环境影响小、无需冗长乏味计算的一种强大而有效的分析方法.它的基本原理是:记录被测物体变化前后的两幅散斑图案并将所获得的散斑图案转化为数字灰度场信息存储,再用一个事先定义好的相关函数进行一定区域的数字图像相关运算,最后通过观测两幅图案中相关函数最大点位置,便可得到所需测量的信息.由于散斑图案信息是独立储存在计算机中的,所有处理步骤可在计算机中同步实时进行,所以用这种方法将大大提高还原信号的速度.

1.3 原理解释

在利用数字散斑相关法测量时,所获得的数字散斑图案信息是采样后的离散灰度信息.虽然经过相关运算后我们能获得相对较为准确的物体位移信息,但是由于物体的位移量是十分微小的,所以其位移量并不一定恰巧是整像素信息.为了减小物体在亚像素内移动时测量误差,在实际设计测量方面,不是将相机的镜头聚焦在物体上,而是进行适当的离焦处理.经过离焦处理后,在观测平面我们看到的将是散斑图案在平面内的振动或者位移,而散斑图案自身的观测几乎不会发生变化.通过对散斑图案的位移量分析,我能得到被照射物体位移量的变化从而还原出所调制的信号.

按照图2,以物体被照射中心为零点位置,物体的横截面为 xy 平面,垂直于物体横截面到探测器方向为 z 轴方向建立一个坐标系.所探测到的散斑场图案是受到猫眼逆向调制器的影响而变化,所以分三步具体分析:

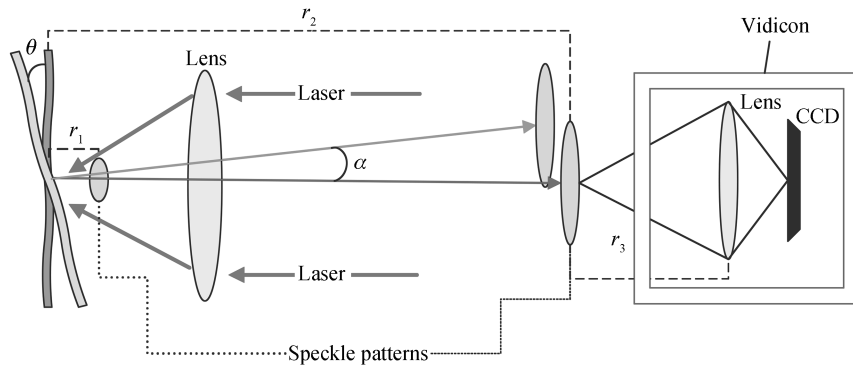


图2 基于散斑检测系统原理图

Fig.2 Principle of speckle photography in the system

1) 靠近被测物体表面处

假设在所形成的散斑场前没有任何的光学透镜,根据 Goodman 提出的随机行走模型以及菲涅尔成像原理,在靠近物体表面 r_1 处,其散斑场可以表示为

$$A_{r_1} = \sum_{n=1}^N \frac{A_n}{r_n} \exp(ikr_n) = \iint \exp(ikr_1) \exp\left\{\frac{\pi i}{\lambda r_1} [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]\right\} dx dy = A_{r_1}(x_0, y_0) \exp[i\Phi(x_0, y_0)] \quad (1)$$

式(1)中,假设物体的反射光是均匀散射的,且式子采用了近轴近似法来进行运算.式中的 n 是物体表面随机散射面元的数量, λ 是光波长, r_n 是第 n 个面元到观测面的距离, A_n 为第 n 个面元反射出来的波的幅度, k 是波数, x_0 和 y_0 是散斑的坐标.

2) 紧贴透镜后

在猫眼逆向调制系统中,薄透镜的作用主要是对散斑场进行一次相位调制(忽略透镜带来的损耗影响).根据透镜成像原理,经过相位调制后的散斑场可以表示为

$$A_t = A_{r_1} \exp\left[-i \frac{k}{2f_1} (x_0^2 + y_0^2)\right] = A_t(x_0, y_0) \quad (2)$$

式中 f_1 为猫眼逆向调制器中薄透镜的焦距。

3) 相机离焦接收处

相机离焦接收的效果可以等效为:将成像面从距离 r_1 处移到距离 r_2 处.对比式(1)的表达,离焦接收情况下会发生一些变化,具体可以表示为

$$A_{r_2} = \sum_{n=1}^N \frac{A_n}{r_n} \exp(ikr_n) \exp\left[-i \frac{k}{2f_1}(x_0^2 + y_0^2)\right] = \iint \exp(ikr_2) \exp\left\{\frac{-2\pi i}{\lambda r_2}(xx_0 + yy_0)\right\} \exp\left[-i \frac{k}{2f_1}(x_0^2 + y_0^2)\right] dx dy = A_{r_2}(x_0, y_0) \exp[i\Phi(x_0, y_0)] \exp\left[-i \frac{k}{2f_1}(x_0^2 + y_0^2)\right] \quad (3)$$

$$I(x_s, y_s) = \left| \iint A_{r_2} h(x_0 - Mx_s, y_0 - My_s) \right|^2 \quad (4)$$

由于成像散斑面距离被测物面相对较远,可以用远场近似法来处理表示.式(4)中 h 是散斑的空间传递函数,这个空间传递函数中包含光学空间传递、传感器在像素模糊时产生的误差等因素. x_s 和 y_s 是散斑图案在接收面上的坐标. M 是成像系统放大倍数的倒数,它的大小表示为

$$M = \frac{r_3 - f_2}{f_2} \approx \frac{r_3}{f_2} \quad (5)$$

式中 f_2 是相机的焦距。

在进行分析时,默认选用的压电陶瓷片为刚性物体,所以将其移动方式分为简单的三种方式:横向变化、轴向变化以及倾斜角变化。

平面内移动时,通过式(3)可以看到,散斑的幅度 A_{r_2} 函数会随着物体的移动以一定的比例同步移动.由于幅度的函数分布只是移动没有改变,所以傅里叶变化后的强度值也不会受到影响.而且即便有微小的变化,经过空间传递函数 h 后的值也会变化非常小,从而导致不易被探测端检测.所以这种情况下的散斑图案可以认为是没有变化的。

轴向移动时, A_{r_2} 和 h 都会受到影响.但是这种情况下的散斑图案仍然可以认为基本是没有变化的,因为压电陶瓷片在外加调制信号时,轴向上的变化 Δr 相对于观测距离 r_2 来说实在是太小了,在加上照相时成像微缩的原因,轴向上的变化量几乎可以忽略不计。

最后一种情况为倾斜角的变化.这种情况下散斑场相当于被引入了一个附加相位,所以散斑场将会发生改变,可以表示为

$$A'_{r_2} = \sum_{n=1}^N \frac{A_n}{r_n} \exp(ikr_n) \exp[i(\alpha_x x + \alpha_y y)] \exp\left[-i \frac{k}{2f_1}(x_0^2 + y_0^2)\right] = \iint \exp(ikr_2) \exp\left\{\frac{-2\pi i}{\lambda r_2}(xx_0 + yy_0)\right\} \exp[i(\alpha_x x + \alpha_y y)] \exp\left[-i \frac{k}{2f_1}(x_0^2 + y_0^2)\right] dx dy = A'_{r_2}(x_0, y_0) \exp[i\Phi(x_0, y_0)] \exp[i\varphi(\alpha_x x_0, \alpha_y y_0)] \exp\left[-i \frac{k}{2f_1}(x_0^2 + y_0^2)\right] \quad (6)$$

$$\alpha_x = \frac{4\pi \tan \theta_x}{\lambda} \quad (7)$$

$$\alpha_y = \frac{4\pi \tan \theta_y}{\lambda}$$

$$I(x_s, y_s) = |A'_{r_2} h(x_0 - Mx_s, y_0 - My_s)|^2 \quad (8)$$

式中 θ 代表的是物体前后变化的角度, θ_x 和 θ_y 分别的表示在 x 和 y 方向上的倾斜角.通过式(6)可以看出这种情况下散斑的幅度函数将发生较大的改变.此时以物体横截面为 xy 面,过被照射中心点垂直与横截面为 z 轴,建立一个动态的坐标系.可以发现,散斑图案上的明暗点在探测面上只是在移动,整体来说自身几乎并没有发生改变(对于两幅图案而言相关性几乎没发生变化),并且这种移动由于离焦的因素可以较方便的被检测到,所以可以根据散斑图案的移动来逆推出物体自己的移动。

虽然散斑是一种随机变化的现象,并且以上三种运动发生常常是同时发生且相互影响的.但是既然其中

两种方式的变化不会影响散斑的探测(或者忽略不计),第三种方式在探测面反应出的变化仅仅是散斑图案的移动,那么我们可以近似认为这三种变化整体作用的结果是导致在检测面上散斑图案的移动.所以用探测散斑的移动代替应物体的变化是可行的.

追踪散斑图案中最亮点区域的变化,利用 coms 采集经数字化的灰度值信息,再用数字散斑相关法进行分析,可以很容易得出压电陶瓷片的微小变化信息,从而有效的还原出调制信号.

2 实验验证

2.1 信号调试实验

在第一个实验中,将在近距离逆向调制无线光通信中还原出调制信号.参照系统示意图(图 1)搭建出如图 3 所示的实验实物图.实验中采用的光源是波长为 650 nm,功率为 20 mW 的半导体激光器.图像采集集中应用的可调节长焦镜头焦距范围为 70 mm 到 200 mm,其最小光圈值 F2.8,最大光圈值 F22.采用的 CMOS 是 $9.9 \mu\text{m} \times 9.9 \mu\text{m}$ 像素的 NOIL1SM0300A 型器件,通过 Matlab 的进行控制后,这种 CMOS 可以在 32×16 的窗口上达到每秒 10 K 帧的采集速率.逆向调制端的逆向调制器件是由一个薄傅里叶透镜(边长 9.8 cm,焦距 15 cm)和一个反射器(镀上全反射膜的压电陶瓷片)组成.信号调试实验过程中,信息传输距离大约为 5 m.

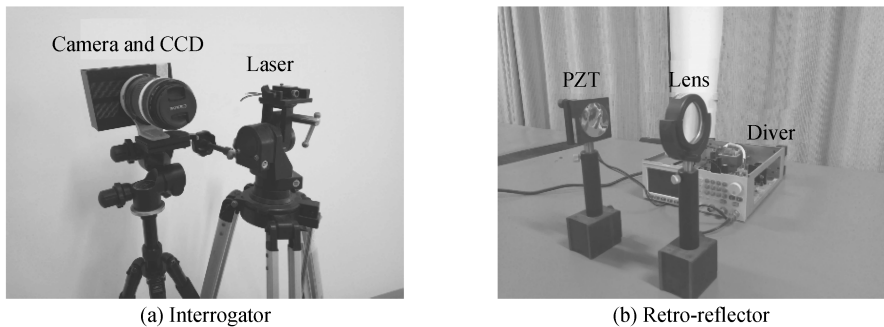


图 3 实验实物图

Fig.3 Physical figures of the experiment

首先,将一个幅度为 6 V 频率为 500 Hz 的正弦波信号加载到逆向调制器上[图 5(a)],并通过 Matlab 将 CMOS 的工作参数设置为在 32×32 像素内,采样率大约为 7 Kfps(frames per second).将通过数字散斑相术原理还原信号并利用 matlab 进行傅里叶变化,得出的幅频特性如图 4.

由图 4 可以看出用这种方法探测出的信号大约为 500 Hz,为了看到提取信号的具体信息,截取一段检测信号的时间幅度图来观测,并且手动算出信号的频率来验证检测的可靠性.该检测方式还原出的信号如图 5(b)所示,可以看出:从 28 246 到 28 306 点上共包含信号的 5 个周期,且由 matlab 可以读出此处采用的 CMOS 采样速率为 7 376 fps.可以算出通过散斑检测方式还原出的信号为 498.4 Hz,这和加载的信号频率几乎是一致的.

随后,将加载调制的 $\sin x$ 信号转换为 $\sin x/x$,调制的原始信号和系统信号还原的结果分别如图 5(c)和图 5(d)所示.对图 5(d)以同样的方式计算,可以算出还原出的信号频率约为 479.0 Hz.所以在近距离信号传输实验上,采用散斑检测的方式来还原信号是可行的.

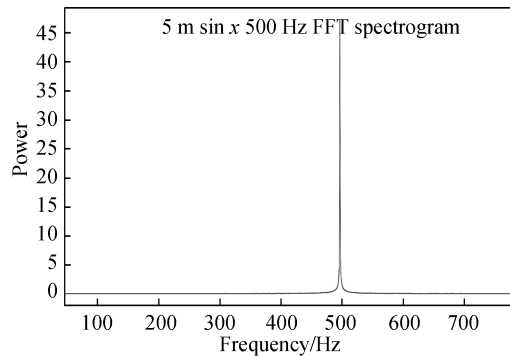


图 4 检测到的 500 Hz 正弦信号的频谱

Fig.4 Detected 500 Hz frequency spectrogram

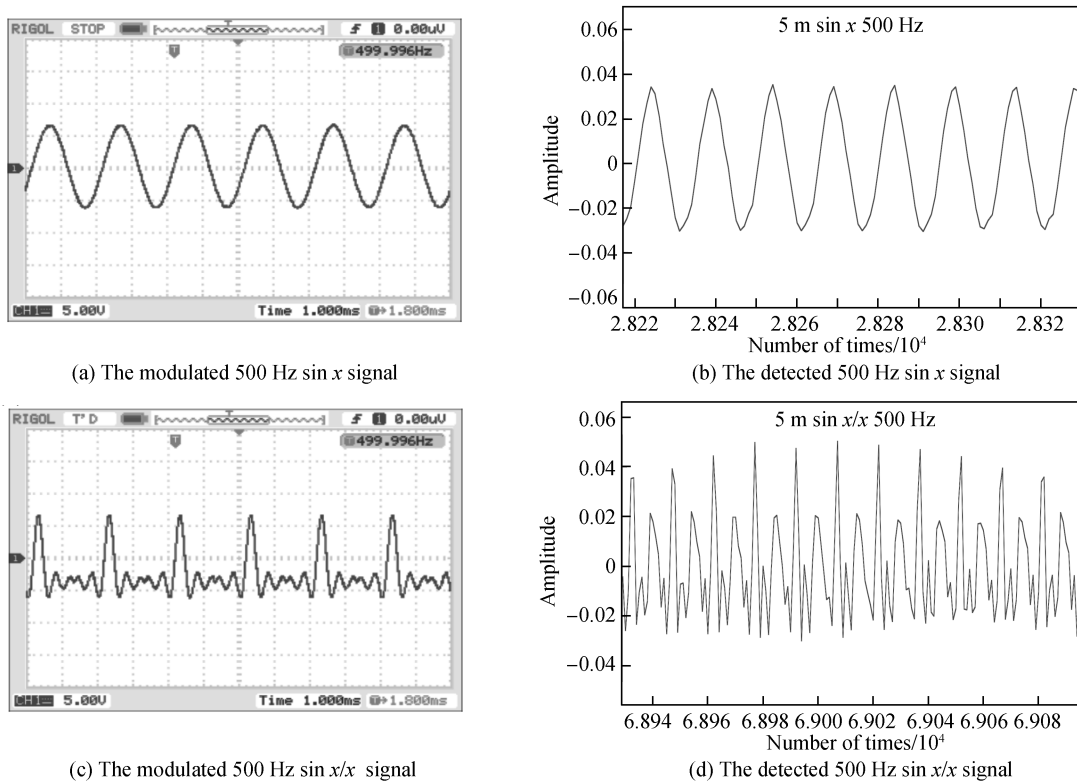


图5 $\sin x$ 信号和 $\sin x/x$ 信号的幅度谱
Fig.5 Amplitude spectrum of $\sin x$ signals and $\sin x/x$ signals

2.2 短距离系统性能验证

搭建了一个距离为 60 m 的逆向调制无线光通信系统,光源仍然选用波长 650 nm、功率 20 mW 的半导体激光器,CMOS 的工作区间设置在 32×32 像素内,采样速率为 7 516 fps.为了方便光路的寻找以及减小背景干扰等原因,此次实验选取为夜间进行并在检测器处进行了适当的滤光处理.搭建好实验系统,调节完光路后,幅度 8 V 速率为 1.3 KHz 的信号被加载到逆向调制器上,信号调制和检测还原的结果如图 6.

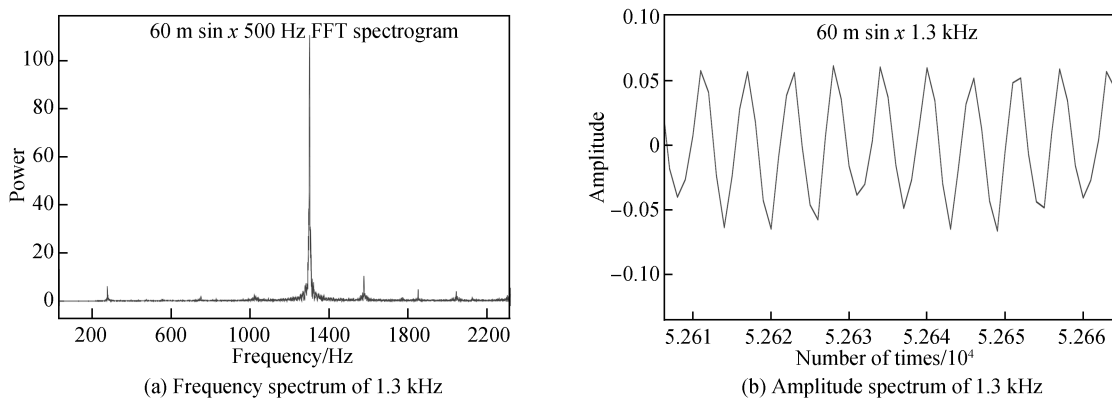


图6 距离为 60 m 时检测到信号的结果
Fig.6 Detection results of 60 m

由检测结果图可以看出,检测到信号的频率谱成分大多集中在 1.3kHz 附近且比较纯粹,幅度谱中波形有部分产生了畸变,但在 60m 的逆向调制光通信中总体效果仍令人满意.

图 7 是传输一个模拟信号的实验结果.此次实验系统的逆向调制端设置在 330m 处,将放大后的语音信号加载到逆向调制器上,然后在检测端对其进行还原.在利用数字散斑检测原理,对检测的信号还原时分别采用了不降噪和降噪两种处理方式,最终的处理结果分别如图 7(a)和图 7(b).

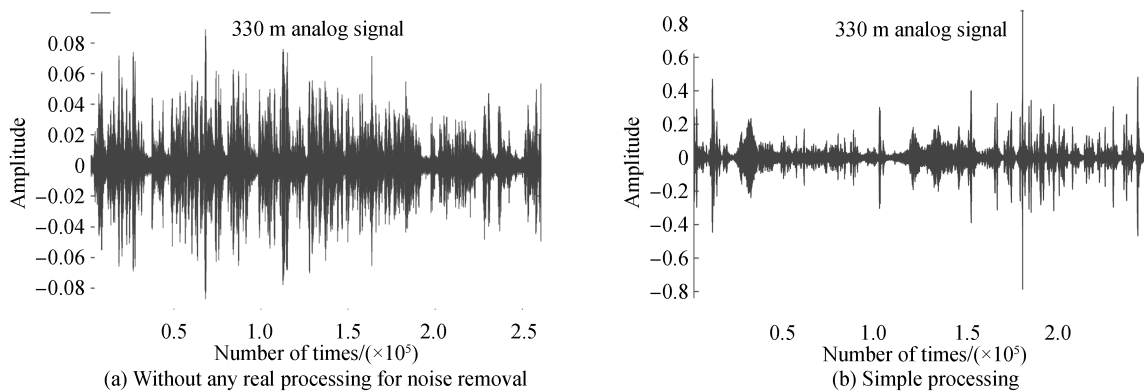


图7 330 m 还原得到的语音信号

Fig.7 The reconstructed speech signal in 330 m

综合以上实验可以总结出:在短距离通信中该逆向调制光通信系统来传输信号是可行的.虽然大气信道中拥有诸多不稳定因素,会导致信号的失真、变形等,严重不利于信号的传输.但由于本文提出的检测方案是基于数字散斑检测原理,是对图像相关性检测得出的数据,所以受湍流影响较小,并且可以通过改变数据处理方法来有效的提高信号还原的效率.

3 结论

提出了一种新型的逆向调制光通信检测方式.该逆向调制光通信检测可以在 330 m 内完成信息传输,具有结构简单、成本低廉、易于模块化、对弱信号变化敏感等优点,适用于低速的逆向调制光通信系统.实验部分分别展现了 5 m、60 m 和 330 m 下此系统的性能情况.实验中大气信道仍然对逆向调制光通信系统有着严重的影响,但随着近代科技在计算机处理能力、图像采集技术、高分辨率的探测器以及数字图像处理算法等方面的提高,未来这种新型逆向调制系统的通信性能会获得极大的改善.

参考文献

- [1] OHGREN J, KULLANDER F, WANG Q, *et al.* A high-speed modulated retro-reflector communication link with a transmissive modulator in a cat's eye optics arrangement[C]. Proceedings of SPIE, 2007, **6736**: 673619.
- [2] RABINOVICH WS, GOETZA PG, MAHON R, *et al.* Cat's eye quantum well modulating retro-reflectors for free space optical communications[C]. Proceedings of SPIE, 2003, **497**: 104-114.
- [3] GOETZP G, RABINOVICH W S, MAHON R, *et al.* Modulating retro-reflector lasercom systems for small unmanned vehicles[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, **30**(5): 986-992.
- [4] LI Da-she, HUA Zhen, GUAN Shao-peng. Study of Acquisition, Pointing and Tracking (APT) system for wireless laser communication[J]. *Journal of Yantai University*, 2007, **20**(3): 38-42.
李大社,华臻,管绍鹏. 无线激光通信 APT 系统的研究[J]. 烟台大学学报:自然科学与工程版,2007,**20**(3):38-42.
- [5] HOT H, TRISNO S, SMOLYANINOV I I, *et al.* Studies of pointing, acquisition, and tracking of agile optical wireless transceivers for free-space optical communication networks[C]. Proceedings of SPIE, 2004, **5237**: 147-158.
- [6] GOETZP G, RABINOVICH W S, MAHON R, *et al.* Modulating retro-reflector devices and current link performance at the naval research laboratory[C]. Military Communications Conference, 2007, 1-4244-1513-06/07.
- [7] JIA Hong-hui, YIN Hong-wei, ZHANG Hai-liang. Study on the heterodyning scattering of retroreflective free-space optical communication with optical heterodyning[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2013, **30**(11): 2286-90.
- [8] YIN Hong-wei, LAN Tian-peng. Theoretical evaluation of scattering effect on retroreflective free-space optical communication[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, **29**(12): 2606-2611.
- [9] HANDEREK V, LAYCOCK L. Feasibility of retroreflective free-space optical communication using retroreflectors with very wide field of view[C]. Proceedings of SPIE, 2004, **5614**: 1-9.
- [10] OHGREN J, KULLANDER F, JOHAN L, *et al.* A high-speed modulated retro-reflector communication link with a transmissive modulator in a cat's eye optics arrangement[C]. Proceedings of SPIE, 2007, **6736**: 673619.
- [11] TIZIANI H J, PEDRINI G. From speckle pattern photography to digital holographic interferometry[Invited][J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(1): 30-44.
- [12] MARGALITI, GARCIA J, TEICHER M, *et al.* Simultaneous remote extraction of multiple speech sources and heart beats from secondary speckles pattern[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(24): 21566-21580.

- [13] WANG Jing, WANG Ya-fei. Properties of cat-eye modulating retro-reflector and its application with piezoelectric transducer[J]. *Optik*, 2014, **125**(16): 4501-4504.
- [14] CHANG C, TSAI J. Design, fabrication, and characterization of tunable cat's eye retroreflector arrays as optical identification tags[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(3): 384-391
- [15] ZHOUP, GOODSON K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC)[J]. *Optical Engineering*, 2001, **40**(8): 1613-1620.
- [16] SONG L, ELSON D S. Effect of signal intensity and camera quantization on laser speckle contrast analysis[J]. *Biomedical Optics Express*, 2013, **4**(1): 89-104.
- [17] LECOMPTED, SMITS A. Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, **44**(11): 1132-1145
- [18] QIU Jian-jun, ZHANG Hong-yan, LUO Wei-hua, *et al.* Impact of average image speckle size on laser speckle imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1863-1867.
邱建军,张红艳,骆卫华,等. 像面散斑平均尺寸对激光散斑成像的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1863-1867.