

利用超连续谱激光实现自由空间光通信

黄 龙,冯国英,廖 宇

(四川大学 电子信息学院 激光微纳工程研究所,四川 成都 610064)

摘 要: 超连续谱光源具有丰富的带宽,是信号载体的优秀候选者。设计并搭建了利用超连续谱光源的空间无线光通信系统,讨论了超连续谱产生的条件以及输出光斑直径不同位置下的光谱。采用了电光调制方式对超连续谱光源进行调制,通过比较输入与输出的数字方波信号证明了电光调制进行超连续谱空间光通信的可行性。成功利用该系统演示了对原始图像信号的采集和显示,最后通过对接收端信号的整形放大恢复出了原始信号,实现了图像信号在 4 m 范围内的传输。实验结果表明:将超连续谱作为光信号载体,在空间大气信道条件下可以实现对图像信号进行无线传输。

关键词: 超连续谱激光; 自由空间光通信; 电光调制; 非线性光学

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3530-05

Free space optical communication based on supercontinuum laser source

Huang Long, Feng Guoying, Liao Yu

(Institute of Laser & Micro/Nano Engineering, College of Electronics & Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Supercontinuum laser source is an excellent candidate as signal carrier because of its wealth of bandwidth. Free space optical communication system based on supercontinuum laser source was designed and established. The conditions of supercontinuum generation and the out spectrum at different locations of laser beam spot were discussed. The supercontinuum laser source was modulated by electro-optic modulator. And the feasibility of free space optical communication based on supercontinuum laser source which used electro-optic modulator was proved by comparing the input and output of digital square wave signals. Besides, the image signals collection and display were successfully demonstrated. Finally, the original signals were recovered by the shaping amplification of receiving end signals, the image signals transmission in the range of 4 m was successfully realized. According to the experiments mentioned above, supercontinuum laser source under the condition of the free space can realize transmission of wireless video signals.

Key words: supercontinuum laser source; free space optical communication; electro-optic modulation; nonlinear optics

收稿日期:2015-04-09; 修订日期:2015-05-11

基金项目:四川大学-中国工程物理研究协同创新联合基金(0020505419507)

作者简介:黄龙(1989-),男,硕士生,主要从事光通信和激光通信方面的研究。Email:h249139571@126.com

导师简介:冯国英(1969-),女,教授,博士生导师,博士,主要从事固体激光技术和光通信方面的研究。

Email:guoing_feng@scu.edu.cn

0 引言

无线光通信^[1](Wireless Optical Communication, WOC)是一种将光作为载体,在无需光纤的情况下实现通信的系统。根据不同的应用场景,主要分为室内无线光通信、大气光通信、水下无线光通信等。相比于传统的射频通信技术,无线光通信频谱更加丰富^[2],包括从红外到可见光再到紫外等可用带宽资源,可以大大缓解人们对射频频谱资源日益增长的需求。而超连续谱光源的谱宽在 0.4~2.4 μm ,覆盖整个可见光范围,是光通信的优秀候选者。

窄带入射脉冲在介质中由于极度的非线性光谱展宽效应而产生的宽带连续谱被称为超连续谱(Supercontinuum)。1970年,Alfano和Shapiro^[3]首次报道了利用波长为 530 nm 的 GW 级皮秒激光在块状 BK7 光学玻璃中传播后,可以得到覆盖 400~700 nm 整个可见光范围的超连续谱。从此超连续谱被广泛地研究^[4-6],人们陆续在固体材料、 H_2O 和 D_2O 等液态材料中观察到超连续谱的产生。20 世纪 90 年代末,光子晶体光纤的出现^[7-8]更是引起了超连续谱产生的革命。如今,超连续谱(SC)在高精度频率计、医疗成像和光通信等各方面被广泛应用。然而,超连续谱在光通信上的应用主要集中在光纤通信^[9],相比于光纤通信,超连续谱在自由空间光通信上的应用具有以下几点优势:(1) 机动灵活、对市政建设影响较小、运行成本低、易于推广。无需架设电缆、埋设光纤及高大的发射台,因此施工周期可以大大减少,节省工程成本。(2) 可以在一定程度上弥补光纤的不足,它的容量与光纤接近,但价格却低得多。在同样的信息容量和传输速率情况下,自由空间光通信的性价比更高。(3) 频谱资源丰富,使用点对点的系统,在确定收发两点之间视线不受阻挡的通道后,不需要申请频率执照,且在全世界范围内均不受管制,可以快速安装完毕,投入运行。(4) 在与网络连接的情况下,对运行的协议透明,可组成点对点、星形和拓扑型结构的网络。(5) 在空间光通信中,载有信息的激光束传播时的发散角很小,具有很好的通信信道稳定性,并且不会受到通常意义上的电磁干扰,所以它具有很好的保密、抗干扰能力。

文中分析了超连续谱产生的条件以及超连续谱

激光器的输出光谱和光斑直径不同位置下的光谱,证明了以超连续谱光源作为信息载体并且利用电光调制实现空间光通信的可行性。利用超连续谱光源设计并搭建了一套基于超连续谱空间光通信实验平台,验证了实验平台的可行性,成功地对图像信号进行了采集、传输和恢复。这些结果对人们在超连续谱空间光通信的进一步深入研究具有重要的参考价值。

1 原理

1.1 超连续谱光源特性

目前产生超连续谱光源的常用方法是利用超短脉冲在光子晶体光纤传输,源于光纤中非线性自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)及受激拉曼散射(SRS)等非线性效应和色散效应共同作用从而形成超连续谱。激光脉冲在光子晶体光纤中的传输由 Maxwell 方程组描述。由于光纤是无源介质,从 Maxwell 方程组可以得到以下波动方程

$$\nabla \times \nabla \times E = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: c 为真空中的光速; $E(r, t)$ 为电场强度矢量; $P(r, t)$ 为极化强度矢量。将电极化强度分为线性和非线性两部分,即:

$$P(r, t) = P_L(r, t) + P_{NL}(r, t) \quad (2)$$

可以将公式(1)改写成:

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P_L}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 P_{NL}}{\partial t^2} \quad (3)$$

可以进一步将公式(3)简化成用非线性薛定谔方程来描述:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha A}{2} + \frac{i\beta_2 A}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma \left(|A|^2 A + \frac{2i}{\omega_0} \frac{\partial(|A|^2 A)}{\partial T} - T_{RA} \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right) \quad (4)$$

式中: A 为慢变包络振幅; α 为光纤损耗系数; z 为传输距离; ω_0 为中心频率; $T=t-z/v_g$ 为以群速度移动的参考系中的时间坐标; β_2 、 β_3 分别为二阶、三阶色散系数;等式右侧的三项分别表示了自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)和受激拉曼散射(SRS)对传输脉冲的作用。

由于光子晶体光纤中超连续谱的产生非常复杂,不仅光纤结构、高阶色散、自相位调制、交叉相位调制等因素影响超连续谱的产生,并且脉冲的宽度、中心频率以及初始噪声都将会影响超连续谱的质

量,从而也会对超连续谱空间光通信产生重要的影响。

采用武汉安扬激光公司生产的 SC-5-FC/APC 超连续谱光纤激光器,经过测试,其各项参数如表 1 所示。其光斑直径不同位置的输出光谱如图 1 所示。

表 1 超连续谱光纤激光器参数

Tab.1 Parameters of supercontinuum fiber laser

Feature	Test data
Total power/mW	860
Minimum wavelength/nm	480
Maximum wavelength/nm	1 700
Fundamental pulse width/ps	138
Repetition/MHz	5

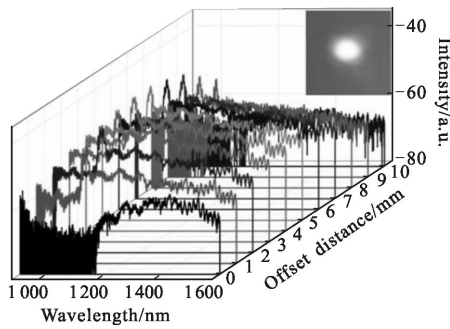


图 1 光斑直径不同位置的输出光谱

Fig.1 Output spectrum at different locations of laser beam spot

1.2 超连续谱光源调制

对超连续谱光源采用的调制方式为电光调制,电光调制是晶体电光效应在光通信领域的一个重要应用。物质的折射率在外加电场条件下发生变化的现象就是电光效应,电光调制又有调幅和调相之分。调相只改变其相位,并不改变输出光的偏振态;调幅借助于晶体的电光效应,将光束从线偏振光变为椭圆偏振光,再经检偏器起偏为线偏振光,以实现强度调制。

图 2 为晶体电光调制原理图,实验中采用的晶体为铌酸锂(LiNbO₃),起偏器的偏振方向平行于 LiNbO₃ 的 x 轴,检偏器的偏振方向平行于 LiNbO₃ 的 y 轴,入射光束垂直于 LiNbO₃ 的 xoy 面,振幅大小为 A,则入射光强为 I_i=A²。当光束沿着 z 方向传播时,给晶体加上平行于 x 轴方向的电场 E_x 后,经过起偏器的线偏振光在 xoy 面上沿 x' 的振幅大小为 E_x(0)=A/√2,

y' 的振幅大小为 E_y(0)=A/√2。x' 和 y' 方向上折射率不同,光通过长度为 l 的晶体后,由于电光效应,x' 和 y' 两分量之间因折射率不同而产生相位延迟量 δ,则可得:

$$\begin{cases} E_{x'}(l)=A/\sqrt{2} \\ E_{y'}(l)=Ae^{-i\delta}/\sqrt{2} \end{cases} \quad (5)$$

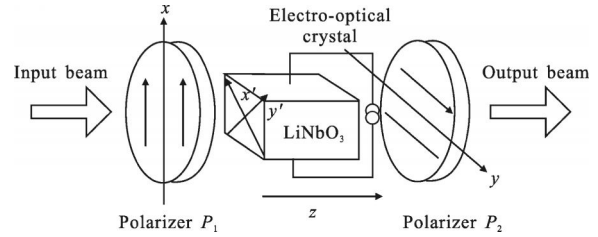


图 2 电光调制原理图

Fig.2 Schematic diagram of electro-optic modulator

它们在 y 方向上的投影为:

$$E_y = \frac{E_{y'}(l)}{\sqrt{2}} - \frac{E_{x'}(l)}{\sqrt{2}} = \frac{A}{2} (e^{-i\delta} - 1) \quad (6)$$

计算出射光强:

$$I_r = E_y E_y^* = A^2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (7)$$

所以光强透过率 T 为:

$$T = \frac{I_r}{I_i} = \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (8)$$

设施加在 LiNbO₃ 上的电压为 U, U 由偏置电压 U₀ 和调制信号 U_msinωt 组成, U=U₀+U_msinωt, 则出射光强:

$$I = A^2 \sin^2 \frac{\pi U}{2U_\pi} = A^2 \sin^2 \frac{\pi}{2U_\pi} (U_0 + U_m \sin \omega t) \quad (9)$$

式中:U_m 为调制幅度。

加入 1/4 波片后,假设波片的 e 轴和 y 轴的夹角为 θ,当 θ=π/4 或 3π/4 时,公式(8)变为:

$$T = \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \approx \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\pi U_m}{U_\pi} \sin \omega t \right] \quad (10)$$

从公式(10)可以看出,调制器输出信号的频率与调制信号的频率相同,为线性调制,此时输出信号的频率与载体光源的波长无关。

2 实验过程和结果

超连续谱空间光通信与其他光通信系统相似,主要也由发射端、信道和接收端三个部分构成。不同

的是光纤通信一般是将光纤作为传输媒介,而空间光通信将大气作为传输媒介,所以光路的准直对于空间光通信来说尤为重要。图 3 所示为超连续谱空间光通信系统的光路图。

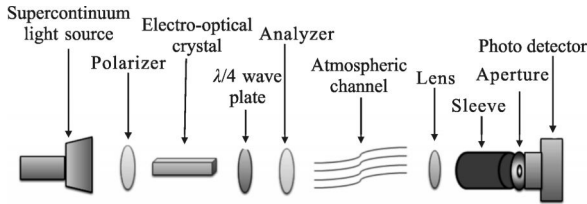


图 3 超连续谱空间光通信系统的光路图

Fig.3 Optical pathway diagram of free space optical communication system based on supercontinuum laser source

由于单色激光相比于超连续谱光源的光斑更小,便于光路准直,所以先利用 He-Ne 激光作为光源进行光路准直,调整信号发生器使其输出一个标准的方波。将调制信号输入到示波器的第一个输入端作为发射信号,将接收机接收到的信号输入到示波器的第二个输入端,发射信号和接收信号的波形如图 4(a)和 4(b)所示。

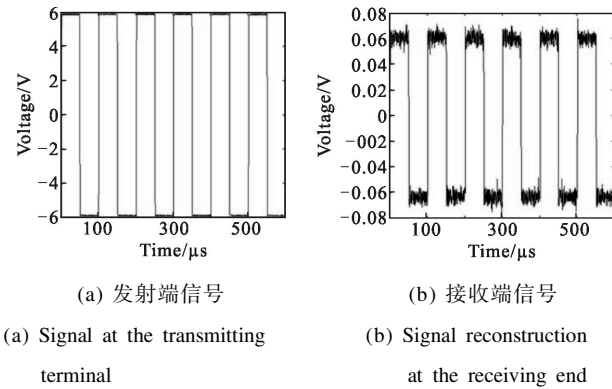


图 4 方波信号传输

Fig.4 Transmission of square wave signals

由以上可以得出超连续谱空间光通信的可行性,下面将光源换成超连续谱光源设计整个光通信系统,流程框图如图 5 所示。在发射端,模拟信号经过 ARM 板转换成数字信号,考虑到传输信道的噪声干扰,采用纠错能力很强的里所(RS)码对信号进行编码。为了提高信道的频带利用率和传输速率,还要对信道编码后的数字信号进行频带调制处理。考虑到频带利用率、传输速率和调制解调技术的复杂度等因素,选择压缩数字脉冲间隔调制(CDPIM)技术进行调制解调处理。CDPIM 调制方式的频带利用率较高,空闲时隙较

少,传输速度快,但经调制处理后的信号电压幅度比较小,不能直接加载到晶体上对光波进行调制,需要经放大电路放大后才能加载到晶体上。

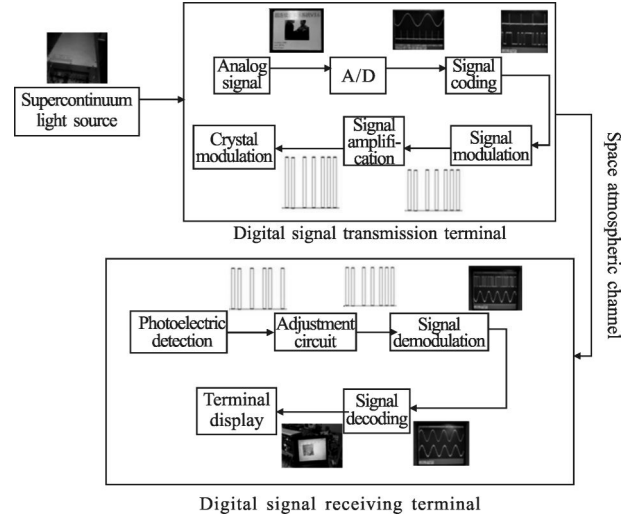


图 5 超连续谱空间光通信系统框图

Fig.5 System diagram of free space optical communication based on supercontinuum laser source

已调光信号经过大气信道传输后,进入光电转换器经过光电转换输出电信号。因为光信号在空间信道传输时,波形受外界干扰可能导致失真变形,加上光电探测器存在噪声,所以光电探测器输出的信号较弱且波形可能失真,不利于抽样判决,为了提高通信质量,需要利用整形放大电路对光电探测器的输出信号进行整形放大,并且输入到 FPGA 中进行后续处理,最终在终端恢复初始信号。输入输出端波形如图 6 所示,用摄像头采集图像信号如图 7(a)所

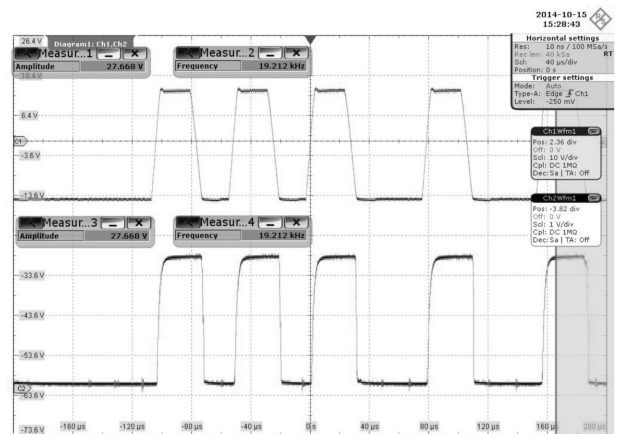


图 6 图像信号输入输出波形

Fig.6 Input and output waveforms of image signals

示,恢复出的图像信号终端显示如图 7(b)所示。从图中可以看出,较好地恢复出初始信号,实现了图像信号在 4 m 范围内的传输。



(a) 摄像头采集

(b) 电脑终端显示

(a) Acquisition of camera (b) Display of computer termination

图 7 图像信号的采集和恢复

Fig.7 Acquisition and restoration of image signals

3 结论

超连续谱的产生源于光纤中的非线性效应和色散共同作用,由于其丰富的带宽,是作为光通信的优秀信号载体。研究了超连续谱光源的光谱特性,采用由武汉安扬激光公司生产的 SC-5-FC/APC 超连续谱光纤激光器,测得光斑不同位置处的光谱分布是各不相同的。通过对基于铌酸锂晶体的电光效应理论分析得出,通过电光调制,输出信号的频率与光源的波长无关,证明了以超连续谱光源作为信息载体并且利用电光调制实现空间光通信的可行性。最后设计并搭建了超连续谱空间光通信系统实验平台,成功地对图像信号进行了采集、传输和恢复,通过对接收端信号的整形放大,提高了系统的通信质量,实现了图像信号在 4 m 范围内的传输。对超连续谱在光通信的应用有着十分重要的意义。

参考文献:

- [1] Shui Shengjun. Wireless optical communication and its key technical analysis[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2014, 10(9): 1009-3044. (in Chinese)
 - [2] Pei Chengcheng. Research on wireless optical communication [D]. Nanjing: Southeast University, 2012. (in Chinese)
 - [3] Alfano R, Shapiro S. Emission in the region 4 000 to 7 000 Å via four-photon coupling in glass [J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24(11): 584-587.
 - [4] Yang Hao, Feng Guoying, Zhu Qihua, et al. Study of supercontinuum in nanofiber [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(4): 874-877. (in Chinese)
 - [5] Birks T, Wadsworth W, Russell P S J. Supercontinuum generation in tapered fibers[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(19): 1415-1417.
 - [6] Saini T S, Kumar A, Sinha R K, et al. Microstructured-Core photonic crystal fiber with all normal dispersion for supercontinuum generation [C]//International Conference on Fibre Optics and Photonics, 2014, T3A: 38.
 - [7] Godin T, Wetzel B, Sylvestre T, et al. Real time noise and wavelength correlations in octave-spanning supercontinuum generation[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 18452-18460.
 - [8] Oh D Y, Sell D, Lee H, et al. Supercontinuum generation in an on-chip silica waveguide [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 1046-1048.
 - [9] Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of space laser communications [J]. *Chinese Optics*, 2013, 5(6): 670-680. (in Chinese)
- 水生军. 无线光通信及其关键技术分析[J]. 电脑知识与技术, 2014, 10(9): 1009-3044.
- 裴诚诚. 无线光通信技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2012.
- 杨浩, 冯国英, 朱启华, 等. 纳米光纤中超连续谱的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(4): 874-877.
- 杨浩, 冯国英, 朱启华, 等. 纳米光纤中超连续谱的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(4): 874-877.
- 吴丛均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述[J]. 中国光学, 2013, 5(6):670-680.