

逆向调制自由空间激光通信技术研究进展

孙华燕¹ 张来线^{2*} 赵延伸¹ 郑勇辉²

(¹ 装备学院光电装备系, 北京 101416)
(² 装备学院研究生院, 北京 101416)

摘要 介绍了逆向调制自由空间激光通信技术的原理和优势。分别对角反射器逆向调制器和猫眼逆向调制器的工作原理进行介绍, 归纳这两种逆向调制器的不同实现类型及其特点, 对逆向调制器的研究现状进行综述。概括了逆向调制自由空间激光通信技术的应用现状。讨论了逆向调制自由空间激光通信技术的关键技术和技术难点, 展望了该技术未来的发展方向和应用前景。

关键词 光通信; 逆向调制器; 角反射器; 猫眼效应

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.040004

Progress of Free-Space Optical Communication Technology Based on Modulating Retro-Reflector

Sun Huayan¹ Zhang Laixian² Zhao Yanzhong¹ Zheng Yonghui²

(¹ Department of Photoelectric Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)
(² Department of Postgraduate Management, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract The principle and advantages of free-space optical communication technology based on modulating retro-reflector are introduced. The principles of corner cube modulating retro-reflector and cat-eye modulating retro-reflector are introduced. Different types of both modulating retro-reflectors and the characteristics of them are introduced, and then the technology of modulating retro-reflector in free-space optical communication is summarized. The applications of modulating retro-reflector free-space optical communication are presented. The key technology and difficulty of modulating retro-reflector free-space optical communication are discussed, and the future applications of modulating retro-reflector free-space optical communication are prospected.

Key words optical communications; modulating retro-reflector (MRR); corner-cube; cat-eye effect

OCIS codes 060.2605; 060.4080

1 引言

自由空间激光通信(FSO)具有信道容量大、抗干扰能力强等优点, 能够提供高频宽带链路进行实时的视频和图片传输。因此, 在无线通信信道日益拥挤的今天, 采用 FSO 有极大的潜力, 是实现高速大容量空间光通信的最佳方案。传统 FSO 链路需要两端都装载激光发射/接收系统, 由于激光发散角小, 在运动平台还需要装载复杂的跟瞄系统, 使得系统的重量、体积、功耗和技术复杂度增加, 成为制约 FSO 应用的重要因素。应用基于逆向调制器(MRR)的 FSO 技术可以免去通讯链路中一个终端的激光发射器和跟瞄系统, 从而减轻链路一端的重量、体积和功耗, 有效解决了 FSO 的应用限制。国外对该技术相当重视, 对调制器、逆向反射器和通信系统结构等进行了研究, 并从理论、实验和实际应用方面对 MRR FSO 技术进行了分析。

本文介绍了 MRR FSO 的系统构成和工作过程, 介绍了逆向调制器工作原理, 从 MRR 和 MRR FSO 的应用两方面对国内外研究现状进行了概括归纳, 最后对 MRR FSO 技术进行了总结和展望。

收稿日期: 2012-12-05; 收到修改稿日期: 2013-01-27; 网络出版日期: 2013-03-28

作者简介: 孙华燕(1953—), 女, 博士, 教授, 主要从事光电对抗和光电信息处理方面的研究。

E-mail: shy221528@vip.sina.com

* 通信联系人。E-mail: zhanglaixian@126.com

2 MRR FSO 系统

MRR FSO 系统包括两个不对等的终端:主动端和被动端,其结构如图 1 所示。主动端即传统 FSO 的发射/接收终端,包括激光发射系统、激光接收系统、处理系统和控制系统四部分。被动端即逆向调制终端,包括 MRR 系统、信息获取系统、信号处理系统和控制系统四部分,其中 MRR 系统包括调制器和逆向反射器。MRR FSO 系统的工作过程为:发射/接收终端通过控制系统对准逆向调制终端,发射激光束,逆向调制终端探测到入射光束时,控制信号处理系统将信息获取系统得到的信号转化为调制器驱动信号变化,通过调制器将信号加载到入射光束,通过逆向反射器将调制光束原路返回到发射端,发射/接收端通过接收系统获取调制光束,最后由信号处理系统对信号进行处理。

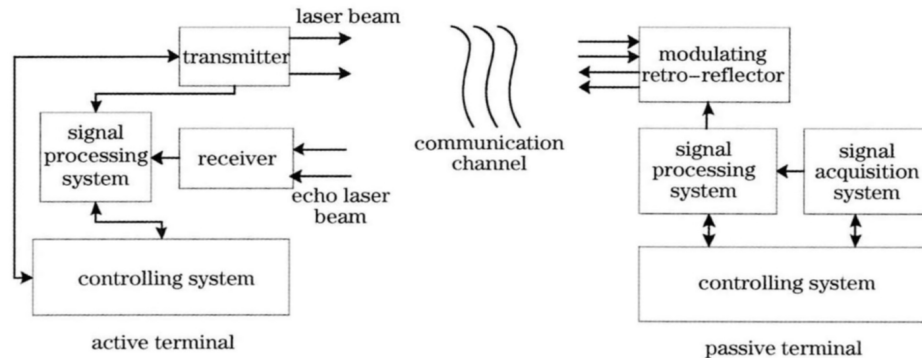


图 1 MRR FOS 系统结构图

Fig. 1 MRR FSO construction

3 逆向调制器

逆向调制器 MRR 是 MRR FSO 技术的核心, MRR 由光调制器和逆向反射系统两部分构成。光调制器通过将信号进行处理转化为特定形式的驱动信号,使特定材料或器件的性质发生相应变化,从而改变与其相互作用的激光性质。目前用于 MRR 的光调制器包括声光调制器、铁电液晶(FLC)调制器、微机电系统(MEMS)调制器和多量子阱(MQW)调制器等。逆向反射系统通过特定的光学系统结构使其对入射激光具有原路返回特性。逆向反射系统从结构上可分为角反射器型逆向反射系统和“猫眼”逆向反射系统两种。不同的调制器和逆向反射系统具有不同的调制特性。典型的 MRR 原理图如图 2 所示。

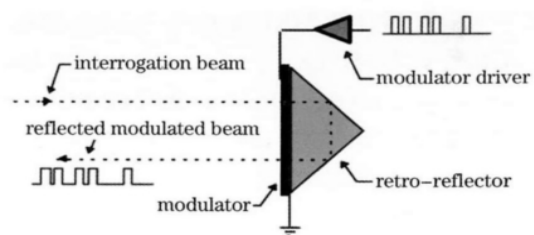


图 2 MRR 原理图

Fig. 2 Principle diagram of MRR

3.1 角反射器 MRR 系统

角反射器由三个互相垂直的高反射率平面组成,其几何设计可以保证对入射光束具有良好的逆向反射特性。基于角反射器的 MRR 根据调制器原理不同可以分为两类:一类通过改变角反射器结构来改变角反射器的逆向反射特性,从而使反射光束发生变化,实现强度调制;另一类是在角反射器入瞳处放置透射式光调制器,通过调制器的光电特性实现对反射光信号强度的调制。

3.1.1 改变反射面反射特性的 MRR 系统

改变反射面反射特性的 MRR 主要通过在角反射器反射面利用微机电系统改变反射面结构实现,目前国内外对该技术都有研究。

美国波士顿大学的 Ziph-Schatzberg 等^[1,2]研制了一种基于 MEMS 的保密光通信器件,在角反射器一个反射面镀电调制可形变 MEMS 反射镜,控制反射镜形变,从而影响角反射器的反射特性实现信号调制。利用该器件实现了距离为 900 m,功耗 10 mW,工作带宽 100 kHz,工作频率 1 kHz 的保密语音信息传输。其原理如图 3 所示。

英国斯杰克莱大学的 Jenkins^[3] 研制了一种微机电逆向光学相位调制器,利用阵列反射结构调制速率达到 400 bit/s,传输损耗仅为 80 pj/bit^[3]。

电子科技大学的张俊玲^[4] 利用超磁致伸缩材料与有机硅凝胶耦合作为角反射器的一个反射面,通过改变超磁致伸缩棒的磁化状态以产生微位移,使角反射器的反射特性发生有规律的变化,从而实现回波光信号强度调制。该系统采用 650 nm 激光,调制速率在约 1 kHz,驱动电压 1~15 V。

3.1.2 透射开关型 MRR 系统

利用角反射器的逆向反射特性,在角反射器入瞳处放置透射开关型光调制器,通过控制开关型光调制器可以实现对反射光调制的目的。目前该类调制器包括铁电液晶调制器、多量子阱调制器和电光相位调制器等。

1996 年 9 月 15 日,美国星火计划中犹他州州立大学航天动力学实验室与菲利普斯实验室成功进行了利用 MRR 进行激光通信的实验,该实验利用铁电液晶作为调制器,实现了 31 km 高空气球与地面基站之间 20 kb/s 的半双工激光通信链路,这是关于 MRR FSO 的最早报道^[5]。美国新墨西哥大学的 Shay 等^[6] 用液晶与角反射器构成的 MRR 首次实现了全双工激光通信链路。牛津大学的 O'Brien 等^[7] 提出了一种低功耗液晶 MRR 微尘设计,该结构可以通过嵌在上面的光电二极管对辐照激光进行光电转换为 MRR 微尘提供工作电源,探测器探测发射信号,由角反射器和液晶进行信号逆向调制,先后通过数值模拟研究期间性能,设计制作了器件进行了 30 m、传输速率约为 30 bit/s 的通信实验^[8],实验中微尘功耗只有 3.5 μ W。随后他们详细分析了参数对性能的影响^[9],并研究了利用该结构进行通信的组网方式和工作模式^[10]。

美国约克大学的 Mikaelian 等^[11] 研究了利用电光相位调制器结合逆向反射光学系统构成的 MRR,实现了 2.95 GHz 的调制速率。约克大学的 Spirou 等^[12] 研究了由利用声光调制器与逆向反射光学系统结合构成的 MRR^[12],实现 1 MHz 传输速率的通信,并论证了利用声光调制器实现 1 GHz 传输速率的可行性。

由于多量子阱调制器理论开关速率可以超过 40 GHz^[13],美国海军研究实验室(NRL)从 1998 年开始研究基于 MQW 器件的 MRR 系统^[14]。NRL 初期采用 GaAs/AlGaAs 和 InGaAs/AlGaAs 多量子阱调制器,中心工作波长为 980 nm^[15],通信速率为 300 kb/s~5 Mb/s^[16]。随后 NRL 改进工艺,设计研制出了基于 InP 材料生长的 InGaAs/InAlAs 电吸收多量子阱调制器,在较小的驱动电压下实现了较高的消光比^[17]。此外,NRL 还通过质子轰击实验模拟了 MQW MRR 在电磁辐射环境下的工作状态^[18],证明了 MQW MRR 可以很好地应用在低轨道空间激光通信中。

3.2 猫眼 MRR

角反射器 MRR 有一个重要特征:调制器口径必须与角反射器口径或角反射器的一个反射面相等,需要调制器尺寸较大以保证链路性能,而大尺寸意味着调制器最大调制速率下降,出现了光学系统口径与调制速率之间的矛盾,限制了角反射器 MRR FSO 的性能。由于猫眼(CE)效应,猫眼系统具有与角反射器相同的

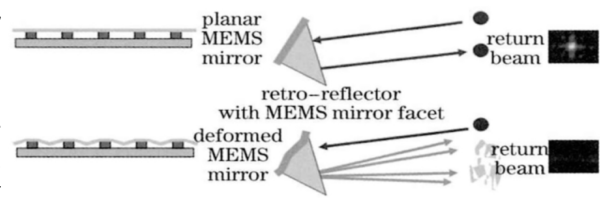


图 3 利用 MEMS 构建的 MRR FSO 链路及逆向调制器

Fig. 3 MRR FSO link using MEMS modulator and hollow corner-cube modulating retro-reflector

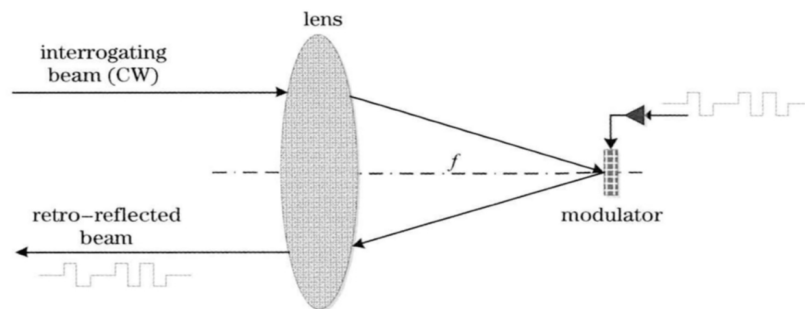


图 4 CE MRR 结构图

Fig. 4 Diagram of CE MRR construction

逆向反射特性,因此可以将猫眼系统与电光调制器结合,构建猫眼 MRR。将调制器放置于猫眼逆向反射器焦平面处,通过猫眼光学系统将入射光束聚焦到调制器进行调制,可以实现小尺寸调制器与大口径光学系统的匹配。典型的猫眼 MRR 原理结构图如图 4 所示。猫眼 MRR 按照调制原理可以分为离焦型猫眼 MRR 和电吸收型猫眼 MRR。

3.2.1 离焦型猫眼 MRR

离焦型猫眼 MRR 是在猫眼光学系统的焦平面附近放置平面反射镜,通过控制反射镜与焦平面的相对位置实现逆向反射光的强度调制,其结构如图 5 所示^[19]。根据猫眼效应,当反射镜位于焦平面时,入射光束将严格原路返回,而离焦时则发散。离焦型猫眼 MRR 的离焦状态与 MRR 输出的关系如表 1 所示。

表 1 离焦型 MRR 离焦状态及输出与信号的关系

Table 1 Defocusing MRR output and defocusing status versus signal code

Signal code	Status of MRR	Status of reflected laser beam
0	Defocused	Weak
1	Focused	Strong

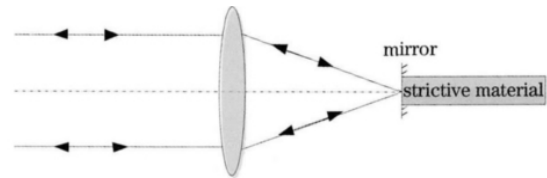


图 5 离焦型 MRR 结构图

Fig. 5 Diagram of defocusing MRR

3.2.2 电吸收型猫眼 MRR

电吸收型 MRR 是在猫眼光学系统的焦平面位置放置电吸收型光调制器,通过驱动电路控制调制器吸收/反射聚焦到焦平面的入射光,从而控制 MRR 终端回波状态来表征要传输的信息。应用于该体制的调制器主要是 MQW 调制器。

美国 NRL 在前期大量研究角反射器型 MQW MRR 的基础上,分析了 MQW MRR 的影响因素,联合美国国家航空航天局(NASA)地球科学技术办公室设计实现了像素化的猫眼 MRR,有效降低了调制器工作功耗^[20]。设计了由 12 个多量子阱矩形单元构成的 MQW 调制器阵列,每个单元可以单独调制,并用该调制器阵列与入射角探测器(AOA)构成的 MRR 系统,AOA 采用与调制器阵列类似的结构,用以探测光束聚焦位置,驱动特定调制像素单元。利用该系统岸上主动端与船上 MRR 的通信链路,距离 2~7 km,通信速率 45 Mb/s,在光学系统视场内链路保持稳定^[21]。为了提高信道容量,NRL 将通用射频(RF)通信的编码技术应用于 MRR FSO 技术中,测试了八进制移相键控(8PSK),64 位振幅正交调制(64QAM)以及 256 位振幅正交调制(256QAM)的通信效果,实现了 5 MS/s(符号每秒)的 256QAM 即 40 Mb/s 的调制速率^[22]。

约克大学研究了具有放大功能的 MRR(ARM)。通过光学系统将入射光束聚焦于光线中,通过掺铒光纤放大器(EDFA)放大,并在光纤中进行调制,将调制后的光束再通过光学系统返回到发射端。该放大调制器接收器直径为 2 cm,增益达到 2000,实现了 2.5 Gb/s 通信链路^[23]。

瑞典防御研究署也对 MQW MRR 进行了大量研究,2005 年,Wang 等^[24]研究了基于 MQW 的猫眼 MRR 结构原理和可行性,设计实现了基于 InP 材料生长的 InGaAs/InAlAs 电吸收多量子阱调制器,并设计制作成不同尺寸、形状和连接的结构,通过测试其特性,研究调制器参数对调制器特性的影响。研究发现通过合理设计阵列结构,可以使调制器视场角(FOV)大幅度增加,并通过单片 MRR 系统和 4 片 MRR 阵列系统的视场角进行比较,表明组合之后的调制器视场角大幅度增加,稳定反射功率视场角由 24°增加到 78°,半反射功率视场角由 32°增加到 104°。

2007 年,瑞典研究防御署利用带宽超过 10 MHz 的多量子阱调制器与大视场猫眼光学系统实现了 MRR FSO 系统^[25],研究了多电平调制的应用,并进行了室内 90 m,室外 160 m 的通信实验。图 6 为 8 电平调制信号,其中循环周期为 140 kHz,每个循环为 20 字。实验过程

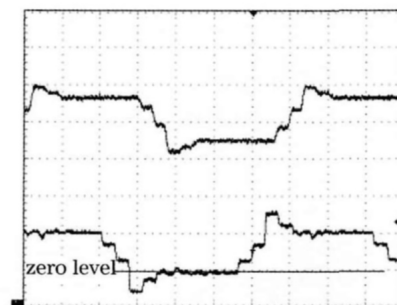


图 6 调制器驱动电压(下)与探测器输出电压(上)信号

Fig. 6 Modulator drive voltage (lower) and detector output voltage (upper) signal

中字传输速率为 2.8 MW/s,通信速率为 22 Mb/s。

Rantakokko 等^[26]研究了在通信过程中同时采用多电平调制和误码校正编码技术对通信质量的影响,证明了通过传输冗余信息可以对信道引起的误码进行校正,将误码校正编码与交织技术联合可以有效减少系统误码。

4 MRR FSO 的应用

由于 MRR FSO 技术可以使链路一端的体积、重量和功耗最大限度地减小,因此对于一端负载有严格限制的平台,如卫星、无人机等,该技术具有绝对优势。截至目前,该技术已经被应用于无人机通信、海上舰船通信、大气监测、海底通信、交会对接和目标识别等多个领域,同时由于其具有传统激光通信的抗干扰性、宽带宽等优点,还被应用于电磁环境复杂的通信链路中。

美国 NRL 在 Trident Warrior 2008 海面测试中,利用双模光发射系统(DMOI)和 MRR 模块建立了舰-舰 MRR 链路,证明了 MRR FSO 在海军舰船上应用的可行性。该测试中有效链路长度约为 4.5 km,为 2 Mb/s 双向链路,MRR 视场角为 60°,只需要粗跟踪即可建立链路。利用 MRR FSO 的抗电磁干扰特性,NRL 利用六个 MRR 单元构成一个 MRR 终端,将该终端安装在排爆机器人上,用光链路替换 802.11 无线链路,链路速率 1.5 Mb/s,在 30 m 和 1 km 外通过 DMOI 由光链路控制机器人,结果表明该 MRR FSO 链路工作良好,不受 RF 干扰源影响^[21]。

NRL 利用 MRR FSO 链路实现了空中小平台对地监视。2000 年,他们利用 9 个 0.5 cm 口径的 InGaAs 透射式 MQW 逆向调制器构成阵列挂载在小型螺旋桨无人机(UAV)上进行了通信实验^[18,19],实验中 UAV 飞行高度为 15~30 m,距离发射/接收系统 30~60 m,通信速率为 6 Mb/s,并且在实验过程中进行了雨、雾及低能见度等影响的实验。结果表明,只要光束进入 MRR 的入射角(约为 20°),就可以建立链路。

此外,NRL 设计了带有万向节的 MRR 终端,即指示 MRR 终端。由于单个 MRR 的 FOV 足够大,只需要一个惯性导航万向节即可满足通信连路指向需求^[27]。在 2009 年,NRL 建立了指示 MRR 终端机载激光通信系统,并在达科塔进行测试,整个平台重 3.6 kg,功耗为 6 W,链路最大距离 2.5 km,数据速率 2 Mb/s。

NRL 和 NASA 利用一个主 CE MRR 和两个子 CE MRR 结合商业现成品(COTS)光学系统构成空间无线激光互联链路 MIL-STD-1553,并构建了 3 m 的实验系统。系统中激光器功率 15 mW,利用相干接收,信源利用 QAM 编码。该 CE MRR 结构如图 7 所示,调制器为阵列结构,可以将不同入射角度激光光束聚焦到不同的调制器单元,在系统中加入光纤耦合激光二极管发射连续激光,通过光学系统前的 Dot 耦合镜发射,照射一定的空间范围。其工作过程如图 8 所示,其中图 8(a)为主 CE MRR 照射两个子 CE MRR;图 8(b)为入射光聚焦到子 CE MRR 调制器单元;图 8(c)为子 CE MRR 调制入射光并将入射光逆向反射回主 CE MRR;图 8(d)为逆向反射光束聚焦到主 CE MRR 不同调制器单元并被探测到。经过测试,系统用归零码和非归零码可以实现 Mb/s 量级的单通道传输速率,采用前向纠错的 256QAM 实现 5 MB/s 即 40 Mb/s 的传输速率^[28]。

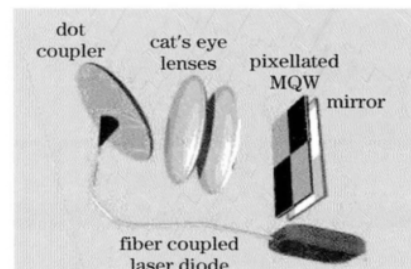


图 7 具有发射器/接收器的 CE MRR

Fig. 7 Diagram of CE MRR with transmitter/receiver

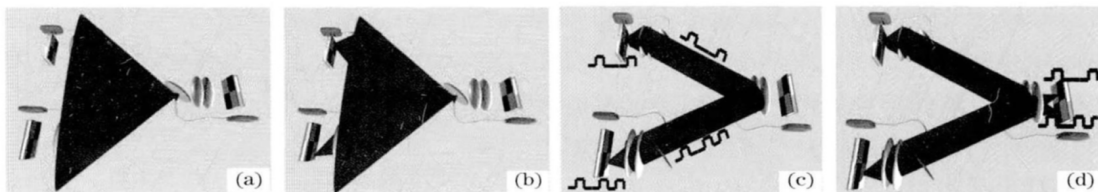


图 8 具有发射器/接收器的 CE MRR 构成通信链路过程

Fig. 8 Communication link process of CE MRR with transmitter/receiver

NRL 和 NASA 还利用 MRR 构成阵列用于飞船对小卫星的姿态确定,在小卫星上装有 MRR 阵列,各 MRR 单元以特定频率发送相应的姿态信息,通过接收处理不同 MRR 单元返回的信息,解算出目标的姿态^[29]。此外,根据空间交会对接需要,他们还将上述类似 MRR 阵列用于交会对接过程中的姿态控制^[30]。

NASA 还研究了利用 MRR 建立空间信息组网,利用像素化的接收系统,将每个 MRR 的信息聚焦到一个像素探测器上构成一个通信信道,各 MRR 单元结构及整个接收系统构成链路分别如图 9 和图 10 所示。并对系统全双工工作的编码方式进行了讨论^[31]。

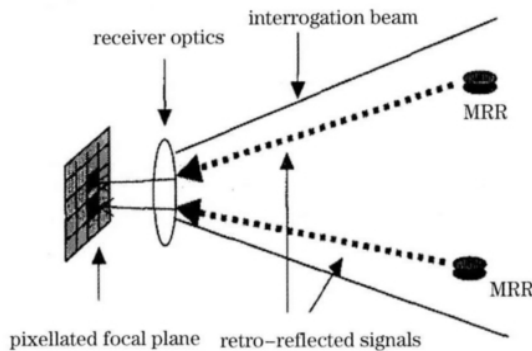


图 9 MRR 单元结构

Fig. 9 Diagram of MRR sensor

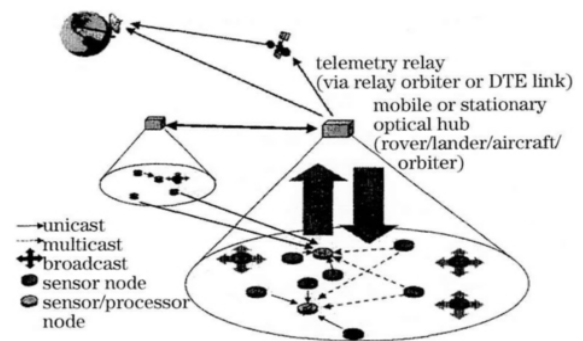


图 10 利用 MRR 构建的空间信息组网

Fig. 10 Space information net using MRR sensors

NRL 和海军航空兵中心还将 MRR 应用于水下自由空间激光通信链路^[32]。

澳大利亚防御科技组织与美国 NRL 合作,将 MRR 应用于调频(FM)音频^[33]和视频信号传输,并进行了实际实验。为了降低 MRR 链路系统功耗,终端减去了模数转换(AD)环节,利用 MRR 直接传输调幅(AM)信号,并进行了实际测试。结果表明该体制可以有效降低系统功耗^[34]。

欧洲制定了瑞典国防研究所 FOI MRR 自由空间激光通信(FSO)战术应用计划,将 MRR 在 FIO 中的应用进行了详细规划,并在链路中采用了前向纠错和冗余编码方式提高信道质量^[35]。

5 MRR FSO 关键技术及应用前景

5.1 MRR FSO 关键技术及技术难点

目前国内外关于 MRR FSO 的研究集中在光调制器研究、逆向反射光学系统研究、MRR FSO 通信系统及体制研究,这也是 MRR FSO 的关键技术和技术难点。

1) 光电调制器研究。

高速、稳定的光电调制器是 MRR FSO 系统的核心器件之一,设计实现用于 MRR FSO 系统的高性能光电调制器是 MRR FSO 技术的关键技术和难点技术。目前可用的调制器包括 MEMS、液晶、声光调制器(AOM)、电光调制器(EOM)和 MQW 等,结果表明 MEMS 和液晶光调制器调制速率较低,最高只能到 10 kb/s 量级,AOM 和 EOM 及 MQW 调制速率都较高,理论上可以达到 Gb/s 量级,但是 AOM 和 EOM 调制器对入射光相位要求较高,而在大气环境中入射光相位很容易受大气湍流等效影响而发生改变,严重限制了通信能力。目前研究成果表明 MQW 调制器具有最大的发展潜力,也成为各国发展 MRR FSO 的首选调制器。MQW 理论调制速率可以达到 40 GHz,但是目前已看到的报道最高只有 45 MHz,远没有发挥出 MQW 调制器的性能;另外,MQW 对工作波长有较严格的限制,同时消光比相对较低。如何生长制造工作稳定、波长适应性好以及消光比较高的 MQW 调制器将是未来 MRR 发展的重要研究内容,需要对 MQW 调制器的工作特性和生长设计等方面进行深入研究。

2) 逆向反射光学系统研究。

逆向反射光学系统是 MRR 的接收天线和发射天线,其性能与 MRR FSO 整体性能直接相关,逆向反射光学系统特性研究和高性能逆向反射光学系统设计是 MRR FSO 系统的另一个关键技术。NRL 和瑞典防御研究署对 MRR 逆向反射光学系统的设计需求进行了较深入的研究,设计实现了接近衍射极限的逆向反

射光学系统。目前关于逆向反射光学系统设计参数与逆向反射特性对 MRR FSO 的影响研究较少,借助猫眼效应的理论成果对逆向反射光学系统特性进行研究是下一步的主要研究内容。研究自适应光学系统、校正接收和发射波前、降低大气信道引入的湍流以及提高系统通信质量也是逆向反射光学系统的一个主要研究方面。此外,还有与像素化调制器相匹配的光学系统,使入射光束聚焦于特定像素点,提高信号探测能力和降低系统功耗,是阵列 MQW 调制器逆向反射光学系统的技术难点。

3) MRR FSO 通信系统及体制研究。

目前利用 MRR FSO 进行的通信实验主要为非对称点对点通信,且以单纯的幅度调制为主,对于其他调制方式研究较少。研究高效的信源调制方式和信道调制方式对 MRR FSO 系统性能的影响,同时开展远距离全双工通信和非点对点通信体制是未来 MRR FSO 通信系统的重要研究内容和研究方向。

5.2 MRR FSO 应用前景展望

由于 MRR 具有重量轻、体积小和功耗低等先天优点,因而在小平台或功耗、体积载重等有严格限制的应用环境中具有绝对优势。根据 MRR FSO 系统特点以及通信体制的研究,该技术已经或将在以下几个方面发挥重要作用:

1) 小平台通信链路及通信网络。

由于 MRR FSO 可以使一个终端的结构最大限度精简,同时具有原路返回特性,只要满足一定的视场角条件即可建立链路,对于太空卫星、天基无人机和潜艇浮标等小平台以及地基与上述平台之间的通信极具优势。此外,通过合理设计终端结构可以实现非一对一通信模式,对小平台组网通信具有很强的可行性,可以实现天地、空天、空地、岸船和岸潜通信网络,是未来发展的重要方向。

2) 身份和姿态识别。

利用调制器发送特定信息,或将调制器按照特定排列构成阵列结构,通过小 MRR 终端与远距离主动端建立通信链路,实现远距离目标身份确定,可用于战场上远距离友军单位及功能确定。将该技术用于交会对接中,通过给被动目标特征位置放置小 MRR,发送该位置特性信息,主动对接飞行器通过与各特性位置 MRR 建立通信链路,可以确定对接目标姿态信息,进而调制自己的姿态进行精确对接。

3) 其他应用。

由于 MRR FSO 具有激光通信抗电磁干扰能力强的优点,可以在电磁干扰很强的环境中由 MRR FSO 代替 RF 链路实现通信功能,如排爆、战场复杂电磁环境等。此外,由于 MRR FSO 通信激光发散角很小,不容易被截获,具有很好的保密性,故可以将 MRR FSO 应用于保密通信。

6 结束语

对 MRR FSO 技术原理进行介绍,说明了 MRR FSO 系统的核心部分 MRR 的结构和工作原理,并分别对不同类型的 MRR 国内外研究现状进行归纳,总结了 MRR FSO 在主要研究国家的应用现状。在归纳总结的基础上分析了 MRR FSO 技术的关键技术及可能的解决措施,并对该技术的应用前景进行了展望。从 MRR FSO 技术的发展和现状来看,随着 MRR FSO 关键技术和通信体制的深入研究,该技术将对未来通信链路产生重大影响。

参 考 文 献

- 1 Leah Ziph-Schatzberg, Thomas Bifano, Steven Cornelissen *et al.*. Deformable MEMS mirrors in secure optical communication system[C]. *SPIE*, 2009, **7318**: 73180T
- 2 Leah Ziph-Schatzberg, Thomas Bifano, Steven Cornelissen *et al.*. Secure optical communication system utilizing deformable MEMS mirrors[C]. *SPIE*, 2009, **7209**: 72090C
- 3 Colin Jenkins, J. Gordon Brown, Lijie Li *et al.*. MEMS retro-phase-modulator for free-space coherent optical communications[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(2): 330~335
- 4 Zhang Junling. Basic Research on Retro-Modulator Based on Giant Magnetostrictive Material[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007. 16~18
- 张俊玲. 基于超磁致伸缩材料的光学逆向调制器初步研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2007. 16~18

- 5 Charles M. Swenson, Clark A. Steed. Low power FLC-based retromodulator communications system [C]. *SPIE*, 1997, **2990**: 296~310
- 6 T. M. Shay, J. A. MacCannell, C. D. Garrett *et al.*. First experimental demonstration of full-duplex communication on a single laser beam[C]. *SPIE*, 2004, **5160**: 265~271
- 7 Dominic C. O'Brien, Jing Jing Liu, Grahame E. Faulkner *et al.*. Optical wireless networks using self-powered nodes[C]. IEEE, 22nd Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2009, **3**: 695~696
- 8 Dominic C. O'Brien, Jing Jing Liu, Grahame E. Faulkner *et al.*. Design and implementation of optical wireless communications with optically powered smart dust motes[J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2009, **27**(9): 1646~1653
- 9 Dominic C. O'Brien, Jing-Jing Liu, Wei Wen Yuan *et al.*. Optical wireless communications with low voltage self-powered sensor motes[C]. *SPIE*, 2007, **6709**: 67090A
- 10 Dominic C. O'Brien, Wei Wen Yuan, Jing Jing Liu *et al.*. Optical wireless communications for micro-machines[C]. *SPIE*, 2006, **6304**: 63041A
- 11 T. Mikaelian, M. Weel, A. Kumarakrishnan. A high-speed retro-reflector for free-space communication based on electro-optic phase modulation[J]. *Canadian J. Phys.*, 2003, **81**(4): 639~650
- 12 G. Spirou, I. Yavin, M. Weel *et al.*. A high-speed-modulated retro-reflector for lasers using an acousto-optic modulator [J]. *Canadian J. Phys.*, 2003, **81**(4): 625~638
- 13 W. S. Rabinovich, G. C. Gilbreath, P. G. Goetz *et al.*. InGaAs multiple quantum well modulating retro-reflector for free-space optical communications[C]. *SPIE*, 2002, **4489**: 190~201
- 14 G. C. Gilbreath, W. S. Rabinovich, R. Mahon *et al.*. Modulating retroreflector architecture using multiple quantum wells for free space optical communications[C]. *SPIE*, 1998, **3491**: 581~586
- 15 W. S. Rabinovich, R. Mahon, P. G. Goetz *et al.*. A cat's eye multiple quantum-well modulating retro-reflector[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(3): 461~463
- 16 G. Charmaine Gilbreath, William S. Rabinovich, Timothy J. Meehan *et al.*. Progress in development of multiple-quantum-well retromodulators for free-space data links[J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(6): 1611~1617
- 17 G. C. Gilbreath, W. S. Rabinovich, T. J. Meehan *et al.*. Compact, lightweight payload for cover data link using a modulating retro-reflector on a small rotary-wing unmanned airborne vehicle[C]. *SPIE*, 2000, **4127**: 57~67
- 18 Peter G. Goetz, W. S. Rabinovich, Robert J. Walters *et al.*. Effects of proton irradiation on InGaAs/AlGaAs multiple quantum well modulators[C]. 2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2001, **3**: 1523~1529
- 19 Li Zhan, Peng Renjun, Wu Jian *et al.*. Optic retro-modulation technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(11): 47~51
李展, 彭仁军, 吴健等. 光学逆向调制技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(11): 47~51
- 20 W. S. Rabinovich, J. L. Murphy, M. Suite *et al.*. Free-Space Optical Link to an Explosive Ordnance Disposal (EOD) Robot[R]. 2009 NRL Review, Information Technology and Communications, 2009. 167~169
- 21 W. S. Rabinovich, R. Mahon, P. G. Goetz *et al.*. 45 Mb/s cat's eye modulating retro-reflector link over 7 km[C]. *SPIE*, 2006, **6304**: 63040Q
- 22 W. S. Rabinovich, P. G. Goetz, R. Mahon *et al.*. Cat's eye quantum well modulating retro-reflectors for free-space optical communications[C]. *SPIE*, 2003, **4975**: 92~102
- 23 T. M. Shay, Rakesh Kumar. 2.5-Gb/s amplified retro-modulator for free-space optical communications[C]. *SPIE*, 2004, **5550**: 122~129
- 24 Qin Wang, Stéphane Junique, Susanne Almqvist *et al.*. 1550 nm surface normal electro absorption modulators for free space optical communications[C]. *SPIE*, 2005, **5986**: 598610
- 25 Johan Öhgren, Fredrik Kullander, Lars Sjöqvist *et al.*. A high-speed modulated retro-reflector communication link with a transmissive modulator in a cat's eye optics arrangement[C]. *SPIE*, 2007, **6736**: 673619
- 26 Jouni Rantakokko, Peter Holm. Improved robustness and capacity in modulated retro-reflective (MRR) optical communication links[C]. *SPIE*, 2006, **6399**: 63990B
- 27 Peter G. Goetz, William S. Rabinovich, Rita Mahon *et al.*. Modulating retro-reflector lasercom systems at the naval research laboratory[C]. IEEE Military Communications Conference, MILCOM 2010, 2010. 1601~1606
- 28 Peter G. Goetz, W. S. Rabinovich, Timothy J. Meehan *et al.*. Modulating retro-reflector implementation of MIL-STD-1553 protocol with free-space optics[C]. IEEE Aerospace Conference 2003, 2003, **4**: 1799~1808
- 29 N. Glenn Creamer, G. Charmaine Gilbreath, Timothy J. Meehan *et al.*. Multiple quantum well retromodulators for spacecraft-to-spacecraft laser interrogation, communication, and navigation[C]. Proceedings of the 15th Annual AIAA/USU

- Conference on Small Satellites, SSC01-VI-6: 2~16
- 30 Linda M. Wasiczko, Harris R. Burris, N. Glenn Creamer *et al.*. Optical communication and navigation for spacecraft docking using modulating retroreflectors [C]. *SPIE*, 2005, **5892**: 58920E
- 31 Jay L. Gao. Sensor network communications using space-division optical retro-reflectors for *in-situ* science applications [C]. 2003 IEEE Aerospace Conference, 2003
- 32 Brandon Cochenour, Linda Mullena, William Rabinovich *et al.*. Underwater optical communications with a modulating retro reflector [C]. *SPIE*, 2009, **7317**: 73170G
- 33 K. J. Grant, B. A. Clare, W. Martinsen *et al.*. Free space optical transmission of FM audio video signals using InGaAs modulating retro-reflectors [C]. Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices, COMMAD 2010, 2010, **4**: 233~234
- 34 Kenneth J. Grant, James Murphy, Rita Mahon *et al.*. Free space optical transmission of AM composite video signals using InGaAs modulating retro-reflectors [C]. Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices, COMMAD 2006, 2006. 200~203
- 35 Fredrik Kullander, Lars Sjöqvist, Johan Öhgren *et al.*. Laser communication with modulated retro reflectors——progress report[R]. FOI Report 2006, 2006, FOI-R-2196-SE: 1~16