

光无线通信技术与下一代超宽带家庭接入网

■ 吴承治 (电信科学技术第五研究所, 成都 610062)

摘 要: 本文描述了一种新的光接入技术—光无线通信技术。简要分析了室外、室内光无线通信技术发展面临的挑战。重点讨论了室内光无线通信在下一代超宽带家庭接入网中实现的方案。最后, 介绍了室内光无线通信近期的发展及未来发展的方向。

关键词: 光无线通信 (Optical wireless communication) ; 自由空间光通信 (FSO) ; 红外光通信 (IRC) ; 可见光通信 (VLC) ; 家庭 Gbps接入 (hOME Gigabit Access, OMEGA) 。

Doi:10.3969/j.issn.1673-5137.2012.10.008

前言

光无线 (OW) 通信又称自由空间光通信 (FSO) , 利用高度集中的光束穿越大气空间作为信息的传输载体。

按空间传输光的光谱可分为红外光谱 ($100\ \mu\text{m}-700\text{nm}$), 可见光谱 ($700\text{nm}-400\text{nm}$) 和紫外光谱 ($400\text{nm}-1\text{nm}$) 。波长越短, 空中传输距离越短。红外光谱的光无线通信又称红外光通信 (IRC) , 可见光谱的光无线通信又称可见光通信 (VLC) 。

按应用可分为室外 (Outdoor) 光无线通信和室内 (Indoor) 光无线通信。室外光无线通信能提供最后1km的宽带接入, 而室内光无线通信能在室内环境如家庭、办公室、商店、仓库等, 通过无线分布式数据通信系统, 提供到PC、PDA、笔记本电脑、打印机、摄像机等灵活的互连。

在室外环境中, 由于不利的气象条件引起的高衰减、由于建筑物的晃动引起的维护视距链路对准、人眼安全以及由于室内环境的多径效应, 所以光无线通信的实现将面临很多挑战。

1. 光无线通信技术发展的简要回顾

最初由军事部门和美国国家航空和航天管理局 (NASA) 研究开发的室外光无线通信已有三十多年的历史, 可分为长距离自由空间链路和短距离链路。用于数据

率高达Gbps的星座卫星联网或中继的长距离自由空间链路已研究近十年, 主要的市场是星际链路域。短距离链路在通过引入宽带到家和LAN、MAN和WAN间的高带宽桥接之中, 用于“最后或最初1km”的接入。大多数用于城域中的高层建筑物间连接LAN的短距离链路, 其商用距离大约1km。

室外光无线系统必须发送足够大的功率, 使系统在出现不利的气象条件情况中的大多数时间是可用的, 而且不超过人眼安全的限制。因为由浓雾、雪和烟引起高的室外链路衰减, 这种状况进一步刺激了电信级99.999%可用性的要求。对这个问题的实际解决方案是使用混合系统, 将RF链路作为FSO的备份系统称混合FSO/RF, 以获得更高的通信链路可用性。

室内光无线首先由Gfeller和Bapst在1979年提出, 目前它的应用已渗透到家庭、办公室、商店和仓库等范围, 从TV控制到便携式电子设备上的IrDA端口, 如手机、数字摄像机、PDA和笔记本电脑。目前安装基于IrDA端口超过20亿, 年增长率达40%。

1993年, 红外数据联盟 (IrDA) 制定了一个建立和促进低成本IR数据互连的可互操作标准, 支持Ad-Hoc模式中点到点和跳的应用。基于IrDA用于漫射光通信链路的标准克服了遮蔽和对准错误的限制因素, 使它能离散 (disrupt) 通信。依靠宽视场 (FOV) 的漫射红外LAN发出

的辐射是来自墙、天花板反射形成的漫反射。IrDA已提出115.2Kbps、4Mbps和16Mbps的标准。1997年, HP和IBM联合提出新的IR标准称AIR (Advanced Infrared), 提供早期IrDA标准缺少的多接入使用IR媒质。IrDA设备通信使用红外波长 $875 \pm 30\text{nm}$ 的LED。红外LAN遵循IEEE802.11标准, 使用780–950nm波长, 比特率为1或2Mbps。当漫射系统结构支持一到多、多到一通信时, 它也能用于建立Ad-Hoc和LAN。

在室内漫射系统中, 从墙和天花板离开的扩散光束建立了从源到接收器的多个路径。这种室内通信模式, 由于漫射面的吸收造成较低的接收信号功率和系统的数据率。为了克服功率不足, 提出多光点漫射法 (MSD), 它使用从一个或多个发送器来的多个指向的漫射光点, 并且容易对准。

近几年, 提出了使用可见光LED作光源, 用于室内无线通信的建议^[1]。

2. 室外短距离光无线链路的挑战

实现室外短距离光无线链路的一个主要挑战是由于吸收、散射和大气中光信号的闪烁而引起大气的衰耗。由于存在水滴和二氧化碳会发生光信号的吸收。在出现雾、雨和雪中的散射使源传播来的部分光束偏离指定的接收器。大自然的散射取决于光信号使用的波长及散射元的尺寸, 如雾、雨或灰尘颗粒。闪烁由组合因素产生, 包括光折射、大气湍流、密集云覆盖和风。根据估算, 在浓雾天气的光束衰耗高达300dB/Km。

2.1 不利的气象条件及散射

由于在不利的气象条件中, 光无线通路的传输情况, 如通路可用性和带宽是随时间变化的, 它的传输需要一个策略: 为了允许一个有效的接收, 被发送的数据能在不同的频带找到。在这种情况下, 不需要发送器改变传输配置, 而接收器完成所需的改变来应付通路变化。

分形 (Fractal) 调制已用于时变通路上的信号传输, 其频谱效率在一个宽范围的用于固定发送器配置的速率—带宽比保持不变。这可通过在一个同质信号 (小波, wavelet) 中嵌入数据来实现, 用这种基于小波分集策略的方法将帮助光无线信号穿透云、雾和其它不利的气象

条件。它使用多速率, 具有成形的超短激光脉冲。被发送的数据嵌入光超短脉冲内, 成形它为类似用分形调制的小波。用全息光 (holographic) 技术产生和分开小波并且以各种速率传输。

Kedar和Arnon发现雾的散射效应能用于提高链路的性能^[2]。这可通过当没有收到未散射光 (直射光) 时, 捕获某些散射光来实现。由于接收信号功率取决于接收器的视场 (FOV), 通过使用阵列光检测器可获得一个大的FOV。在这样的阵列光检测器中, 由小检测器产生的热噪声远远小于具有相同FOV的单个大检测器产生的热噪声。由于阵列光检测器给出较高的信噪比, 可以用同一硬件提供多用户应用。通过使用自适应判决均衡器能减少由多个散射产生的符号间干扰。然而, 由于多个散射导致较低的接收信号功率, 自适应判决均衡器的实现将是一个挑战。

2.2 视距对准, 建筑物晃动和闪烁

发送器和接收器间的视距 (LOS) 对准是另外一个问题, 它影响安装在建筑物上的收发器之间的光束传播, 从而导致链路失效。主要是由于风的影响引起对准错误, 在风中, 高层建筑物可能沿顺风 and 逆风方向摇动或由于扭力引起的扭动。建筑物框架部分的热膨胀和弱地震是另一个引起对准错误的因素。地震不能预测, 但热膨胀具有按日和按季节的特性。建筑物晃动是指向错误的源, 是影响系统性能的一个随机过程。为了解决这个问题, 提出通过使用自动跟踪光束的系统 and 增加收发器的发送光功率, 以增加覆盖的范围。还提出了减小建筑物晃动影响的建议解决方案, 包括自适应激光阵列发送器, 自适应或自适应发散的光束。

闪烁 (scintillation) 是接收光信号中的一种小的随机波动, 由来自地球的热空气上升或人为造成, 如热灰尘, 它在不同的空气团之间造成温度变化而产生。为保证信号不丢失, 使用一个较大尺寸收集面积的光二极管能降低由闪烁引起接收光信号的波前失真。在较高的频率和距离小于500m时, 闪烁影响无需考虑。

2.3 室外链路中的人眼安全

由于角膜对近紫外到近红外范围的波长是透明的, 应关注人眼安全。IrDA设备使有 $875 \pm 30\text{nm}$ 的波长, 如果

聚焦到视网膜上可能引起热损害。室外点到点系统为了获得好的功率预算,通常采用高功率激光器,而且波长又在人眼可视范围以外。因而,需要严格的规范以保证人眼安全,如ANSI Z-136和IEC 825。为了防止危险的曝光,这些系统常位于不易截取或看到IR光束的屋顶或高墙上。

用1550nm波长的室外光无线系统比780-920nm范围的系统工作在更高的功率处。1550nm的系统是人眼的安全系统,系统的光学天线间的光束能穿透窗户,对不利气象条件更有弹性。

2.4 混合FSO/RF链路

室外光无线通信成为距离4Km或更小的短距离光纤链路有吸引力的另一种选择,是“最后1Km”的另一种接入技术。然而,光信号的大气衰减和不可预测的气象条件限制了距离并影响链路的可用性。对企业系统的链路可用性要求一般应大于99%,对电信级应要求99.999%。为了获得这样的链路可用性应使用混合FSO/RF链路,RF链路作为主用光链路的低带宽备份,在所有气象条件中,能提供一个大于1Km范围的电信级无线系统。一个混合FSO/RF实验系统,如图1所示。

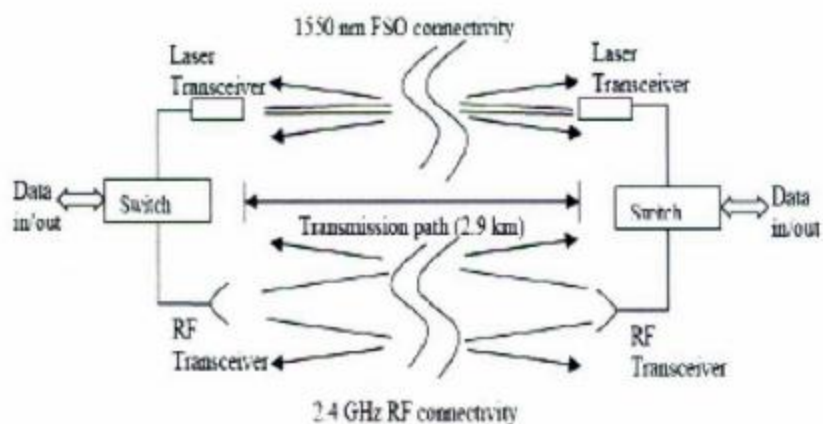


图1 一个混合FSO/RF实验系统

在图1中,光链路提供155Mbps全双工连接,工作波长1550nm,距离2.9Km。无频谱许可证的RF链路用2.4GHz连接两个11Mbps终端。

Izadpanah^[3]报导了利用毫米波和光无线高速链路提供最后1km接入的设计概念,主要解决家庭和商业联网。这种方式是基于RF(微波)与光无线链路组合和互补的整合网络操作。

Derenick et al^[4]为增强移动的健壮性,引入了FSO/RF移动Ad-Hoc网络(MANET),用于防灾、减灾,为城域

网提供电信级的补丁,并进行了链路获取和路由协议的研究。

3.室内光无线链路的挑战

与室外相比,室内光无线系统特性是较小的距离,与恶劣的环境无关,如雾、雨和雪。室内光无线的衰减只有自由空间衰减。存在两种室内光无线传输技术:直射视距(LOS)配置和漫射(Diffuse)配置。

如图2所示的直射视距配置要求发送器和接收器间对准,通过从发送器发送光信号到接收器来建立通信,没有任何反射。这样的系统具有很好的功率效率,低的多通道色散和低的通道衰减,能实现较高的传输速率。这种配置的缺点是易受遮挡损害和涉及人眼安全限制了平均发送功率,因而影响了总的功率效率。

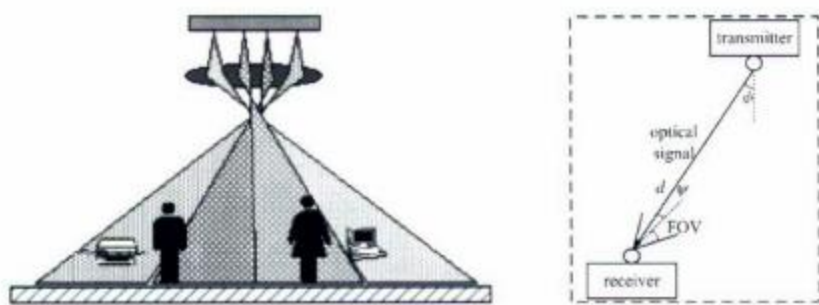


图2 直射视距配置

如图3所示的漫射配置不需要发送器和接收器间对准,发送器在一个宽角中发送光信号到天花板或墙上,经一个或若干个反射后到达接收器。漫射配置能对抗遮挡并且容易使用,允许更多的移动性。然而,漫射系统会遭受到更高的通道衰减,需要更高的发送功率和接收器中更大尺寸的光检测面积。它也会遇到多通道色散,该情况在当发送信号沿由于天花板、墙和其它物体反射到接收器方向形成的不同通道传输时出现。漫射系统的多通道传播引起符号间干扰上升并制约了较高的数据率。

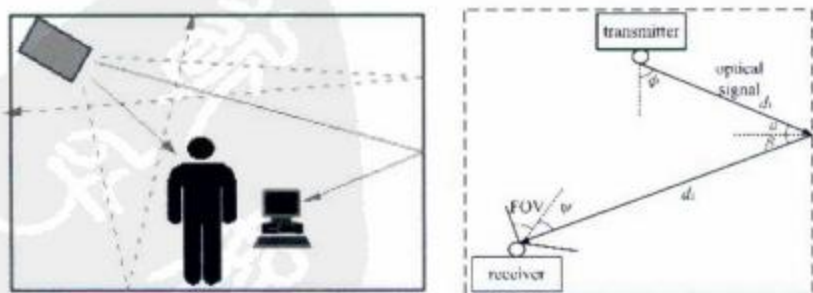


图3 漫射配置

两种光无线通信链路比较如表1所示。

表1 两种光无线通信链路比较

	直射视距链路	漫射链路
通信速率	高	中
对准要求	高	低
抗障碍物影响能力	低	高
系统移动性	低	高
光学系统复杂度	低	中
受背景光影响	小	大
多径效应影响	无	有
信道损耗	低	高

室内光无线系统的噪声源是周围的光，它是一个由白炽灯光、萤光灯光和日光的结合，使其成为在接收处实现较高信噪比的重要问题。研究发现直接的日光强度大于白炽灯光和萤光灯光以及日光会产生一个100Hz包含少数谐波的干扰正弦信号。

设计一个室内光无线系统另外的挑战包括接收信号的脉冲成形，考虑到人眼安全所允许的发送功率，遮挡影响和背景光干扰。

3.1 用多光点漫射技术的方案

Jivkova, Kavehrad和Pakravan^[5,6]建议使用减小多通道色散的多光束发送器技术，减小遮挡影响和不危害人眼安全的前提下，增加发送器功率。这种技术是基于多光点漫射（MSD），它是一个多输入、多输出（MIMO）系统，使用多个窄光束发送器和一个多分支角-分集接收器。发送器的功能是产生若干个漫射光点，用均匀分布的光信号覆盖一个房间的天花板。接收器由瞄准不同方向的若干个窄FOV接收元组成，它的目标是保证至多一个漫射光点处于每个接收器的分支FOV中。漫射光点能或者通过分开的激光器的光束用一个普通透镜投射在天花板上建立，或者通过用一个全息光元和产生多个光束的单个激光器来建立。

Al-Ghamdi和Elmirghani^[7,8]使用一个简单带状线的多光束发送器和角分集检测器，减少了多通道色散，增加了接收光功率。它使用一个较低复杂性的多光束发送器，放置在底部向上指向一个发送器上的全息光漫射器。这样一个结构产生多个窄光束，它照射多个小的区域，在天花板上形成一个漫射光点阵。

Garfield et al^[9]使用多个空间上分开的非定向、非视距的收发器，克服了功率限制，增加了数据速率和谱密度。

这种方式是基于MIMO空-时编码技术，用独立数据表示在一个训练周期的期间内，通路瞬时状态的特征。1998年提出的空-时编码是提供多个天线衰落通路传输分集的一种新颖手段。用每个数据传递的通路瞬时状态特征允许智能处理多个独立的接收信号分量，能对抗通路变化和遮挡。其它研究者提出了硬件实现，实验了一种灵活定义无线MIMO的测试床及用 2×2 Alamouti型空-时编码表示一个低移动性室内漫射通路矩阵。通信系统由两个相同的发送器单元组成，其间隔仅受限于实用的考虑。每个发送器由包含6个高速红外LED的一个阵列组成，所有红外LED发送同一信息。接收器由两个单元组成，其间隔仅受限于实用的考虑，每个单元有3个高速PIN光二极管。实验结果显示了硬件空-时编码的实现，证明了通过提高分集的水平能改善误比特性能。也显示出误比特性能将随发送器阵列的单元间距离和发送器到接收器的距离而变化。MIMO技术有改善漫射光链路的能力，与RF数据率相当，但是没有外部干扰。

3.2 用于改善系统性能的最佳漫射图案

为了改善系统性能，Wong et al^[10]提出用模拟退火（Simulated Annealing, SA）算法生成最佳漫射图案的一种方法。模拟退火算法是在一个最佳化处理中找到一个全局最小的手段，Yao et al^[11]用该算法，以最低成本函数来优化转换一个点源成扩展源的全息光掩模（hologram mask）。一种基于常用的正方格型的模型示于图2，有8个不同的点图案和5个不同接收器的FOV，用于确定组合点图案和接收器FOV的最好结果。

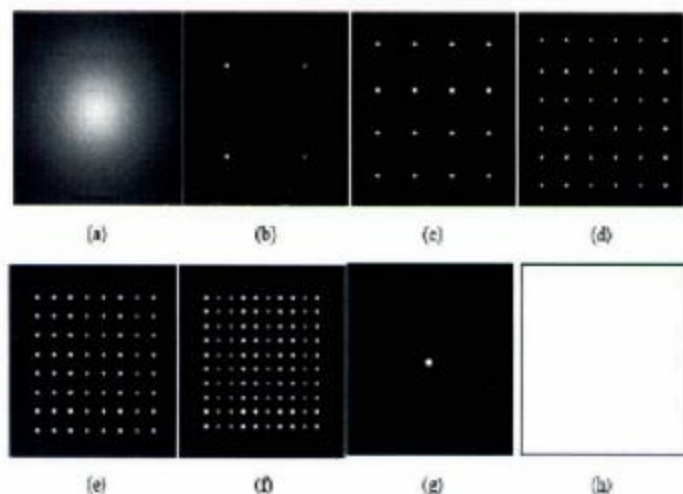


图2 用在常用的格型仿真中的点图案

(a)朗伯漫射, (b) 2×2 , (c) 4×4 , (d) 6×6 , (e) 8×8 , (f) 10×10 , (g)单点, (h)均匀照射

模型由一个用于发送器的朗伯（Lambertian）漫射图案和其它5个具有不同间隔的基于格的设计组成。每个图

案用1W功率均等的分配到所有的点。使用5个FOV值10、20、30、45和90度。可以找到最佳FOV, 点图案用模拟退火算法最佳化, 为一个目标参数获得最佳的点分布。

虽然模拟退火算法化了较长的计算时间, 结果显示模拟退火算法比简单的迭代法有19%的改善。为5个不同的FOV, 最佳化获得最小延迟扩展的点图案, 可以看到在格的设计下, 接收信号功率的方差减少93%, 均匀照射图案上, 接收信号功率的方差减小87.5%。

3.3 室内链路中的人眼安全

为了人眼安全, 按IEC标准从点源发射来可接受的功率在850nm波长处(类1), 必须是小于0.24mW左右。然而, 在室内光无线链路中, 一个实用的接收器设计需要大约-30dBm的入射光功率, 转换成一个单独光源发射大约为10mW。这样一个源功率远远大于类1点源可接受的发射限制。设计全息光漫射器的工作已开展, 全息光漫射器将一个高功率点源(如激光器)在一个大的区域分散功率, 保证人眼安全的光无线联网传输。

Yao et al^[10]使用一个产生全息图的计算机来建立一个全息光漫射器。一个计算机产生全息图不需要一个物理的模型, 但是需要用Fraunhofer approximation的数学描述。一个基于迭代处理称为模拟退火算法的计算机首次设计了一个所需的全息光影像。然后, 该影像在一个空间光调制器上显示, 它的图案在一个用氦氖激光器照射的晶体上获得。这种晶体全息光漫射器用于一个光装置与一个准直透镜和Fourier透镜一起, 在无线联网中散播光。这种漫射器能扩展10倍激光束的尺寸, 在距离2m, 面积 $4 \times 5\text{m}^2$ 上, 均匀地散播幅射图案。这种装置由于减少功率至0.35mW以下, 使高功率激光器能安全使用。

4. 室内光无线通信在下一代超宽带家庭接入网中实现的方案

未来Internet将要求一个特别高带宽的“核心”和“接入”网, 需要与传输和交换中的结合发展一起来完成这个目标。室外短距离光无线通信在“核心”和“接入”网中的应用主要体现在使用自由空间光链路(FSOL), 自由空间光载无线链路(RoFSOL)及多业务传输用的波分自由空间光载无线链路(DWDM RoFSOL)^[12]。

然而, 仅有这些发展还不能充分提供未来Internet对各个用户的好处。家庭接入网(HAN)在实现宽带渗透中起着重要的作用, 作为使端到端业务能够实现的部分。实现高带宽接入到家庭和各个设备是保证未来Internet成功的唯一方式。这个任务非常具有挑战性, 传统的室内网络, 如学院和公司内设备具有比它们到电信设施接入点高十倍的带宽。FTTH接入承诺对每个家庭至少100Mbps对称数据速率, 这意味HAN应支持Gbps数据传输和约10ms的时延。这些性能要求将保证对端到端WAN没有瓶颈出现和HAN对本地业务将有所需的容量, 如接入到海量的媒质存储。此外, HAN的性能必须足够高, 以维持若干个同时出现的业务, 同时彼此间有非常不同的要求。而且必须是低成本, 小尺寸, 容易生产。所有这些挑战的组合定义了家庭Gbps接入(hOME Gigabit Access, OMEGA)。

4.1 OMEGA的观点

在家庭内, 家庭网络将提供Gbps容量和低时延, 并使用或者无线传输或者现存的有线家庭基础设施连到接入网。

家庭网络的概念如图3所示。进入家庭的数据被家庭网关(HG)路由。该网关再连到OMEGA硬件, 它能通过使用视距(LOS)60GHz RF或者LOS光无线链路来提供Gbps数据传输。房间域通信是通过超宽带(UWB), WLAN(IEEE802.11n)和用可见光通信(VLC)的广播来提供。

为了扩展渗透高达Gbps数据速率, 网关也能使用RF连到终端或者用目前已有超过100Mbps数据速率的电力线通信(PLC), 未来可达1Gbps(G.hn), 连到家庭中的OMEGA桥(bridge)。

LOS光无线链路能提供Gbps数据通信。这样的设备与相应的RF设备比较, 具有较低的复杂性, 其复杂性不随数据速率增加而上升, 特别是当传输Gbps数据率时, 将提供比LOS RF更有吸引力的解决方案。

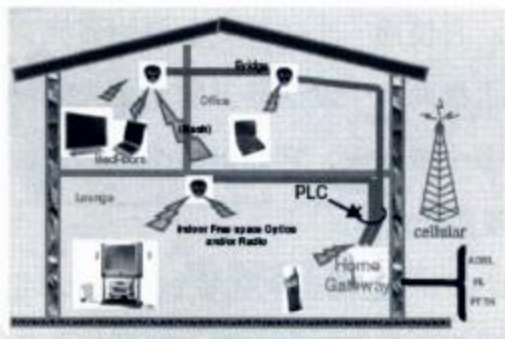


图3 按OMEGA观点的超宽带家庭域网络

采用LED光源使VLC成为数据广播有吸引力的选择，仅附加很小的复杂性，LED源能被调制，提供照明和数据传输，并集成进OMEGA。红外（IR）和VLC将组合，提供混合无线光（Hybrid Wireless Optic, HWO）子系统。还将组合RF和PLC系统提供广域覆盖。这些异构通路，基于通路的互补特性，提供强壮的通信能力和多样性的可用链路。

4.2 HWO研究的内容和方法

4.2.1 HWO的发展

光无线（OW）通信已得到广泛的研究，但是采用快速的数据率增长的RF（WiFi）通信致使OW不具有吸引力，原因是它的缺点（很少的链路余量和对障碍的敏感）。然而，WiFi需要搬移到更高的RF载频（60GHz），导致RF通路也要求视距（LOS）。LOS光无线链路与或者由VLC或者由WiFi提供的宽域覆盖相结合，能提供一种有吸引力的高带宽，可靠的替代“纯RF”的方式。此外，从不断拥挤的RF频谱的观点来看，光无线能提供一种支持无线接入新的手段。

因此，HWO的研究工作主要目标是建立验证概念的HWO链路。为了提供一个范围的通信通路，将组合两种光无线通信技术在一起。红外光无线（IR OW）将用于提供Gbps LOS通信，而VLC提供低数据速率的广播覆盖。同时将开发一个HWO的“inter-MAC”层，用于控制不同的可用通路，并且将完整的HWO原型样机整合进OMEGA平台。此外，为支持整个系统的流量，还需要在MAC级整合OW与其它通信通路，如PLC和RF，如图4所示。

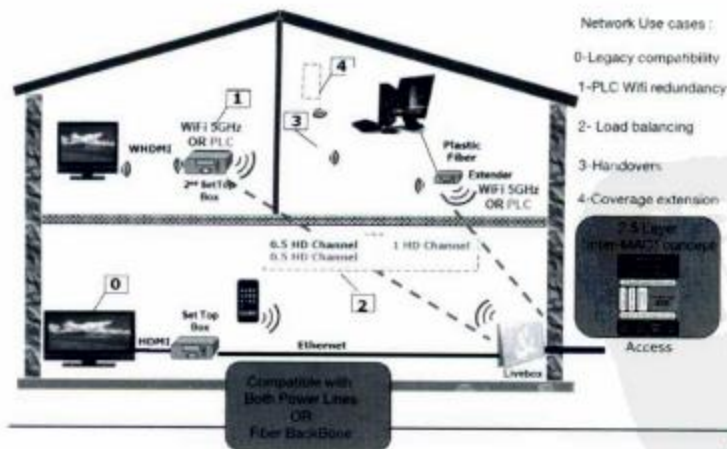


图4 家庭连接与“inter-MAC”覆盖

4.2.2 HWO研究的目标

主要目标是建立验证概念的HWO链路

图5显示了将开发的两个传输系统示例。

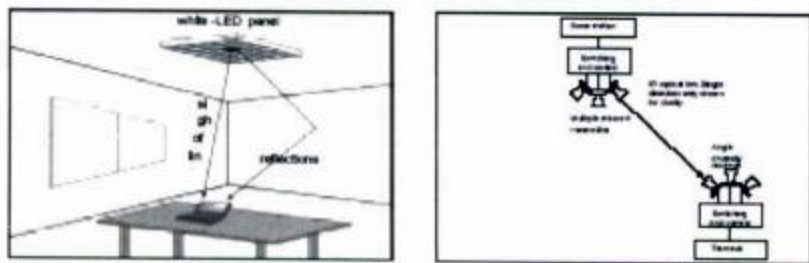


图5 混合无线光验证概念链路

图5中，左边是VLC，右边是Gbps LOS IR。一个IR多元发送器将在视距上与多个接收器通信，目标数据速率1Gbps以上。使用VLC的原型样机实现100Mbps以上的数据广播。两种链路通过完成所需交换和控制及与技术无关的HWO MAC层合并，将提供尽可能好的光连接到Inter-MAC层。这个HWO MAC需要考虑到光通路的特性。

4.2.3 HWO研究的方法

（1）IR链路

自由空间Gbps传输受光电器件可用性的严格限制。为了允许用户跟踪，获得覆盖和高的数据率，需要阵列光源和光检测器。由于阵列产器难于制造，而研究的目标集中在网络而不是光器件开发，所以将采取模块的方式。将开发工作在Gbps速率的发送器和接收器模块，并具有一个最大视场和发送范围。然后，提供所需的整体封装。因而，这个研究的关键部分首先是设计和从机械和光电的观点来优化这些模块。经测试后，若干个模块将制造，并组合成所需的发送器和接收器阵列器件。第二个关键是这些阵列器件的控制和交换。在可编程硬件上，将尽可能地开发和实现算法。最后，用HWO MAC层，将一个完整的IR验证概念的链路于VLC验证概念的链路进行整合。

（2）VLC链路

由于白光LED的带宽限制（20MHz），提供超过100Mbps速率的自由空间数据传输是一个挑战。这个目标通过一个组合途径来实现：

> 视距（LOS）链路：由于为了达到一个房间合适的照度，房间照明将由多个灯提供的事实。

> 非常高的信噪比：由于立法指南规定的高照度和使用低噪声，大面积光接收器^[13]。

> 检测白光发出的兰色部分：当全部发出的可见光谱比较时，兰色谱范围提供高一个数量级的调制带宽^[14]。

为了实现上述策略，将需要开发新的模拟驱动电路。也需要开发高效接收光和低噪声转移阻抗放大器。为了实现100Mbps目标，需要的多电平调制将是基于广泛应用于DSL的离散多音（DMT）技术。DMT调制器和解调制器将是可编程的，并且在现场可编程阵列（FPGA）中实现。数据将由PLC或某些其它有线或无线连接提供到发送器。

（3）HWO MAC

将研究VLC和IR系统组合的技术，考虑的因素包括流量的非对称特性，数据速率及VLC和IR功能间的倒换时间。目的是建立尽可能好的光连接，报告它的性能与特性至Inter-MAC层。

4.3 HWO的建模和仿真

建模和仿真将用于开发、规范和验证用于VLC和IR的物理层，这个研究将包括：

4.3.1 通路建模

将开发一个完整的OW链路模型，包括光电装置；调制和编码；通路模型和接收器架构。起因于再定义用于链路的器件级规范。

4.3.2 未来的路线图

对未来无线系统的需求将用于确定OW系统所需的性能。当可实现时，这将转换成所需的器件性能改进并进行评估。特别关注是为提供用于波分复用的多波长发送器和接收器。

4.3.3 光电子系统

这个任务是基于器件级规范驱动以及为实现用IR的Gbps传输及用VLC的100Mbps广播，开发发送器和接收器子系统组件。

（1）发送器子系统

对VLC，将开发用于一个目标带宽20MHz，LED阵列的线性高速驱动电路和一个适用的多电平调制。

将开发Gbps高速，LOS工作的单路IR发送器模块，也开发集成进一个大视场中，几何上的“元”发送器。

（2）接收器子系统

将从事VLC和IR应用的前置放大器详细设计的研究，起因于将用于开发各自的VLC和IR接收器。这些工作完成后，将生产足够数量的接收器单元来提供要求总的视场。

（3）光链路信号处理

对VLC，为了解码发送的多电平符号，需要信号解调制。这个子任务包括选择数字硬件的评估。

对IR，为了获得覆盖，需要发送器和接收器模块间的系统交换。这个子任务将考虑如何确定通路状态和模块间如何实现切换。

（4）VLC与IR的比较

VLC与IR在室内应用的比较见表2。

表2 VLC与IR的比较

典型特性	IR(红外光)	VLC(白光)
信号光源	红外LED，红外LD	白光LED
工作波长	典型波长800-900nm	380-780nm
调制带宽	几十KHz-几百MHz(LED)， 几十KHz-几十GHz(LD)	几十KHz-几百MHz
通路(信道)速率	理论100Mbps 已实现16Mbps	最初设计限10Mbps
室内布局	需另架设红外通信电源及线路	简化了室内线路布局
阴影效应	容易受其它遮挡物影响	室内安放多个LED，可消除阴影效应
发射功率	需限制发射功率，通信距离受限	通常情况下无需限制

4.3.4 架构和接口

为了提供由Inter-MAC要求的连接，HWO系统使用最好的光通路，经一个HWO MAC层连到Inter-MAC。这个任务将研究可能的MAC架构，开发无线光交换（WOS）和到Inter-MAC所需的接口。各个部分的研究描述如下：

（1）交换和控制器

在这个子任务中，将研究、选择和实现一个完成可靠传送和网络层的控制器，能适应无线IR和VLC配置。目前还没有这样的设备，所以这个子任务将包含规范和评估。最终将实现一个适用的方案，或者基于可用的技术或者新的基于软件的方式。

（2）接口

将开发用于Inter-MAC层，符合语义定义开发的接口。这个接口将报告HWO系统的性能，支持Gbps数据连接到Inter-MAC层。

4.3.5 整合HWO系统

为了建立一个完整的验证概念系统，IR和VLC验证概念链路将用HWO交换进行整合。在最初的性能评估和验证后，将提供一个全系统原型样机，并用于整合进OMEGA平台。其次将作为测试床，进行各种条件下，广泛的性能测试。这些将包括误比特率、延迟和QoS评估。

5.室内光无线通信近期的发展及未来发展的

方向

5.1 高速LOS IR通信

光无线系统的性能受限于发送器规定的功率和接收器有限的灵敏度及可用光增益的限制。

5.1.1 发送器

发送器必须满足人眼安全的规范。对室内系统一般可接受的标准是发射应为1类（最严格的类）。这能通过使用一个漫射器来满足，最近用于平板显示器开发的漫射器意味着具有控制发射角的漫射器是可用的。我们认为地面玻璃或朗伯漫射器不适合窄角情况下使用。

此外，高功率源调制速率高于几百Mbps是困难的，故在Gbps系统中需要的高功率和高速率是困难的实现。达到用高调制速率的足够功率密度，而最小化发送的总功率需要使用多源。这可通过一个阵列源来实现，如图6所示。

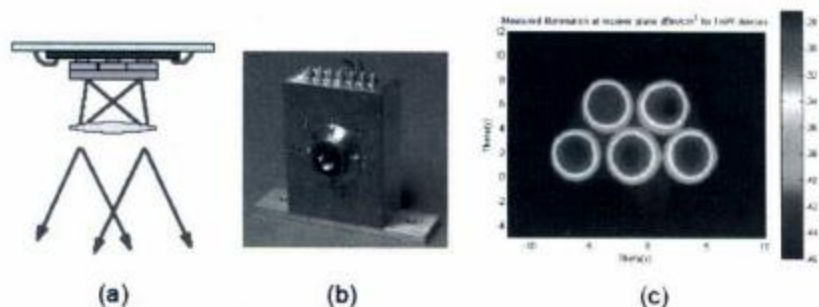


图6 (a)图解的整合发送器；(b)完整的7路发送器组件；(c)测量的覆盖图案

在这个示例中，使用一个谐振腔LED（Resonant Cavity LED）阵列与驱动器整合在一起。制造了一个7路发送器，工作速率大于100Mbps（曼彻斯特编码的OOK）。

图7表示OMEGA项目中使用的方法^[15]。

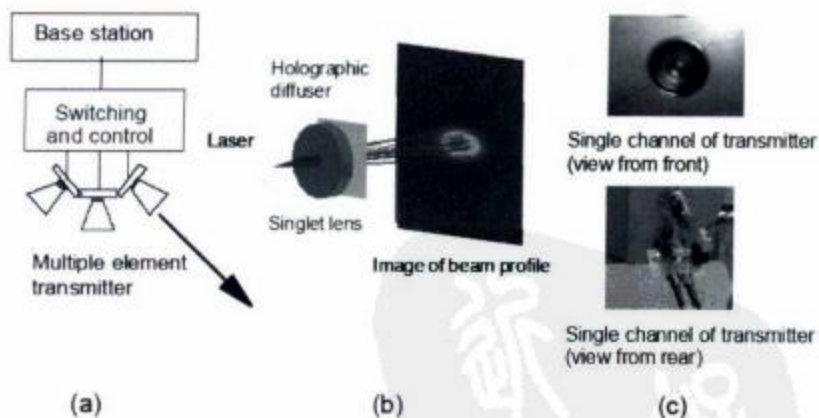


图7 (a)角分集发送器设计；(b)单个元发送器；(c)1.25Gbps系统的单个元发送器图片

在该情况中使用一个角分集发送器，具有优点是单个、高功率发射器及使用商用的驱动IC，但缺点是整合这些混合的器件导致庞大的组件。

图7(c)表示用于OMEGA项目中完整的发送器图片。

工作在1.25Gbps和为保证人眼安全，使用一个全息光漫射器。它发射波长825nm，25mW（平均）光功率进入一个半角10度的光束。设计主要的挑战是寻找具有足够调制带宽的单个激光器和达到激光器要求功率的商用驱动IC。

5.1.2 接收器

发送器由于实际的考虑造成很多制约，而任何光无线接收器存在理论的限制。理想接收器应具有宽的视场和大的光收集面积，但是它们受限于光系统的径角性（etendue），它由这两个数值的乘积给出。

图8表示一个具有光检测器面积 A_{det} 和视场 $\Omega_{det} = 2\pi$ 立体弧度（steradians）的一个典型的光系统。一个光系统用于增加收集面积至 A_{coll} ，并约束了可用的视场至 Ω_{coll} ，这里 $A_{coll}\Omega_{coll} \leq 2\pi A_{det}$ 。

因此，检测器的面积确定了接收器“收集的功率”，任一个光集中器根据系统要求，让视场和收集面积平衡。然而，可用的光增益通常受允许对准链路合理视场的要求相冲突的限制。检测器的面积通常联系到可用的带宽和某种程度联系到接收器前置放大器的噪声性能。只要保持带宽，检测器的面积不可能增加，如带宽设置或至少由放大器输入阻抗和检测器电容形成极点的影响。在低数据率时，用于高性能的自举接收器能减少这种影响，但是增加了带宽，通常意味着减少检测器的尺寸。典型的光纤传输系统接收器使用最佳化检测器电容的转移阻抗放大器，并且成为接收器设计的大多数可用部件，特别是在更高的数据速率将是更大的挑战。

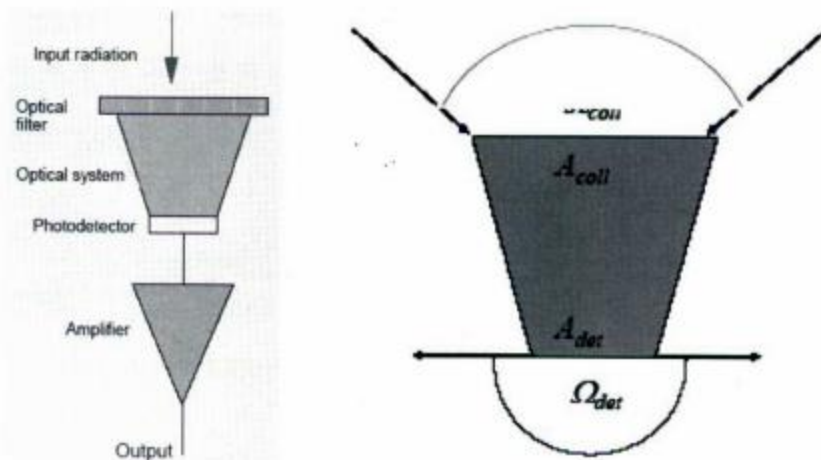


图8 接收器光系统

5.1.3 单个链路预算分析计算

图9表示一种有代表性的单个链路。一个朗伯源照射覆盖面积，按这个情况，确定所需的视场。光由一个理想的直射到检测器的光集中器收集。

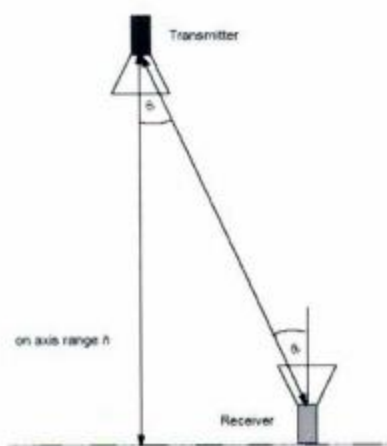


图9 链路预算的几何模型

接收器处的照度 (irradiance) $I(h, \theta)$ 由下式给出:

$$(1) \quad I = \frac{(n+1)}{2\pi} \left(\frac{\cos(\theta_l)}{h} \right)^2 P_s \cos^n(\theta_l)$$

在式(1)中, θ_l 是链路角, P_s 是源功率, n 是朗伯源的阶, h 是纵轴范围^[16]。这个功率被一个光系统收集并集中进入一个光检测器。对给定一个视场的最大收集面积由恒定辐射理论设定, 对具有折射指数 n_{conc} 的一个理想光集中器和一个面积 A_{det} 的检测器, 则光集中器的辐射收集面积 A_{coll} 由下式给出:

$$(2) \quad A_{coll} = \frac{n_{conc}^2}{\sin^2(\theta_l)} A_{det}$$

在(2)式中, 光进入一个集中器的角 θ_l 。

接收光功率 P_r 为

$$(3) \quad P_r = I A_{coll} \cos(\theta_l)$$

对一特定的发送器功率电平, 根据能获得的视场比较不同的接收器设计。图10表示了不同接收器灵敏度的链路半角曲线。在该情况中, 发送器功率固定在100mW, 集中器的折射指数是1.5。若干接收器设计报告表明收集面积和灵敏度是等效的, 曲线也表明大量增加灵敏度需要获得链路视场中最适度的增益。

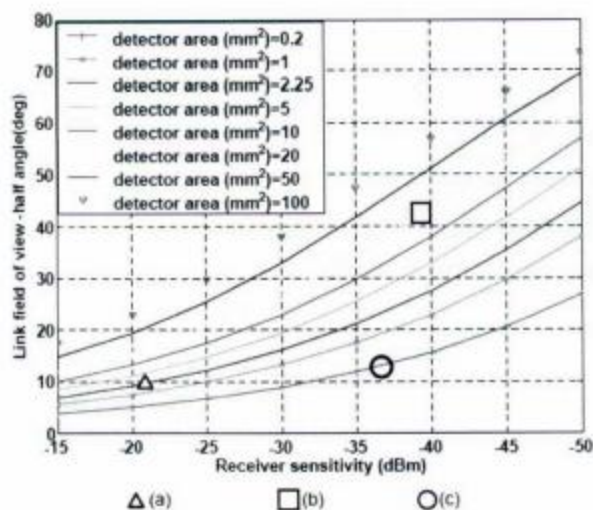


图10 对不同接收器灵敏度和收集面积的可用链路半角

(a) 接收器设计: $-20.1\text{dBm}@1.25\text{Gbps}$, 2.25mm^2 面积;

(b) 接收器设计: $-38.5\text{dBm}@155\text{Mbps}$, 20mm^2 面积;

(c) 接收器设计: $-35\text{dBm}@1.25\text{Gbps}$, 0.2mm^2 面积;

因此, 为了增加所需的收集面积, 获得大的视场和高的增益需要使用多个接收器元。这能用成像^[17]和角分集^[15]整合的设计。一个7路成像接收器设计示于图11, 角分集接收器设计示于图12。

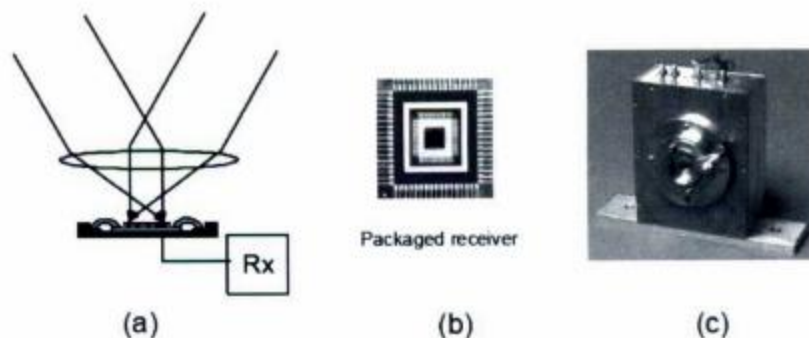


图11 (a)成像接收器方式; (b) (c)7路成像接收器图片

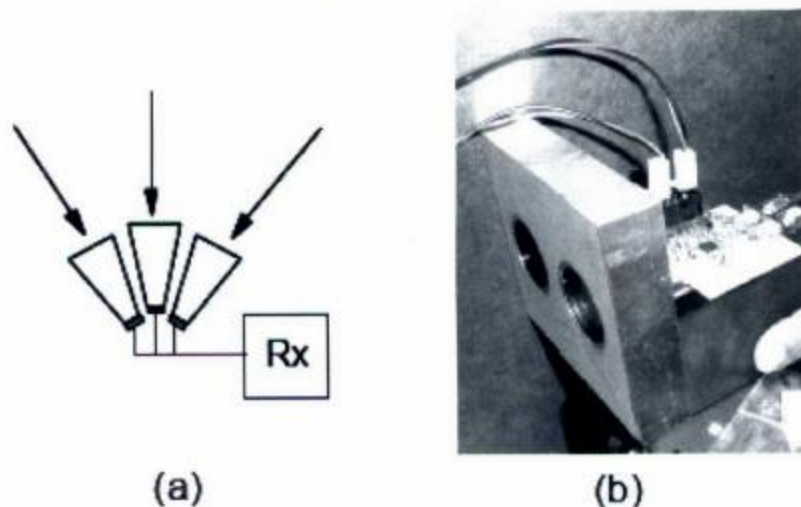


图12 (a)角分集接收器; (b)单个OMEGA接收器元的图片

这种方式也用于OMEGA项目, 由于商用器件的制约, 下一步将开发更紧凑的这类整合的收发器。

5.1.4 未来的发展方向

从图10可看到, 收集面积与灵敏度的比值确定一个对特定比特率的光接收器“收集的功率”。(收集面积加倍等效减半接收器对特定BER所需的功率, 在这里, 链路性能受限于电子噪声而不是环境光)。因而, 对给定的带宽增加收集面积和改进灵敏度是今后重要的目标。检测器最小尺寸优化, 低输入电容型的检测器, 接收器的增益机制等都是研究的内容。图12所示的OMEGA接收器使用改善灵敏度的APD和使用参量放大器工作^[18]。

光放大器也有吸引力, 但放大器只接纳窄角, 导致的损耗必须通过放大器增益来补偿。放大型光集中器也在研究之中。

相干检测在灵敏度内提供非常大的增益, 但是建立一个稳定的本地振荡器、接收器的相位、偏振及扰动的补

偿、宽的视场等挑战将不能低估。

对一特定数据率，需要在使用低带宽的高阶调制或使用高带宽的简单调制间平衡复杂性。

5.2 VLC

室内照明用于通信的主要优点是导致非常高信噪比（大于40dB）的可用功率，通路带宽至少90–100MHz。由于LED的调制带宽是制约因素，所以通信通路具有低带宽，但有非常高的信噪比。这导致三种增加通路带宽的方法：多电平调制；均衡；MIMO通信。

5.2.1 改进数据率：多电平调制

多电平调制，使用方案，如多电平脉冲幅度调制（MPAM）和提供超过100Mbps数据速率的离散多音调制（DMT）及多符号调制的正交频分复用（OFDM）。DMT方法已用于OMEGA项目，用固态光单元提供100Mbps广播，这个系统的物理层框图，如图13所示。

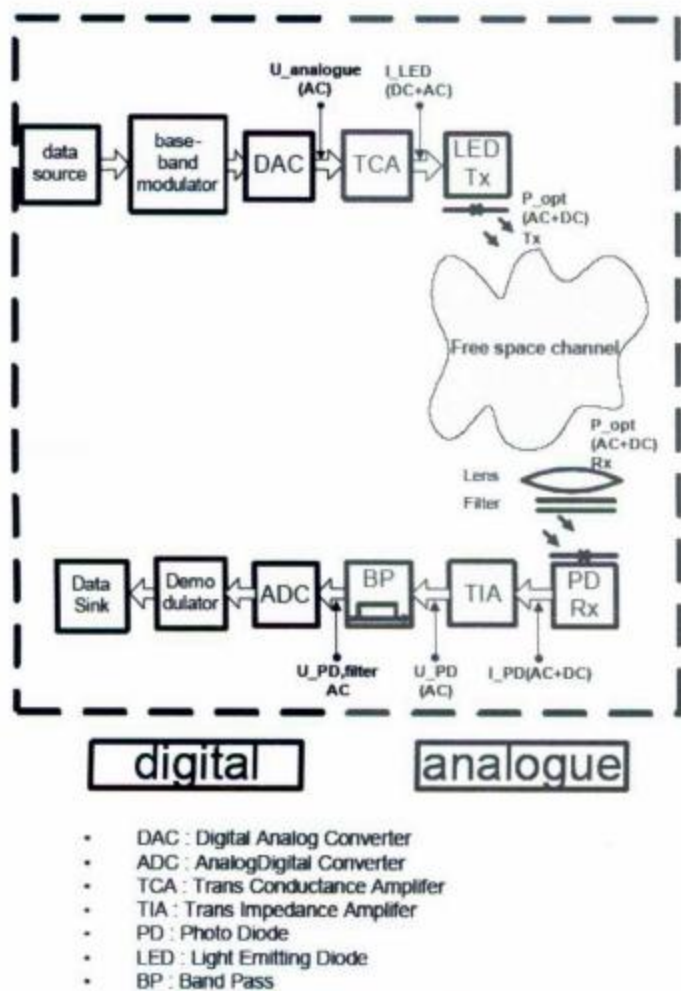


图13 OMEGA VLC框图

DMT用于调制白光LED，同时也提供室内照明。光传播到一个接收器，它用一个蓝色滤光器去除辐射中的慢响应的黄光分量。使用DMT方式的好处是已广泛应用到ADSL系统，标准、技术成熟。然而，还存在线性驱动LED相关的挑战，要用足够的电流提供所需的照明。

5.2.2 均衡

LED的均衡（又称预均衡）能用于补偿低的调制带宽。在^[19]中，用一个LED阵列，在特定频率采用使驱动电流最大的串联谐振电路，每个LED的光响应‘尖的’。通过在阵列中，适当安排串联谐振频率和每个LED峰值幅度，能实现具有高集合带宽的一个LED阵列。示例中，用16个LED，允许增加的总带宽从几MHz至25MHz，可在距离2.5m上，传输40Mbps。图14表示一个链路图，实现的带宽改善和获得的眼图。

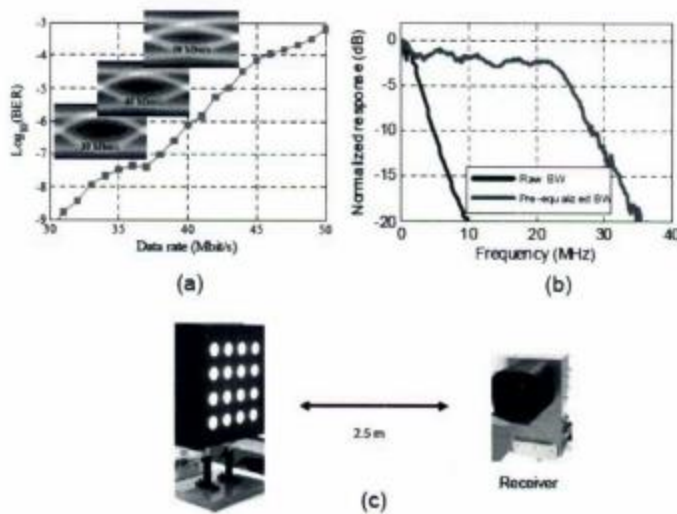


图14 用均衡LED阵列的数据链路

(a)随距离测量的眼图；(b)频率响应显示带宽的改善；(c)示例图片。

也可能使用接收器均衡（又称后均衡），它的优点是对每个发送器，不需要复杂的驱动电路。一个典型房间照明需要大量的发送器，这将降低系统的复杂性。在^[19]中，用组合蓝色滤光器和单极点接收均衡器来建立100Mbps数据链路，如图15所示。如果用更复杂的均衡器可以得到更好的效果。

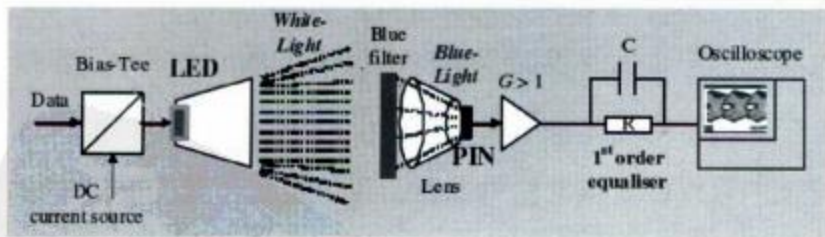


图15 组合蓝色滤光器和单极点接收均衡器来建立100Mbps数据链路

5.2.3 光MIMO

大的LED阵列用于房间照明自然地适合于并行数据传输。光MIMO分成像（漫射配置）和非成像模式（直射视距配置）。

成像模式要求源阵列精确成像到一个阵列检测器，用分开的空间影像形成不同接收器的像素，如图16所示。

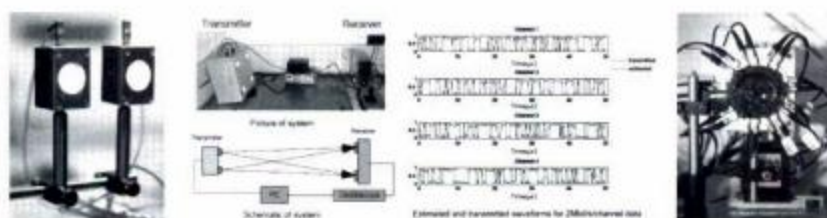


图16 VLC成像式MIMO系统

图17显示一个4路非成像模式MIMO系统的图片，使用白光LED作为发送器。

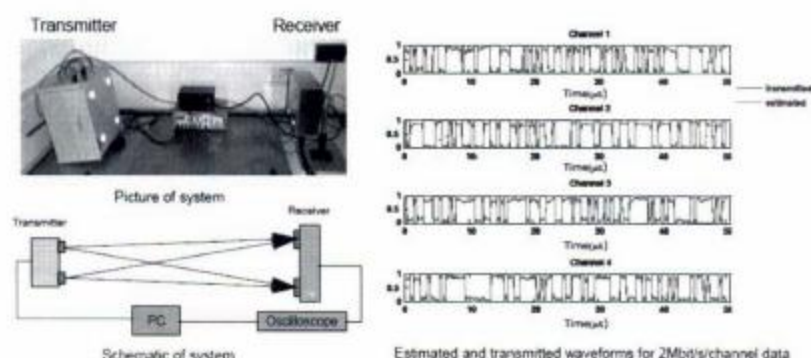


图17 VLC非成像式MIMO系统

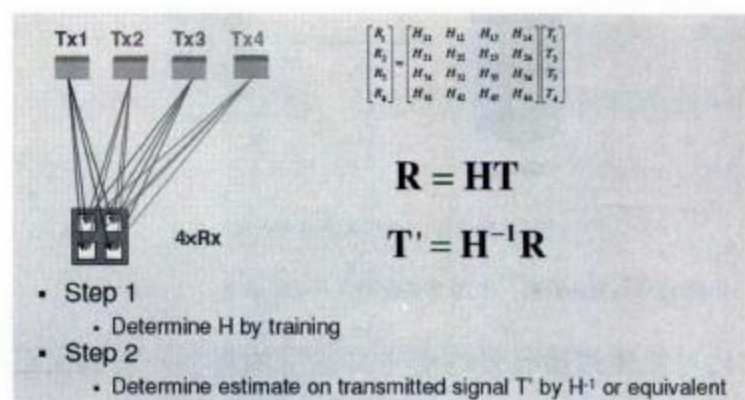


图18 4路非成像式MIMO系统的工作原理

如图18所示，四个发送器按它们相关的方向，用不同的强度照射四个接收器。系统用一训练序列工作，用以估算通路矩阵，然后存储。再后，不同的数据流从每个LED发送及被四个接收器接收。用倒置的通路矩阵相乘及随后的滤波，产生估算的四个被发送的数据流。这种‘倒置和相乘’的方案远远不是最佳的，但是从图17可以看到用这种技术可以恢复被发送的数据。系统的工作范围受限于接收信号电平，来自每个发送器的接收信号相关尺寸限制的覆盖面积和通路矩阵H的排列影响。存在这样的配置，当系统是轴向对齐，发送器光束照射多个接收器，而矩阵变坏的情况如对称性时，意味着行变得非常小。在这样的情况中，不是所有的数据流都能恢复。成像式MIMO能够克服这些缺点。一个阵列白光LED成像在天花板上的覆盖面积，使用MIMO处理技术可以去除串扰和恢复数据，仿真显示使用白光LED（每个带宽几MHz），集合数据率高达1Gbps是可

行的^[20]。

5.2.4 未来的发展方向

仿真和实践表明100Mbps信息广播是可行的，还具有实现Gbps的可能性。一个主要挑战是用低功耗来实现，特别是驱动LED必须最小化功耗。

对这些系统实现上行链路是一个挑战，因为源是广泛分布的以及任一个LOS上行链路必须在一特定的接收器处实现对准。已提出反向反射器（Retro-reflectors），如图19所示。配合使用RF和VLC通路，VLC用于下行链路，RF用于上行链路，如图20所示。对共享RF/OW实质好处的获得是通过一个广播的光下行链路，由于从共享RF通路移去负载，可专用于上行链路。

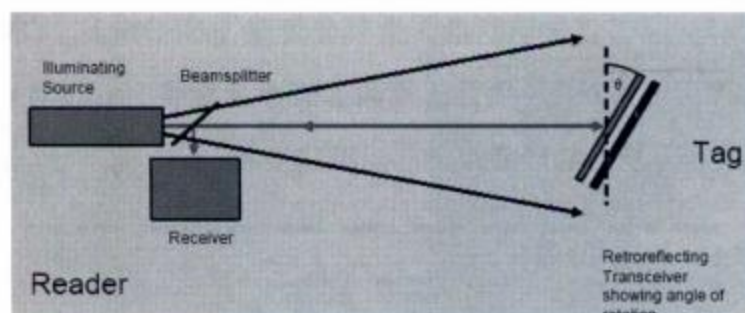


图19 反向反射器（Retro-reflectors）链路

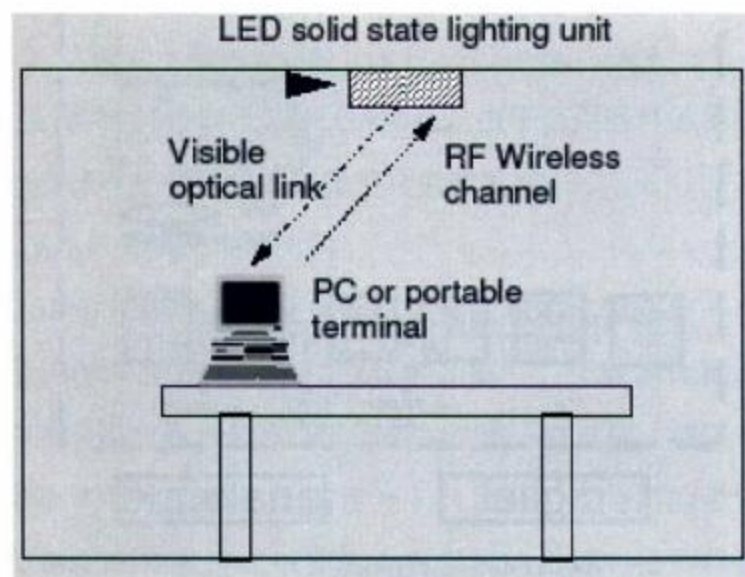


图20 配合使用RF和VLC通路

VLC通信和照明间的关系需要认真考虑脉宽调制（PWM）用于调光（Dimming）的光源，所以VLC通路在特定的时隙不可用，取决于PWM波形的工作周期。调制方案组合了调光和数据传输，但一般会减少吞吐量。这个问题仅是照明和通信间关系的一个示例，未来会面对照明标准的开发和通信必须适应它的标准。

6. 结束语

无线频谱需求不断增长将需要开发新的技术及系统。

由于低成本、易实现、不需频谱许可证和不受干扰,光无线通信已成为除光纤和射频(RF)通信系统外,可供选择的另一种媒质。

在室外环境,使用专用的光纤连到建筑物包括挖沟、敷设光缆、保护权益的方式及满足环境的规程。在频谱许可证的频带内,RF通信能提供更高的能力但频谱许可证是昂贵的,而没有频谱许可证的频带是带宽受限。两种RF技术都是相对昂贵、实现困难,而且会遭受现存RF系统的干扰。

室内光无线系统使用比RF或有线系统更便宜的光源和光检测器(PD),实现容易和不受来自建筑物其它部分的干扰。当光不能穿过墙壁时,通过在一建筑物的不同房间再用同一波长,容易构成基于蜂窝的安全网络。

光无线(光束)带宽比RF技术使用的最高频率高10000倍。此外,在使用波分复用(WDM)的单个光束上,多于1000个独立的数据通路能成组进入空中,于是,光无线能提供的潜在带宽是RF解决方案的千万倍。当用户密度和个人带宽需求增加以及由自然和人为灾难导致的应急情况时,光无线将成为网络和蜂窝可供选择的最佳媒质。

在室内环境,特别是在下一代超宽带家庭接入网(OMEGA)中,混合无线光(HWO)的研究工作对家庭域具有十分重大的意义。其实质是IR和VLC两种光无线技术的结合,它提供大量用户通过共享海量数据、用户产生的内容等来拉动下一代宽带技术的发展,同样也提升了用户对更高数据率的期待,这将促进无线宽带数据传输技术更快的发展。

参考文献

- [1] 吴承治“可见光通信技术及应用初探”“现代传输”3期2012
- [2] D.Kedar and S.Arnon, "The Positive Contribution of Fog to the Mitigation of Pointing Errors in Optical Wireless Communications," *Applied Optics*, Vol.42, August 2003.
- [3] Hossein Izadpanah, "A Millimeter-Wave Broadband Wireless Access Technology Demonstrator for the Next-Generation Internet Network Reach Extension," *IEEE Communications Magazine*, Sept. 2001.
- [4] Jason Derenick, Christopher Thorne, and John Spletzer, "Hybrid Free-Space Optics/Radio Frequency (FSO/RF) Networks For Mobile Robot Teams," www3.lehigh.edu/images/userImages/jgs2/Page_3813/LU-CSE-05-008.pdf

- [5] S.T.Jivkova and M.Kavehrad, "Multispot diffusing configuration," in *Proc. London Communication Symposium*, Sept 2002.
- [6] M.R.Pakravan and M.Kavehrad, "Design considerations for broadband indoor infrared Communication systems," *Int.J.Wireless Inform. Networks*, Vol.2 no.4, Oct.1995.
- [7] Abdullah G.Al-Ghamdi and Jaafar M.H.Elmirghani, "Line Strip Transmitter Configuration for Optical Wireless Systems Influenced by Background Noise and Multipath Dispersion," *IEEE Transactions on Communications* Vol. 52, No.1, Jan. 2004.
- [8] Abdullah G. Al-Ghamdi and Jaafar M.H.Elmirghani, "Analysis of Diffuse Optical Wireless Channels Employing Spot-Diffusing Techniques, Diversity Receivers, and Combining Schemes," *IEEE Transactions On Communications*, October 2004.
- [9] Matt Garfield et al, "Diffuse Free Space Optical MIMO Communication for Robust Indoor Local Area Network Links," http://www.ece.drexel.edu/faculty/dandekar/Papers/Garfield_QuantElectronics05.pdf
- [10] Damon W.K.Wong, George C.K.Chen and Jianping Yao, "Optimization of Spot pattern in indoor diffuse optical wireless local area networks," *Optics Express* 3000, Vol.13, April 2005.
- [11] J.P.Yao, G. Chen, and T.K.Lim, "Holographic diffuser for diffuse infrared wireless home networking," *Optical Engineering*, vol.42, no.2, February 2003.
- [12] 吴承治"FSO系统在下一代移动承载网中的应用"“现代传输”2期2012
- [13] J.Gruber, O.C.Gaete Jamett, J.W.Walewski, S.Randel, K.-D.Langer, "High-speed wireless indoor communication via visible light," *ITG Fachbericht* 198, 2007.
- [14] J.Gruber, S.C.J.Lee, K.-D.Langer, T.Koonen, J.Walewski, "Wireless high-speed data transmission with phosphorescent whitelight LEDs," *Proc.European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC) 2007*, Vol. 6, Post-Deadline Paper PD3.6.
- [15] J.B.Carruthers and J.M.Kahn, "Angle diversity for nondirected wireless infrared communication," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, 2000.
- [16] F.R.Gfeller and U.Bapst, "Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation," *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, 1979.
- [17] J.M.Kahn, R.You, P.Djahani, A.G.Weisbin, B.K.Teik, and A. Tang, "Imaging diversity receivers for high-speed infrared wireless communication," *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, 1998.
- [18] S.M.Idrus and R.J.Green, "Photoparametric amplifier for optical wireless communication system," in *6th IEEE High Frequency Postgraduate Colloquium*, 9-10 Sept. 2001 Cardiff, UK, 2001.
- [19] H.Le-Minh, O'Brien-Dc, G.Faulkner, L.Zeng, K.Lee, D.Jung, and Y. Oh, "100-Mbit/s NRZ Visible Light Communications Using a Post-Equalized White LED," Accepted for publication in *Photonics Technology Letters*, 2009.
- [20] L.Zeng, H.Le-Minh, O'Brien-Dc, G.Faulkner, K.Lee, D.Jung, and Y. Oh, "High data rate Multiple Input Multiple Output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting" accepted for publication in *IEEE JSAC*, 2009.

作者简介:

吴承治 教授级高工“现代传输”编委会副主任

