

宽带接入网关键技术研究进展

张崇富¹, 陈晨², 张位¹, 邱昆¹, 袁伟程¹, 闫扬扬¹

1. 电子科技大学通信与信息工程学院; 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731
2. 新加坡南洋理工大学电子与电气工程学院, 新加坡 639798

摘要 宽带通信网包括高速光纤传输骨干网和宽带接入网(BAN), 但两者发展极不平衡。尤其是BAN在保密性与私有性、成本与能耗、融合兼容性及速率与带宽等方面亟待突破。综述了BAN的研究进展, 分析了BAN理论与技术的发展趋势及关键问题, 探讨了增强BAN的保密性与私有性、降低BAN的成本及提升BAN的融合兼容性问题。

关键词 宽带接入网; 接入网融合; 光通信; 无源光网络

宽带通信网络是国家信息化的物资基础和主要动力, 是国民经济的基础设施, 但其两大主体发展极不平衡。光纤骨干网传输技术得到突破性发展, 2015年KDDI报道采用超级Nyquist-WDM技术实现了140.7 Tbit/s多芯单纤传输7326 km的世界纪录, 足以满足信息容量快速增长的需求。但宽带接入网(BAN)目前仍以光纤铜线混合接入为主, 存在城域接入独立通信模式等瓶颈, 这导致BAN保密性与私有性低、成本能耗高、网络融合与兼容性差及宽带与速率受限等基础问题及关键技术难题, 难以满足新一代宽带接入通信网的需求。因此, 采用新型宽带接入体制与架构、新型信号处理的宽带接入已成为国际前沿与热点问题。由于无源光网络(PON)可以提供高带宽和低成本效益, 被视为下一代宽带接入网(NG-BAN)的一种经济前瞻性备选方案之一^[1]。PON对各种接入复用技术具有强的融合性, 如波分复用(WDM)、正交频分复用(OFDM)、正交频分多址接入(OFDMA)等^[2-3]。目前BAN已成为国际光通信领域的研究热点之一, 其研究主题主要包括: 1) 保密性与私有性; 2) 低成本与低能耗; 3) 光纤无线融合、城域接入融合及多业务兼容。

2013年,《Nature》刊登了关于“接入网安全性”的研究报道。2015年, 中国政府工作报告明确提出“实施‘宽带中国’战略, 推进城市千兆光纤工程和宽带乡村工程, 大幅提高互联网网速, 全面推行‘三网融合’, 维护网络安全”。极大地促进了对宽带通信网尤其是BAN安全性、私有性及宽带等关键问题的高度重视。目前BAN的保密通信主流方法包括网络层加密和物理层加密。基于网络层的保密性增强方法核心是数据加密, 不过该技术存在系统基础性安全风险^[4]。由此出现了物理层加密, 该方法是在物理层对整个数据帧进行加

密的增强技术^[5]。另外, BAN私有通信主要包括逻辑层私有通信和物理层私有通信。逻辑层私有通信是基于地址识别技术, 通过地址来区分不同私有网络的用户。针对物理层私有通信, 波长识别技术被广泛地应用于时分复用无源光网络(TDM-PON)^[6]和波分复用光载无线通信(WDM-RoF)^[7], 通过不同波长的识别区分不同私有通信用户。

为了推进NG-BAN的工程应用, 降低接入网成本与能耗尤为重要^[8-13]。解决BAN光网络单元(ONU)无色无源则是降低其成本与能耗的有效途径之一, 无源ONU技术主要包括集成光源技术^[8]和信号重调制技术^[10]。集成光源技术主要思路: 上行光源由光线路终端(OLT)或光分配网络(ODN)直接传送过来, 各个光网络单元利用来自OLT或ODN的下行纯净光载波作为上行光载波来承载上行信号。信号重调制技术主要思路: 把接收到的下行数据信号作为光载波, 然后利用反射式调制器先将光载波上携带的下行数据信号擦除, 从而得到纯净的上行光载波, 然后再将上行信号调制光载波上进行上行传输。

顺应网络扁平化、业务融合承载下一代通信网的发展需求, 城域网与接入网、有线与无线及多业务的融合已成为BAN的必然发展趋势。将城域网与接入网进行无缝融合, 可以打破传统城域网与接入网的独立通信模式, 构建新型有源无源与有线无线融合BAN, 促进宽带高速、多业务融合、低碳网络和绿色通信技术的发展。目前, 融合BAN的研究主要是对于城域网与接入网络的融合^[14]以及光纤接入和无线移动网的融合^[15], 尤其是不同接入方式、制式、模式及业务等的融合兼容。城域接入融合网络主要采用远距离传输技术^[16], 先进拓扑结构构建广域的无源传输接入网络, 有效打破传统接入

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-07-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2015AA015501); 国家自然科学基金项目(61571092, 61471087)

作者简介: 张崇富, 教授, 研究方向为宽带接入网与安全通信, 电子信箱: cfzhang@uestc.edu.cn

引用格式: 张崇富, 陈晨, 张位, 等. 宽带接入网关键技术研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(16): 34-44; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.16.003

网和城域网大量光电转换瓶颈。此外,无线与光纤接入融合,其研究主流技术是光纤无线通信(RoF)^[17]。RoF技术是一种光和微波相结合的通信技术,利用光纤的低损耗、高带宽特性,提升接入网的带宽,为用户提供“Anywhere、Anytime、Anything”的服务。融合BAN支持多维通信模式,不仅提升接入通信速率,降低接入运营和管理复杂度,也增强了接入的灵活性及扩展性等。

1 接入网的保密性和私有性

随着BAN技术的发展,其接入速率不断提高,用户和服务不断增多,这些都使得接入网安全性问题变得越来越突出。相对无线接入,光纤接入网由于抗电磁干扰和射频干扰,具有相对高的安全性^[18-19]。但BAN光纤链路仍存在多种窃取和干扰,一是利用网络中组件直接窃取传输信号,如采用光纤弯曲、光学分束、短暂耦合及V型槽等窃取信号,但该方法容易被接收端的功率检测器件发现;二是利用网络中组件的非线性效应窃取信号,如波长选择器引起的串扰导致信号干扰,也可窃听到同一波长上其他用户的传输信息^[18]。BAN还受到干扰攻击,一是带内干扰,即在单个波长上注入相同波长光信号以中断服务,而不扰乱其他波长,其干扰很难被定位;二是相关干扰,通常与窃听结合在一起,通过窃听获得下行链路中的传输信号,然后用噪声替换传输信号,该攻击相对非相关干扰的危害性更大^[20]。另外,BAN受到来自网络层面的攻击,光线路终端OLT发送的下行数据信息以广播形式发送给光网络单元ONU,所有ONU都接收到下行帧,非法ONU可以接收来自OLT的下行信号,导致下行信号传输机制存在巨大安全威胁,成为无源光网络中最主要的安全性隐患之一^[21]。IEEE 802.3ah以太网无源光网络(EPON)标准和ITU G.983宽带无源光网络(BPON)标准没有指定任何身份验证和加密机制,而ITU-T G.984吉比特无源光网络(GPON)建议使用高级加密标准(AES)用于下行传输^[22-23]。高级加密标准加密所用的密钥在ONU端产生,然后经由上行链路传输给OLT,OLT则利用接收到的密钥对下行数据进行加密。但由于Dirty Connectors的出现,窃听者则可利用由接头反射获得的光功率观察到来自合法ONU的上行信号。这导致上行链路传输的密钥易被窃听者获得,从而使窃听者能够解密窃听到下行信号^[24-25]。

提高BAN安全性基本方法是在协议栈层及应用层上加入密码协议,该方法采用加密技术提高信息的保密性和完整性,通过认证防止非法用户的接入。如在异步传输模式无源光网络(ATM-PON)标准中,指定“搅动”作为系统的加密技术,对数据进行扰乱并提供保护,但这种加密技术过于简单,存在安全性问题。S. Thomas等基于搅动技术提出了一种被动攻击改进方法^[26]。针对GPON,NIST研究所提出了一种新型AES加密方法,对传输数据提供了保护^[27]。EPON采用IEEE802链路安全性提高方法,其实质是利用MAC层加密提

高数据链路层的安全性^[28]。这些较高级别的加密技术虽然增强了BAN信息接入安全性,但仅提高了数据和数据链路的安全性,并不能为BAN系统提供足够的安全保障:一是加密过程中所用的密钥、加密协议的控制流信息及表头等重要信息暴露在传输链路中;二是不能抵御来自物理层的网络攻击,如干扰、物理基础设施攻击及窃听和拦截等。随着光通信技术的发展,其传输数据速率不断提高,导致加密方式要求必须能实时处理且具有较高的加密速度^[29]。这对传统加密方式是一个巨大挑战,为了突破所述技术难点,增强BAN系统安全性的研究被转移到了物理层加密方法上。物理层加密具有显著优势^[30]:1)能有效增加协议栈层及应用层的安全性,从而提升BAN整体安全性;2)更易于实现对传输数据高速加密,且易于操作。

物理层加密方法是在BAN系统的物理层上加入安全机制,使传输链路中直接传输的符号相对窃听者是隐秘的,从而增加非法用户窃听信号的难度。物理层加密包括光域和电域信号处理^[31-32]。光学器件是BAN的主要部件,这使得光域信号处理容易实现,且光域信号处理具有速度快和无电磁辐射等优点。通过光域信号处理提高BAN物理层安全性的方法被广泛研究^[31-33],如全光编码、光学速记式加密、光虚拟网络等。BAN光学加密是一种有效保护接入信息安全及物理层安全性增强方法。光学信息处理本身具有高速并行的特点,光波长短、信息容量大,具有振幅、相位、波长与偏振等多维属性。这些特征使得光学信息处理完成数据加密与利用电子手段更具天然优势,如基于分数傅里叶变换的加密方法^[34]、基于菲涅耳变换的加密方法^[35]、基于离轴数字全息加密系统和利用相移干涉技术的加密系统^[36]等。虚拟专用网(VPN)也是一种有效提高BAN安全性尤其是私有性的方法^[37-39],该方法在公有网络中根据用户、服务等不同建立一个虚拟私有网络,该虚拟网络能够提高网络内部用户的安全性和私密性。为了给不同的ONU建立私有通信链路如ONU-ONU,VPN是一种方便可行的解决方法^[40]。一种全光VPN增强OFDM-PON信息传输私有性的原理如图1所示,它描述了光OFDM-PON系统中全光VPN结构及信息传输私有性增强机制^[41]。根据用户要求可以建立VPN内部通信,VPN外部通信和ONU外部通信。

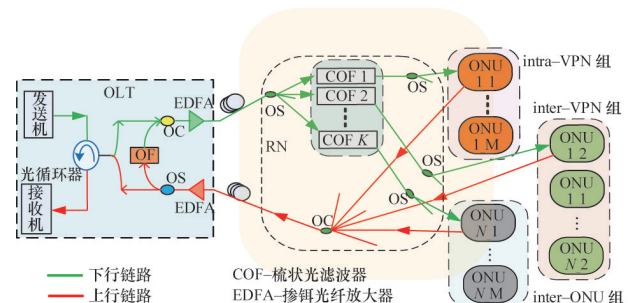


图1 基于VPN的OFDM-PON原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of VPN-based OFDM-PON

在 OLT, 上行数据分为两部分, 一部分直接进入 OLT 接收器进行解调, 一部分进入光滤波器。下行数据通过单模光纤发射到远端节点, 在远端节点下行数据流会进入一个光梳滤波器组。光梳滤波器的数量“K”等于内部 VPN 组、外部 VPN 组及外部 ONU 组之和。

基于混沌加密 BAN 是近年来通过物理层增强接入保密性研究的又一热点。激光器在一定条件下光注入, 光电反馈的作用将产生混沌光信号, 这种光信号动力学行为复杂, 具有不可预测性^[42]。在 BAN 系统中利用该光信号调制数据, 在接收端如没有匹配特征的同步激光器将难以获取信息。光通信系统利用接收端和发射端同步的混沌激光器传输信息, 能够增强保密性^[42], 将该方法引入到 BAN, 提出了一种基于半导体激光器同步的 WDM-PON 系统, 利用半导体激光器产生的混沌光信号代替传统连续波(CW)信号作为 PON 系统的传输载波, 将传输信息隐藏于混沌载波, 在接收端利用同步的半导体激光器来提取传输信息^[43-44]。为了提高加密处理速率, 基于光电混合混沌增强 BAN 物理层的保密方法得到了广泛关注^[45], 该方法利用混合混沌模式对接入信号进行加密, 将算法加密技术与激光器混沌产生的高维混沌序列结合在一起, 实现提高密钥安全的对称加密^[44-45]。利用二维 Logistic 映射组成电光混沌系统实现 OFDM-PON 系统通信, 下行信号在光域加密而上行信号在电域加密, 该方法具有较大密钥空间^[46-47]。由于光电混沌系统动力学行为复杂的特性, 相对激光器混沌系统增加了混沌信号的数字量化模块, 导致其实现困难。利用光学或光电混沌系统的复杂动力学行为来实现保密通信有其固有的优势, 但该方法的操作性及鲁棒性还有待深入研究。

电域信号处理是另一种有效提高 BAN 物理层安全性的途径。电域信号处理具有处理灵活、易于实现、容易与其他加密技术结合的优势。基于电域加密方式是 BAN 系统对数据进行频域或时域处理时实现对传输数据的加密, 处理方式包括改变比特数据或符号数据, 以及引入各种随机性来扰乱数据结构等。利用混沌信号进行电域信号处理增强 OFDM-PON 系统的安全性原理如图 2 所示, 利用混沌动力系统产生混沌置换或替换序列、对映射后符号时域或频域信息进行处理而加密, 窃听者由于只能接收到加密后的数据, 没有正确密钥而很难窃取到数据^[47]。

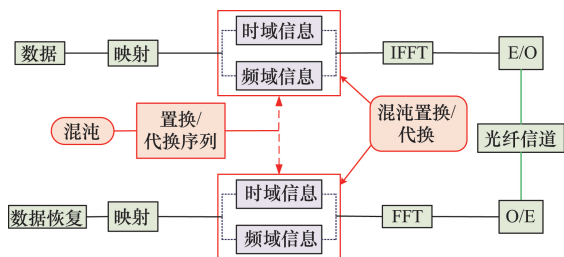


图2 基于混沌的BAN保密信息传输原理示意
Fig. 2 Schematic diagram of chaos-based secure information transmission for BAN

利用混沌产生置换序列来扰乱子载波顺序, 改变了数字调制后符号与子载波的对应关系, 这增加了窃密者窃取信息的难度^[48-49]。随机改变 OFDM 信号频域信息, 提出了时域和频域联合扰乱^[50], 扰乱星座点与加噪^[51-52]及多维扰乱^[53]等方法来提高 BAN 系统安全性。利用混沌和分数阶傅立叶变换结合增强 BAN 安全性^[54-55], 该方法采用混沌控制分数阶傅立叶变换的阶数, 使其阶数具有随机性, 从而增加了窃密者窃听信息的难度。基于混沌的 IQ 加密方法增强 BAN 系统的安全性, 该方法利用混沌产生的伪随机相位序列来改变正交振幅调制(QAM)映射后符号的虚部和实部相位, 具有加密过程复杂度低、加密效率高的特点^[56]。兼容系统安全性和抑制峰均功率比(PAPR)的保密方法通过引入混沌伪随机序列来做训练序列, 实现 OFDM 信号的同步, 使用混沌随机序列控制部分传输序列(PTS)块划分及权重因子, 使其具有随机性^[57]。电域信号加密由于其处理方式灵活、易于实现而提高了物理层的安全性, 但信息加密对系统的影响研究还需深入, 以获得高保密及性能优越的保密接入方法。

不论是电域信号处理还是光域信号处理, 都可以增强 BAN 系统的物理层安全性。电域信息处理技术成熟、处理方式灵活及容易实现; 光域信息处理具有高速、并行及适用于全光接入等特点。目前电域及光域信号处理获得物理层安全性的新技术除了混沌扰乱、激光混沌技术外还有量子密钥分配技术。量子密钥分配基于量子力学的基本原理, 保证了发射端和接收端在密钥分配时无条件的安全性。量子密码以 Heisenberg 测不准原理(光子的偏振现象)和纠缠效应为物理基础, 利用光纤异地产生物理噪声。它真正地实现了一次一密码, 实现了理论上不可破译的密码体制。光子不能被克隆的性质使量子密码编码操作过程不能被完全窃听, 一旦存在窃听也可以察觉, 并能消除^[58]。基于量子密钥分配技术在 BAN 中的应用原理如图 3 所示, 量子密钥分配技术实现接收端和发送端密钥同步, 然后产生加密序列, 用户利用此加密序列在发送端对发送信号进行加密、在接收端对接收的信号进行加密^[59]。

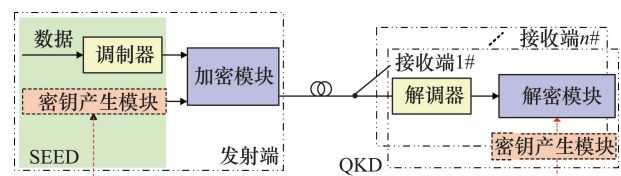


图3 基于量子密钥分配的BAN原理示意
Fig. 3 Schematic diagram of quantum key distribution-based BAN

综上所述, BAN 物理层保密性增强方法研究属于目前国际热点研究课题之一, 各种新加密技术不断引入。但不同加密方法在技术复杂度、有效性及时效性等方面各有优缺点, 因此基于新机制与技术的可靠、简单及低成本等特性的加密方法还有待深入研究。

2 接入网的低成本低能耗问题

BAN 系统被广泛应用的主要推动力之一在于其成本低廉。在一个多用户 PON/RoF 系统中,主要成本与能耗在于 ONU/基站(BS)端局,其端局配置直接影响到接入网系统的成本及能耗^[60-63]。另外,BAN 系统光源等也是构成系统成本的重要部分,如 WDM-PON 系统中的多波长光源。目前 BAN 系统降低成本与能耗方法包括集中光源技术和信号重调技术。

以 OFDM-PON 上行光源置于 OLT 为例,其实现机制如图 4(a)所示。在 OLT 中,上行光源输出的上行光载波和下行光 OFDM 信号由一个光合路器合为下行信号,然后通过光纤信道传输并由一个光分/合路器广播给各个 ONU。每个 ONU 用一个滤波器将上行光载波从接收的下行信号中分离出来,并将上行射频 OFDM 信号调制到上行光载波上,从而得到该 ONU 的上行光 OFDM 信号。来自不同 ONU 的上行光 OFDM 信号合为一束后传输到 OLT。ONU 不需要配备一个光源来产生上行光载波,而是将一个光源置于 OLT 供所有 ONU 共享。图 4(b)给出了 OFDM-PON 下行信号重调制技术原理,在 ONU 端,将下行信号分为两束,一束直接进行光电检测从

而恢复下行射频 OFDM 信号,另一束则被送入反射式调制器中。常见反射式调制器有反射式电吸收调制器(REAM)、反射式半导体光放大器(RSOA)和法布里-珀罗激光器(FP-LD)。在反射式调制器中,下行光载波上携带的下行 OFDM 信号被擦除,从而得到纯净的光载波,再将上行射频 OFDM 信号调制到纯净的光载波上,从而得到上行光 OFDM 信号。因此,ONU 并不需要一个光源产生上行光载波,也不需要 OLT 中配备一个光源供所有 ONU 共享,而是只需要在各个 ONU 中使用反射式调制器即可。

在传统直接探测 OFDMA-PON 系统中,OFDM 基带信号先上变频到射频(RF)再进行信号调制和链路传输。RF 上变频将在光载波信号和 OFDM 信号之间产生保护带,它能有效地抑制 OFDM 信号在传输与检测过程中受到的干扰。因此,每个 ONU 至少需要一个射频源来同时实现下行 RF OFDM 信号的下变频以及上行 OFDM 基带信号的上变频。降低 ONU 成本的有效方法之一,则是如何真正解决 ONU 的无源问题。基于可调光梳发生器(TCG)的无源 ONU 及低成本 OFDMA-PON 系统的原理及其对应节点部分结果如图 5 所示^[60]。

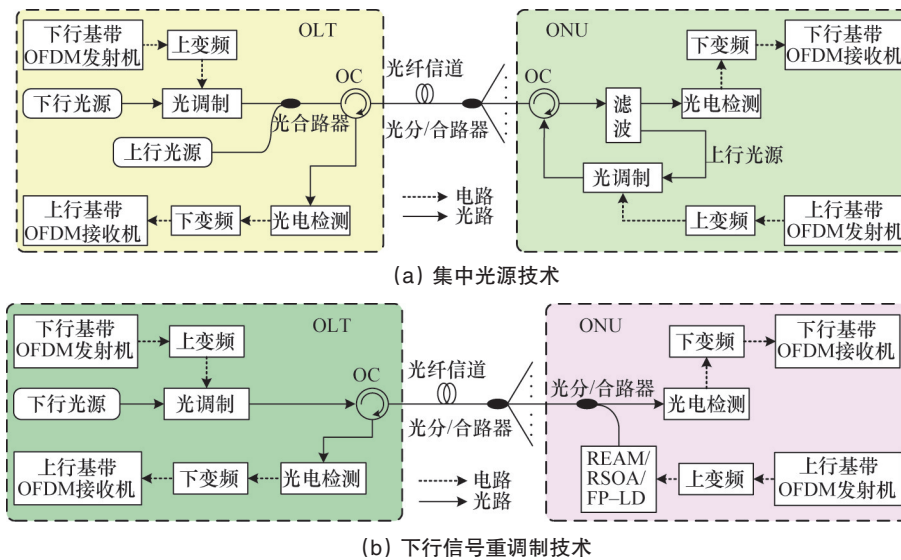


图 4 BAN 低成本低能耗处理方法示意

Fig. 4 Schematic diagram of BAN with cost-effective and low-energy consumption method

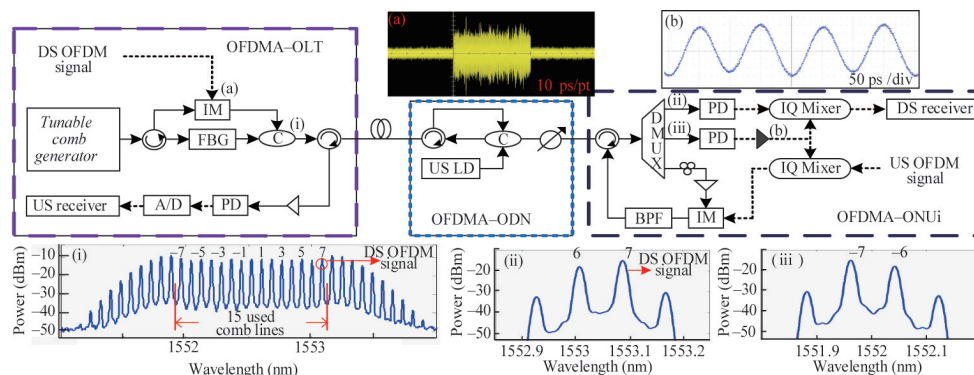


图 5 基于可调光梳发生器低成本低能耗的 OFDMA-PON 系统

Fig. 5 OFDMA-PON system with cost-effective and low-energy consumption using tunable optical comb generator

在 OLT 端, 一个 DFB 激光器作为 TCG 的连续波光源, 一个 RF 信号驱动级联在一起的相位调制器 (PM) 和强度调制器 (IM), 产生的光梳在 3 dB 功率波动范围内的光载波数目达到了 15 个, 如图 5(b) 所示。被反射回来的频率分量通过光循环器 (OC) 和偏振控制器 (PC) 后, 离线产生的基带 16-QAM OFDM 信号通过一个 IM 调制到该频率分量上。在 ONU 中, 通过阵列波导光栅 (AWG) 分别将上行光载波和两对用来拍频的频率分量滤取出来。光电二极管 (PD) 对两对频率分量进行拍频, 拍频得到射频源。其中两个频率分量没有调制数据, 通过光电二极管进行拍频后, 得到纯净射频源。获得的纯净射频源被用来同时对下行射频 OFDM 信号进行下变频处理以及对上行基带 16-QAM OFDM 信号进行上变频处理。来自 IM 和光带通滤波器 (BPF) 的上行 OFDM 信号被调制至上行光载波, 然后完成上行信号传输到 OLT。

基于偏振复用 (PolM) 技术实现 ONU 彻底无源, 既无光源又无射频源的 OFDM-PON 原理如图 6^[61] 所示。在 OLT 中, 激光器 LD1 输出一个连续波光载波, 一个光分束器将这个光载波分为两束, 每束光载波分别经过一个 PC 获得相互正交的两个偏振态。X 偏振态的光载波在 IM 中被频率为 f_c 的下行射频 OFDM 信号调制, 输出信号为一个双边带 OFDM 信号。Y 偏振态的光载波在另一个 IM 中被频率为 f_c 的纯净射频信号调制, 输出信号为一个纯净双边带信号。如图 6(a) 所示, X 偏振态上的双边带 OFDM 信号的左边带被滤除, 保留了携带

OFDM 信号的右边带和中心光载波, 从而得到频率间隔为 f_c 的单边带 OFDM 信号。图 6(b) 所示 Y 偏振态上纯净双边带信号的右边带被滤除, 保留了纯净的左边带和中心光载波, 从而得到频率间隔为 f_c 的纯净单边带信号。用一个偏振合束器 (PBC) 将 X 偏振态和 Y 偏振态的两路单边带信号合为一束, 如图 6(c) 所示。最后由激光器 LD2 输出连续波光载波经过一个 PC, 通过一个光合束器将该光载波与如图 6(c) 所示的信号合为一束, 从而得到如图 6(d) 所示的下行光信号。上行 OFDM 发射机中, 上行数据通过基带 OFDM 调制和数字模拟转换 (DAC) 后, 得到模拟的基带 OFDM 信号。下行产生频率为 f_c 的纯净射频信号对模拟基带 OFDM 信号进行上变频处理, 从而得到频率为 f_c 的上行射频 OFDM 信号。

基于半导体光放大器 (SOA) 中四波混频 (FWM) 效应实现 ONU 彻底无光源和无射频源的 OFDM-PON 原理如图 7^[62] 所示。在 OLT 中, 激光器 LD 输出一个连续波光载波, 在 IM 中一个纯净射频信号实现光载波抑制 (OCS) 调制, 得到如图 7(a) 所示 OCS 双边带信号。通过控制 SOA 的注入电流使其在 SOA 中发生 FWM 效应, 从而在原信号两侧生成两个二阶边带, SOA 输出的 FWM 信号如图 7(b) 所示。用一个 OC 和一个光纤布拉格光栅 (FBG) 将 FWM 信号的右侧二阶边带反射回去, 利用 OC 将其导入一个 IM 中, 而让剩下的信号直接通过 FBG。进入 IM 的右侧二阶边带被下行基带 OFDM 信号所调制, 得到的光 OFDM 信号再与直接通过 FBG 的剩余信号合

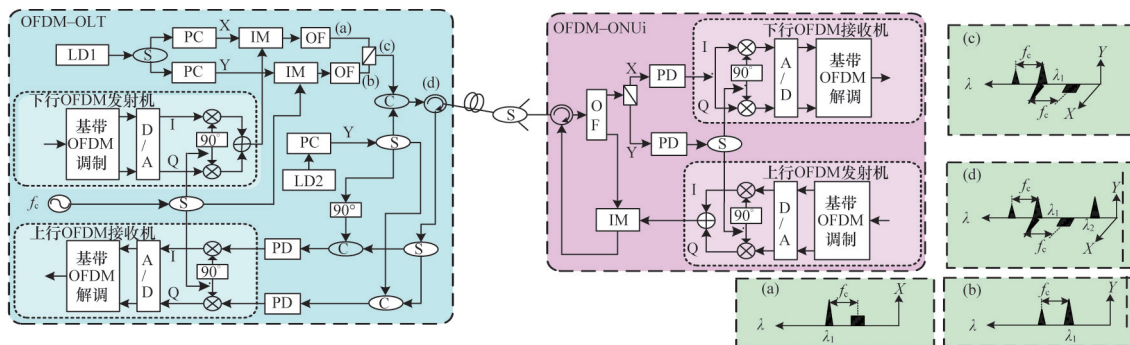


图 6 基于偏振复用技术实现 ONU 彻底无源的 OFDM-PON

Fig. 6 OFDM-PON using polarization multiplexing technology to achieve completely-passive ONU

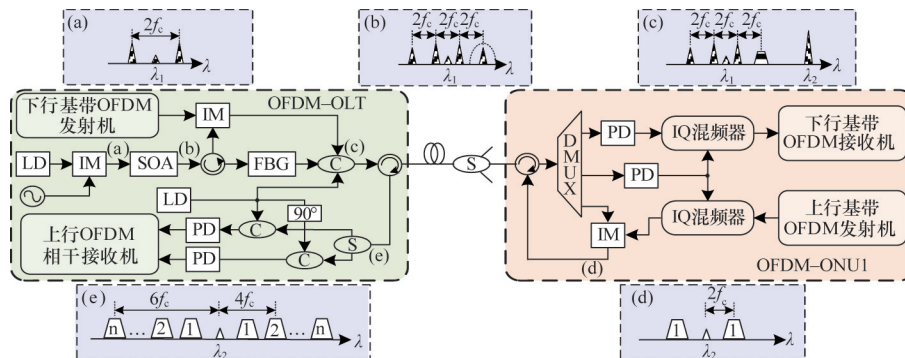


图 7 基于 SOA 的 FWM 效应实现 ONU 彻底无源的 OFDM-PON

Fig. 7 OFDM-PON using four-wave mixing in SOA technology to achieve completely-passive ONU

束,同时另一个LD输出光载波也与上述两路信号合到一起,从而得到所要传输的下行信号,如图7(c)所示。上行OFDM发射机产生的上行基带OFDM信号,可以在另一个IQ混频器中同样利用拍频得到纯净射频信号进行上变频处理,从而得到上行射频OFDM信号。上行光载波在IM中被上行射频OFDM信号调制,得到ONU1的上行OCS双边带信号,如图7(d)所示。下行光信号通过一个OC后进入光纤,经过光纤传输通过光分束器,每一束分别进入一个ONU。

多光源是导致WDM-OFDM光纤无线接入系统成本较高的主要原因。TCG能提供平坦性高和可扩展性好的光频梳,以此替换混合WDM-OFDM光纤无线接入系统多波长光源,将有效降低系统成本^[64]。

图8显示了基于TCG的光纤无线融合低成本WDM-OFDM接入系统。TCG包括一个DFB激光器、射频源、PM和两个单臂无啁啾IM。电调谐放大器(TEA)控制PM输入信号电压实现动态控制TCG^[60]。移相器(PS)调整IM输入信号的相位,则TCG输出光频梳可表示为

$$E(t) = \frac{E_c}{4} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \{ J_n(m_{PM}\pi) + 2 \exp(j\beta) J_n[(m_{PM} + m_{IM})\pi] + \exp(j2\beta) J_n[(m_{PM} + 2m_{IM})\pi] \} j^n \exp[j(\omega_c + n\omega)t] \quad (1)$$

其中, E_c 为输出光载波的振幅, m_{PM} 和 m_{IM} 分别为PM和IM的调制指数, β 为IM的归一化直流偏置电压, ω_c 和 ω 分别为输出光载波角频率和射频源角频率。由TCG产生17个频率分量平坦的光频梳,如图8所示。OFDM信号在另一个IM上通过双边带(DSB)调制到光频梳上,光纤信道传输后由AWG将WDM-DSB信号分成17个独立的信道。对于第一个信道 CH_1 ,DSB信号的左边带被FBG反射传输到光电二极管PD进行有线基带OFDM基带信号接收,同时传输信号被发送至PD进行无线OFDM信号接收。

解决BAN系统中ONU无源是降低其系统成本及能耗的有效思路之一,BAN中不同技术的无源ONU技术方法各有优劣与特色。表1给出了基于不同ONU无源解决方案的部分OFDM-PON系统成本分析,表2给出了BAN中基于PolM、FWM和TCG技术实现无源ONU的技术比较。

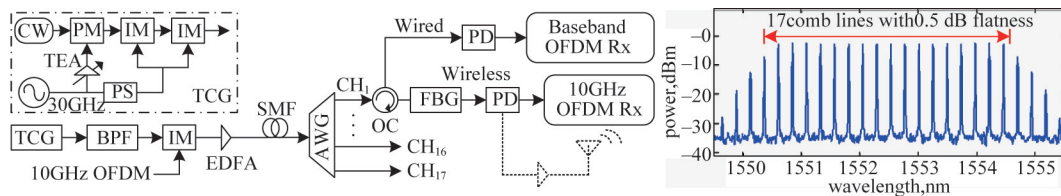


图8 基于可调光梳发生器的光纤无线融合低成本WDM-OFDM接入系统

Fig. 8 Cost-effective WDM-OFDM based fiber-wireless access system using tunable optical comb generator

表1 2种不同ONU结构下OFDM-PON的成本分析

Table 1 Cost analysis of OFDM-PON for two different ONU structures

结构	信号源成本	其他额外成本	总体成本
传统ONU无源的OFDM-PON	ONU无需光源,但至少需要一个射频源。当用户较多时,需要较多频率不同的射频源,且所需频率较高	无	高频射频源难以购买且价格极为昂贵,总体成本较高
ONU彻底无源的OFDM-PON	ONU彻底无源,既无需光源,也无需射频源	ONU额外需要一个光电探测器和一个低噪声电放大器	虽然引入额外成本,但无需昂贵的高频射频源,总体成本较低

表2 3种不同方案的优势与不足

Table 2 Comparison of advantages and disadvantages of three different schemes

方案	优势	不足
PolM技术	实现ONU彻底无源,降低OFDM-PON系统总体成本;频谱利用率高,系统容量大	偏振控制相对复杂;只能在ONU端产生单一固定频率的射频源,不适用于多用户OFDM-PON系统
SOA中的FWM效应	实现ONU彻底无源,降低OFDM-PON系统总体成本;易集成,有一定的扩展能力	转换效率有限;只能在ONU端产生少量多频射频源,仅适用于用户较少的OFDM-PON系统
基于级联光调制器TCG技术	实现ONU彻底无源,降低OFDM-PON系统总体成本;扩展能力好,可以在ONU端产生所需数目的多频射频源,适用于用户数目较多的OFDM-PON系统	需要对光梳发生器进行精确的控制来保证光梳的稳定性;ONU端需要相对复杂的波长解复用器

3 接入网的融合与兼容性问题

随着BAN的接入技术、传输速率与复用方式等的发展,其带宽需求急剧上升、接入灵活性要求提高。因此,独立的城域网与接入网、分离的光纤与无线接入体制提供的带宽、灵活性已经无法满足BAN的发展需求。为了实现这个目的,一种直接的解决方法是增加波长和相应光学设备,或对现有城域网和接入网、光纤与无线接入网系统设备进行升级,但系统成本较高且兼容性差。由于城域网和BAN、光纤与无线接入独立模式的网络设计复杂、大量有源设备、维护代码、高能耗及重复建设使运营成本及系统能耗增加,因此将光纤无线接入融合、城域接入融合是必然发展趋势。

随着高清电视(HDTV)、3D视频和远程医疗无压缩高清视频影像等无线接入需求,光纤与无线融合接入无疑是未来BAN的发展方向。无线接入的演进如图9所示,如果实现无线传输速率突破Gbit/s,就需要携带高速数据的高频载波,如60 GHz甚至更高的毫米波^[65]。目前60 GHz毫米波波段的RoF系统是研究主流,IEEE 802.15.3c已经确定采用60 GHz载波附近7 GHz的带宽,用于室内短距无线宽带接入。另一方面,其他毫米波段例如E波段、F波段、甚至300 GHz波段的RoF系统也陆续有报道。研究人员利用60 GHz的RoF系统,通过最小均方(LMS)均衡器实验传输了5 Gbit/s数据信号^[66]。研究了基于偏移四相相移键控(OQPSK)的60/120 GHz混合双向OFDMA-PON光纤无线通信系统,传输了10 Gbit/s有线数据信号和5 Gbit/s无线数据信号^[67]。报道了双波长光

子集成电路设计与光外差技术实现毫米波信号产生,验证了1 Gbit/s无线数据传输^[68]。光子信号处理已被认为是克服固有的电子速度限制的一种解决方案。报道了基于InP-In-GaAsP可重构光子集成信号处理器,该光子信号处理器能够实现可重构信号处理如时间积分、时间微分和希尔伯特变换,通过控制注入处理器的电流实现可重构特性^[69]。目前研究人员进一步扩展光载无线通信系统的载波频率至240 GHz甚至更高频段^[70]。为了适应现有不同调制格式的无线信号,60 GHz光载无线链路分为单载波调制和多载波调制。研究发现光纤无线通信链路的非一致性对60 GHz单载波调制系统影响大,而链路线性度对多载波调制系统影响大。在保证下行链路传输性能条件下,充分有效利用下行链路的载波作为上行链路重新利用,且最大限度地简化基站配置,以及提高接入容量和拓扑优化也是研究热点问题。

光纤无线融合与兼容性及其相关技术研究备受关^[71-74]。基于PoIM的低成本光纤无线通信RoF系统如图10所示,在OLT端光源LD₁分成两个分支,一分支通过IM₁进行OCS调制产生两个一阶边带光载波,再通过PC调整信号的偏振状态到Pol-X;另一路分支输入IM₂调制非归零(NRZ)数据从而产生有线信号。激光器LD₂和LD₃输出信号输入IM₃和另一路基带NRZ数据进行调制从而产生两个无线信号。有线信号和两个无线信号通过PC调整到偏振态Pol-Y。偏振合束器将Pol-X和Pol-Y结合在一起生成偏振复用信号,偏振复用信号作为SOA的输入实现FWM产生新的无线信号。ONU中偏振

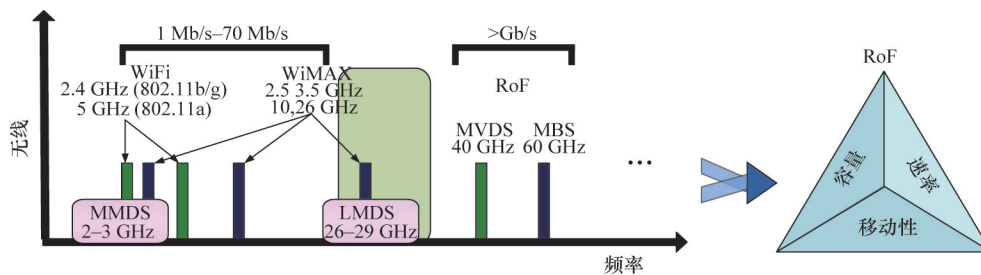


图9 无线接入到光纤无线接入的演进

Fig. 9 Evolution of wireless access to optical fiber wireless access

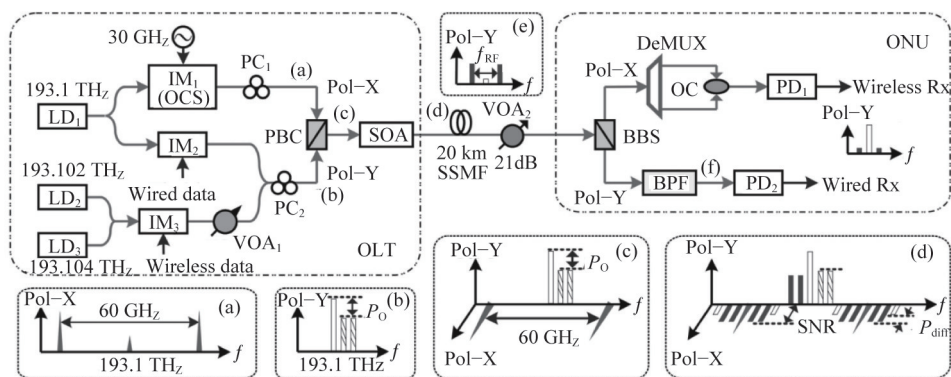


图10 基于PoIM的FWM光纤无线融合接入网系统

Fig. 10 Optical fiber wireless access network system with PoIM-based FWM

分束器将信号分为Pol-X和Pol-Y两个偏振方向,在Pol-X偏振方向上,解复用器提取出两个具有特定频率间隔 f_m 的无线信号,然后两路无线信号通过光合路器由光电二极管PD拍频产生多频毫米波信号。

基于SOA-FWM多频多业务RoF系统原理如图11^[73]所示,实现多业务多频毫米波信号的产生与传输,有效运用于多种场合的区域,支持区域性多业务通信。一个基站组(BSG)中各个基站BS所需频率及业务的波长分配由一个远端节点(RN)控制,向基站BS提供单业务单频率或多业务多频率的毫米波信号,实现该系统对不同场合下用户多样化业务需求

的支持。该RoF系统结构是一个分级系统,由多个BSG组成。在中心站(CS)端,使用一个光耦合器将多组承载了不同业务的原始信号光和一个纯净的泵浦光合到一起,通过SOA的FWM作用在泵浦光右侧生成多组新光信号。在远端节点端,下行光信号被一个解复用器分解为多个波长不同的光信号,然后根据对应基站组中不同的BS要求,分配给各个BS所需业务及毫米波频率对应的光波长组,传输到对应基站组的各个BS,对于所需功能单一化的应用,则提供单频单业务的毫米波信号。

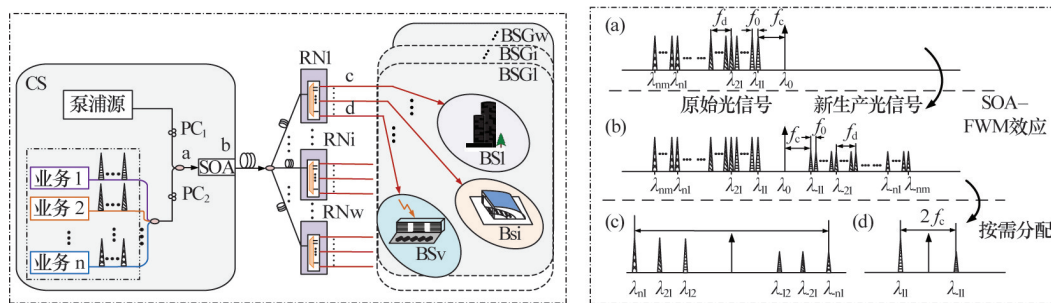


图 11 基于SOA-FWM的多频多业务RoF系统原理

Fig. 11 Multiple-frequency and multiple-service RoF system using FWM in SOA

由于BAN的发展速度十分迅猛,接入速率从1 Gbit/s发展到10 Gbit/s甚至更高,复用方式从TDM到WDM、OFDM等及其混合复用,其发展日趋成熟。由于接入网的传输距离短,结合多种复用技术扩展PON的传输距离使接入网可直接连接到骨干网,从而实现城域接入融合,这也是目前研究热点之一。长距离无源光网络(LR-PON)利用光放大器和WDM技术将PON的覆盖范围从20 km延伸到100 km及以上,其通常结构是距离延伸的共享光纤连接CO和本地用户交换,分光器连接用户到共享光纤^[75]。与传统PON相比,LR-PON合并了多个光线路终端OLT和CO,减少了相应的网络运营成本(OpEx)。超大无源光网络(XL-PON)是探索完全灵活和融合长距离、高速接入和城域网的优选方案之一。LR-PON由光链路终端OLT、光网络终端(ONT)和城域接入节点(MAP)的中间部分组成,其基本结构是城域WDM馈线环连接多个MAP,每个MAP使用一个特定波长^[76]。XL-PON的关键特点是传输距离长、上下行速率高与支持广域更多用户。在上行方向,ONU将数据送入到MAP,数据经过光电转换后通过城域WDM环将数据送回OLT,但XL-PON存在结构复杂、需要光电转换等缺点。

鉴于TDM/WDM混合光接入网的优势及城域网和接入网系统急需升级的迫切需求,城域接入环形融合网络(MARIN)能有效扩展整个网络带宽需求和促进用户端资源共享^[77-78]。MARIN基本架构、光学可重构和波长转换设备都分布于连接两个环网的节点之上,具有高集成、可扩展性与资源共享等特点,但存在结构复杂、系统受光纤色散影响比较严重等不足。基于OFDMA动态子载波分配和功率分配的城域接入融

合网络如图12所示,采用环型与树型结合的拓扑结构,利用OFDM子载波进行信号的传输和动态分配,跨越了城域范围,实现城域与接入的有效融合,从而简化网络结构,提高网络集成化程度^[77]。用户业务的分配是通过OFDM信号子带的动态分配来实现的,首先中心局(CO)将下行OFDM信号分成多个正交子带,每个子带都包含多个相互正交的子载波。按用户需求可以灵活地选取所需子带的数量,也可以选择所需某个特定的子带,由于每个子带包含的子载波数目不一样,从而支持不同速率的接入。因此,通过这种方式不仅可以实现资源的动态分配,还能实现可变速率接入。基于偏振间插多带OFDM的城域接入融合网络的结构也受到广泛关注^[79]。如图12所示,CO将来自核心网络的信号转换为子带间插的单边带光OFDM信号、Y偏振态传输下行信号和X偏振态传输

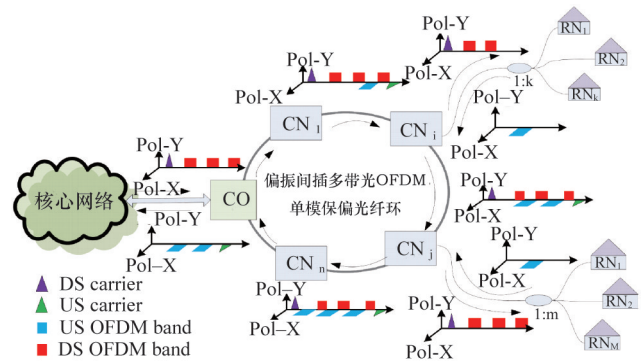


图 12 基于偏振间插多带OFDM的城域接入融合网络结构
Fig. 12 OFDM-based metro-access integrated network using polarization interleaver multiple-band multiplexing

上行信号。当信号经过保偏光纤传输到达中心节点(CN)后, CN就利用ROADM对信号进行上传和下载。CN₁上载上行的光载波实现RN_s的无源特性,而在其他CN_s中只需要上传上行信号而不再需要上传上行的光载波。最后在CN_n中,所有上行信号传向CO,而不包含下行信号。另外,基于软件定义网络(SDN)城域接入融合网络研究得到了国内外的广泛关注^[80-83],其网络设备控制面与数据面分离开来的通信模式得到众多研究者和网络运营商的认同。2015年召开的第17届透明光网络国际会议上,报道了SDN的低能耗光接入和城域一体化网络^[84];《Optical Fiber Technology》杂志发表了下一代城域接入一体化网络的SDN研究结果^[85]。但从SDN城域接入一体化网络的研究报道看,目前其研究主体仅限于SDN的实现方法及其资源的动态分配上,尚难以满足已有的城域接入一体化网络的多种应用需求。

因此,BAN的城域接入融合、有线无线融合、多种复用技术与体制协议的兼容及其BAN网络设计、关键光电子模块等核心技术研究受到了国际学术界及工业界的广泛关注。这些共性问题对促进BAN技术工程应用及升级尤为重要,最近其新方案与研究结果频繁报道,但其技术对系统性能稳定性及鲁棒性的影响、技术复杂度与成本等亟待深入研究。

4 结论

结合国际同行及本研究组对BAN理论与技术的研究和分析,归纳了BAN技术发展的主流方向及其关键技术问题。综述了BAN系统在保密性、私有性及性能改善,低成本、低能耗及网络架构优化,光纤无线融合、城域接入融合及多业务兼容等方向的国际研究成果。

参考文献(References)

- [1] Nessel D. NG-PON2 technology and standards[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(5): 1136-1143.
- [2] Cvijetic N, Cvijetic M, Huang M F, et al. Terabit optical access networks based on WDM-OFDMA-PON[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 493-503.
- [3] Morosi J, Hoxha J, Martelli P, et al. 25 Gbit/s per user coherent all-optical OFDM for Tbit/s-capable PONs[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2016, 8(4): 190-195.
- [4] Horvath T, Malina L, Munster P. On security in Gigabit passive optical networks[C]//International Workshop on Fiber Optics in Access Network (FOAN). Brno: IEEE, 2015: 51-55.
- [5] Zhang L J, Xin X J, Liu B, et al. Physical-enhanced secure strategy in an OFDM-PON[J]. Optics Express, 2012, 20(3): 2255-2265.
- [6] Wang Q K, Tse K H, Chen L K, et al. Physical-layer network coding for VPN in TDM-PON[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(23): 2166-2168.
- [7] Zhang Q Y, Zhang C F, Jin W, et al. Enabled scalable and privacy WDM-RoF system based on optical virtual private networks[J]. Optical Engineering, 2014, 53(6): 066105.
- [8] Chow C W, Yeh C H, Wang C H, et al. Demonstration of signal remodulation long reach carrier distributed passive optical network using OFDM-QAM signal[C]//35th European Conference on Optical Communication. Vienna, Austria: VDE VERLAG, 2009: Paper 8.5.2.
- [9] Zhang C F, Xiao N W, Chen C, et al. Energy-efficient orthogonal frequency division multiplexing-based passive optical network based on adaptive sleep-mode control and dynamic bandwidth allocation[J]. Optical Engineering, 2016, 55(2): 026108-026108.
- [10] Wei J L, Hugues-Salas E, Giddings R P, et al. Wavelength reused bi-directional transmission of adaptively modulated optical OFDM signals in WDM-PONs incorporating SOA and RSOA intensity modulators[J]. Optics Express, 2010, 18(10): 9791-9808.
- [11] Giddings R P, Hugues-Salas E, Jin X Q, et al. Colourless real-time optical OFDM end-to-end transmission at 7.5 Gb/s over 25 km SSMF using 1 GHz RSOAs for WDM-PONs[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC), San Diego, CA: OSA, 2010: OMS4.
- [12] Hugues-Salas E, Giddings R P, Jin X Q, et al. REAM intensity modulator-enabled 10 Gb/s colorless upstream transmission of real-time optical OFDM signals in a single-fiber-based bidirectional PON architecture[J]. Optics Express, 2012, 20(19): 21089-21100.
- [13] Liu B, Xin X J, Zhang L J, et al. Performance investigation and demonstration of colorless upstream transmission in ECDM-OFDM-PON[J]. Optics Express, 2011, 19(15): 14542-14548.
- [14] Ruffini M. Metro-access network convergence[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC), Anaheim, CA, USA: OSA, 2016: Th4B.1.
- [15] Sauer M, Kobayakov A, George J. Radio over fiber for picocellular network architectures[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(11): 3301-3320.
- [16] Yeh C, Chow C, Wu Y, et al. Performance of long-reach passive access networks using injection-locked Fabry-Perot laser diodes with finite front-facet reflectivities[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(12): 1929-1934.
- [17] Xiang Y, Chen C, Zhang C F, et al. Wired wireless access integrated RoF-PON with scalable generation of multi-frequency MMWs enabled by polarization multiplexed FWM in SOA[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 1218-1225.
- [18] Shaneman K, Gray S. Optical network security: Technical analysis of fiber tapping mechanisms and methods for detection & prevention[C]//Military Communications Conference (MILCOM). Monterey, California, USA: IEEE, 2004: 711-716.
- [19] Fok M P, Wang Z, Deng Y, et al. Optical layer security in fiber-optic networks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2011, 6(3): 725-736.
- [20] Wu B B, Narimanov E. A method for secure communications over a public fiber-optical network[J]. Optics Express, 2006, 14(9): 3738-3751.
- [21] Mendonca C, Lima M, Teixeira A. Security issues due to reflection in PON physical medium[C]//14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Coventry, England: IEEE, 2012: 1-4.
- [22] Telecommunication Standardization Sector of ITU. ITU-T G.983 B-PON[S]. Geneva, Switzerland: ITU, 2005. Telecommunication Standardization Sector of ITU. ITU-T G.984 G-PON[S]. Geneva, Switzerland: ITU, 2004.
- [23] IEEE 802.3 Ethernet Working Group. IEEE P802.3ah ethernet in the first mile[S/OL]. (2004-09-10)[2016-8-16]. <http://www.ieee802.org/3/>.
- [24] Wang Z, Fok M P, Prucnal P R. Physical encoding in optical layer security[J]. Journal of Cyber Security and Mobility, 2012, 83(100): 83-100.
- [25] Cincotti G, Wada N, Kitayama K. Secure optical bit-and block-cipher transmission using a single multiport encoder/decoder[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC). San Diego, CA, USA: OSA, 2008, 277-279.
- [26] Thomas S, Wagner D. Insecurity in ATM-based passive optical networks[C]//IEEE International Conference on Communications. New

- York: IEEE, 2002: 2803–2805.
- [27] Effenberger F, Clearly D, Haran O, et al. An introduction to PON technologies [Topics in Optical Communications][J]. IEEE Communications Magazine, 2007, 45(3): S17–S25.
- [28] Callaway E, Gorday P, Hester L, et al. Home networking with IEEE 802.15.4: A developing standard for low-rate wireless personal area networks[J]. IEEE Communications magazine, 2002, 40(8): 70–77.
- [29] Kazovsky L G, Wong S W, Gudla V, et al. Challenges in next-generation optical access networks: Addressing reach extension and security weaknesses[J]. IET Optoelectronics, 2011, 5(4): 133–143.
- [30] Teixeira A, Vieira A, Andrade J, et al. Security issues in optical networks physical layer[C]//Transparent Optical Networks (ICTON). Athens, Greece: IEEE, 2008: 123–126.
- [31] Prucnal P R, Fok M P, Deng Y, et al. Physical layer security in fiber-optic networks using optical signal processing[C]//Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP). Shanghai: SPIE, 2009: 1–10.
- [32] Zhang C F, Qiu K. Experimental demonstration and analysis of security-improved optical code division multiple access networks using multiple-group optical orthogonal codes[J]. Optical Engineering, 2010, 48(10): 105005–105005.
- [33] Seleem H, Bentrchia A, Fathallah H. A projected parallel interference cancellation for asynchronous upstream OCDMA-PON[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(11): 1721–1724.
- [34] Romero-Zurita N, McLernon D, Ghogho M, et al. PHY layer security based on protected zone and artificial noise[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(5): 487–490.
- [35] Cincotti G, Sacchieri V, Manzacca G, et al. Physical layer security: All-optical cryptography in access networks[C]//International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Athens, Greece: IEEE, 2008: 127–130.
- [36] Hong X, Wang D, Xu L, et al. Demonstration of optical steganography transmission using temporal phase coded optical signals with spectral notch filtering[J]. Optics Express, 2010, 18(12): 12415–12420.
- [37] Zhang C F, Chen C, Zhang W, et al. Inter-BSs virtual private network for privacy and security enhanced 60 GHz radio-over-fiber system[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(3): 236–241.
- [38] Jin W, Zhang C F, Chen C, et al. Scalable and reconfigurable all-optical VPN for OFDM-based metro-access integrated network[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(2): 318–325.
- [39] Wang Q, Tse K H, Chen L K, et al. Physical-layer network coding for VPN in TDM-PON[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(23): 2166–2168.
- [40] Su Y K, Tian Y, Wong E, et al. All-optical virtual private network in passive optical networks[J]. Laser & Photonics Reviews, 2008, 2(6): 460–479.
- [41] Zhang C F, Huang J, Chen C, et al. All-optical virtual private network and ONUS communication in optical OFDM-based PON system [J]. Optics Express, 2011, 19(24): 24816–24821.
- [42] Argyris A, Syvridis D, Larger L, et al. Chaos-based communication at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. Nature, 2005, 438(7066): 343–344.
- [43] Jiang N, Zhang C F, Qiu K. Secure passive optical network based on chaos synchronization[J]. Optics Letters, 2012, 37(21): 4501–4503.
- [44] Jiang N, Liu D, Zhang C F, et al. Modeling and simulation of chaos-based security-enhanced WDM-PON[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(19): 1912–1915.
- [45] Larger L, Pesquera L, Nguimdo R M, et al. Digital key for chaos communication performing time delay concealment[J]. Physical Review Letters, 2011, 107(3): 034103.
- [46] Cheng M, Deng L, Gao X, et al. Security enhanced OFDM-PON using hybrid chaotic system[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(3): 326–329.
- [47] Alvarez G, Li S. Some basic cryptographic requirements for chaos-based cryptosystems[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2006, 16(8): 2129–2151.
- [48] Zhang L, Xin X, Liu B, et al. Secure OFDM-PON based on chaos scrambling[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(14): 998–1000.
- [49] Zhang W, Zhang C F, Chen C, et al. Joint PAPR reduction and physical layer security enhancement in OFDMA-PON[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(9): 998–1001.
- [50] Zhang L J, Liu B, Xin X J, et al. Theory and performance analyses in secure CO-OFDM transmission system based on two-dimensional permutation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(1): 74–80.
- [51] Jin W, Zhang C F, Zhang W, et al. Physically secured orthogonal frequency division multiplexing-passive optical network employing noise-based encryption and signal recovery process[J]. Optical Engineering, 2016, 55(2): 026103.
- [52] Zhang L J, Liu B, Xin X J. Secure optical generalized filter bank multi-carrier system based on cubic constellation masked method[J]. Optics Letters, 2015, 40(12): 2711–2714.
- [53] Zhang L J, Liu B, Xin X J. Secure coherent optical multi-carrier system with four-dimensional modulation space and Stokes vector scrambling[J]. Optics Letters, 2015, 40(12): 2858–2861.
- [54] Deng L, Cheng M, Wang X, et al. Secure OFDM-PON system based on chaos and fractional fourier transform techniques[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(15): 2629–2635.
- [55] Cheng M, Deng L, Wang X, et al. Enhanced secure strategy for OFDM-PON system by using hyperchaotic system and fractional fourier transformation[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(6): 1–9.
- [56] Zhang W, Zhang C F, Jin W, et al. Chaos coding-based QAM IQ-encryption for improved security in OFDMA-PON[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(19): 1964–1967.
- [57] Hu X, Yang X, Shen Z, et al. Chaos-based partial transmit sequence technique for physical layer security in OFDM-PON[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(23): 2429–2432.
- [58] Korzh B, Lim C C W, Houlmann R, et al. Provably secure and practical quantum key distribution over 307 km of optical fibre[J]. Nature Photonics, 2015, 9(3): 163–168.
- [59] Choi I, Young R J, Townsend P D. Quantum key distribution on a 10 Gb/s WDM-PON[J]. Optics Express, 2010, 18(6): 9600–9612.
- [60] Chen C, Zhang C F, Liu D M, et al. Tunable optical frequency comb enabled scalable and cost-effective multiuser orthogonal frequency-division multiple access passive optical network with source-free optical network units[J]. Optics Letters, 2012, 37(19): 3954–3956.
- [61] Zhang C F, Chen C, Feng Y, et al. Experimental demonstration of novel source-free ONUS in the bidirectional RF up-converted optical OFDM-PON utilizing polarization multiplexing[J]. Optics Express, 2012, 21(6): 6230–6235.
- [62] Chen C, Zhang C F, Feng Y, et al. Bidirectional radio frequency up-converted orthogonal frequency division multiple access passive optical network with novel source-free optical network units using four-wave mixing in semiconductor optical amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(24): 2206–2209.
- [63] Zhang C F, Feng Y, Chen C, et al. Full-duplex radio-over-fiber system with novel source-free base station using polarization multiplexing [J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(11): 814–818.
- [64] Chen C, Zhang C F, Zhang W, et al. Hybrid WDM-OFDMA-PON utilizing tunable generation of flat optical comb[J]. Electronics Letters, 2013, 49(4): 276–277.
- [65] Zhang C F, Zhang Q Y, Wang Y, et al. Proposal for 60 GHz wireless

- transceiver for the radio over fiber system[J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, 56(2): 146-150.
- [66] Liu S, Shen G S, Tian H P. A 60-GHz RoF system employing variable step size LMS equalizer with fast convergence speed[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC). Anaheim, CA, USA: OSA, 2016: Th2A.18.
- [67] Zhang C F, Chen C, Qiu K. Hybrid bidirectional radio-over-fiber-based orthogonal frequency division multiple access-passive optical network supporting 60/120 GHz using offset quadrature phase shift keying[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(9): 096108.
- [68] Carpintero G, Guzman R C, Gordon C, et al. Photonic-enabled millimeter-wave F-band wireless link using photonic integrated circuits [C]//European Conference on Networks and Optical Communications (ECNOC). London: IEEE, 2015, 1-4.
- [69] Liu W L, Li M, Guzzon R S, et al. A fully reconfigurable photonic integrated signal processor[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(3): 190-196.
- [70] Seeds A J, Shams H, Fice M J, et al. TeraHertz photonics for Wireless communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(3): 579-587.
- [71] Xiang Y, Jiang N, Chen C, et al. Wired/wireless access integrated RoF-PON with scalable generation of multi-frequency MMWs enabled by tunable optical frequency comb[J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 19762-19767.
- [72] Zhang C F, Wang L Y, Qiu K. Proposal for all-optical generation of multiple-frequency millimeter-wave signals for RoF system with multiple base stations using FWM in SOA[J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 13957-13962.
- [73] Zhang Q Y, Zhang C F, Chen C, et al. Multi-service access radio-over-fiber system with multiple base-station groups enabled by scalable generation of multi-frequency MMWs[J]. *Optics Communications*, 2014, 324: 120-126.
- [74] Zhang C F, Chen C, Jin W, et al. Recent progress in broadband optical access networks at UESTC[J]. *Acta Photonica sinica*, 2014, 43(Suppl 1): 0106001.
- [75] Alves T M F, Morant M, Cartaxo A V, et al. Transmission of OFDM wired-wireless quintuple-play services along WDM LR-PONs using centralized broadband impairment compensation[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 13748-13761.
- [76] Rasztoivits-Wiech M, Stadler A, Gianordoli S, et al. 10/2.5 Gbps demonstration in extra-large PON prototype [C]//European Conference and Exhibition of Optical Communication (ECOC). Berlin, Germany: VDE VERLAG, 2007: 1-2.
- [77] Zhang C F, Zhang Q L, Chen C, et al. Metro-access integrated network based on optical OFDMA with dynamic sub-carrier allocation and power distribution[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 2474-2479.
- [78] Ziaie S, Muga N J, Guiomar F P, et al. Experimental assessment of the adaptive stokes space-based polarization demultiplexing for optical metro and access networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(23): 4968-4974.
- [79] Zhang C F, Jin W, Chen C, et al. Polarization multiplexed OFDM band interleaving enabled spectral efficient ROADMs for metro-access integrated networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(2): 130-136.
- [80] Jin W, Duan X, Dong Y X, et al. DSP-enabled flexible ROADMs without optical filters and O-E-O conversions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(19): 4124-4131.
- [81] Kuklinski F. Programmable management framework for evolved SDN [C]//2014 IEEE Network Operations and Management Symposium (NOMS). Krakow: IEEE, 2014, 1-8.
- [82] Woesner H, Fritzsche D. SDN and OpenFlow for converged access/aggregation networks[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC). Anaheim, CA, USA: OSA, 2013: 1-3.
- [83] Cvijetic N, Tanaka A, Ji P N, et al. SDN and OpenFlow for dynamic flex-grid optical access and aggregation networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(4): 864-870.
- [84] Valcarengi L, Kondepu K, Sgambelluri A, et al. Experimenting the integration of green optical access and metro networks based on SDN[C]//2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Budapest: IEEE, 2015: 1-4.
- [85] Ruffini M, Slyne F, Bluemm C, et al. Software defined networking for next generation converged metro-access networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 26(A): 31-41.

Key technologies and recent progress of broadband access networks

ZHANG Chongfu¹, CHEN Chen², ZHANG Wei¹, QIU Kun¹, YUAN Weicheng¹, YAN Yangyang¹

1. Key Lab of Optical Fiber Sensing and Communication Networks, Ministry of Education; School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China
2. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, 639798, Singapore

Abstract Broadband communication networks include both high-speed optical fiber transmission backbone networks and broadband access networks (BAN), but developments of the two kinds of networks are very uneven. Particularly, several challenges of BAN such as speed and bandwidth, security and privacy, cost-effectiveness, energy consumption and integration need to be addressed. In this paper, according to the international research reports, a brief overview of the research progress of BAN is presented, and the trend in technology development and key issues of BAN are indicated. At last, the security and privacy enhancement, the cost reduction, the integration and compatibility improvement of BAN are summarized and discussed.

Keywords broadband access networks; access network integration; optical communication; passive optical network

(编辑 王志敏)