

文章编号: 0258-7025(2009)09-2213-21

太赫兹通信技术的研究与展望

姚建铨^{1,4} 迟楠² 杨鹏飞¹ 崔海霞³ 汪静丽¹ 李九生¹ 徐德刚¹ 丁欣¹

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; ² 复旦大学信息科学与工程学院通信科学与工程系, 上海 200433)
³ 长春理工大学光电信息学院, 吉林 长春 130022; ⁴ 华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 太赫兹通信是一个极具应用前景的技术,太赫兹波有非常宽的还没分配的频带,并且具有传输速率高、方向性好、安全性高、散射小及穿透性好等许多特性。发展太赫兹通信技术已成为各发达国家研究的热点。该文分析了国内外太赫兹通信的研究情况;以太赫兹通信系统的整体框架,全面地介绍和分析了太赫兹通信的一些关键技术和最新研究成果;同时,对太赫兹的技术发展趋势和应用前景做了展望,提出了太赫兹技术的发展战略。

关键词 太赫兹波; 太赫兹通信系统; 高速短距离无线互联通信; 太赫兹空间通信

中图分类号 TN911 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2213

Study and Outlook of Terahertz Communication Technology

Yao Jianquan^{1,4} Chi Nan² Yang Pengfei¹ Cui Haixia³ Wang Jingli¹

Li Jiusheng¹ Xu Degang¹ Ding Xin¹

¹ College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjing University, Tianjing 300072, China

² Information Science and Engineering Department, School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China

³ College of Optical and Electronical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

⁴ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Terahertz technology has great potential application; terahertz wave has broad-band which isn't occupied. It has following features: higher data transfer rate, good direction, higher safety, lower scatter, higher transmittance and so on. Terahertz technology is becoming a research focus in communication field in developed countries. The paper introduces several key technologies and analyses latest achievement, basing on the framework of terahertz communication. At the same time, the paper foretells developing trend and application prospect and put forward the terahertz development strategy.

Key words terahertz wave; terahertz communication system; short distance wireless communication with high repetition rate; terahertz space communication

1 引言

1.1 背景

太赫兹 (THz) 波是电磁频率在 0.1~10 THz (波长在 3 mm~30 μm) 之间的电磁波, 波段介于微波与远红外光之间, 如图 1 所示。THz 波的长波段与亚毫米波重合, 其发展主要依靠电子学技术; 短波

段与红外线重合, 发展主要依靠光子学技术。THz 波的位置正好处于宏观经典理论向微观量子理论的过渡区, 它是最后一个人类尚未完全认知和利用的频段^[1]。

20 世纪 90 年代以前, 由于缺乏有效的 THz 源及检测技术, 致使人们对 THz 波段的认识非常有

收稿日期: 2009-06-17; 收到修改稿日期: 2009-07-23

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327801)和国家自然科学基金(60671036, 60637010)资助课题。

作者简介: 姚建铨(1939—), 男, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光、光电子、非线性光学和太赫兹技术等方面的研究。E-mail: jqyao@tju.edu.cn(中国光学学会会员号: 3-0274)

限,使得 THz 波成为电磁波谱上的空隙。近十几年来,激光技术的迅速发展为 THz 波的产生提供了稳定、可靠的激发光源,THz 波检测技术及其应用的研究也得到了蓬勃的发展^[2,3]。相比于传统的电磁波和光波,THz 脉冲的典型脉宽在皮秒量级,不但可以方便地进行时间分辨的研究,而且通过取样测量技术,能够有效地抑制背景辐射噪声的干扰^[4]; THz 脉冲源通常包括若干个周期的电磁振荡,单个脉冲的频带可以覆盖从吉赫兹至几十太赫兹的范

围;由于它是由相干电流驱动的偶极子振荡产生的,或是由相干的激光脉冲通过非线性光学频率差频产生,因此有着很好的相干性;此外,THz 光子的能量只有 10^{-3} eV,不易破坏被检测的物质,适合于生物大分子与活性物质结构的研究;而且,THz 辐射具有很好的穿透性,它能以很小的衰减穿透物质,如烟尘、墙壁、碳板、布料及陶瓷等,在环境控制与国家安全方面能有效发挥作用。

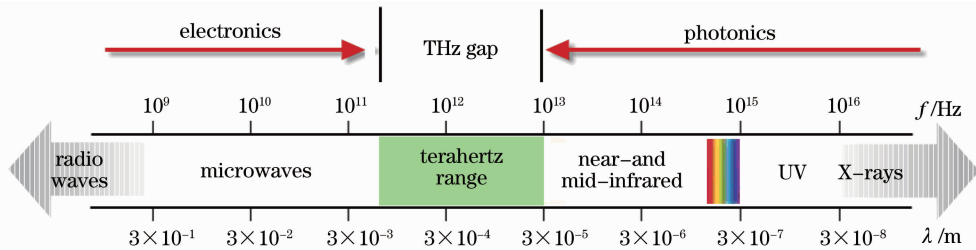


图 1 太赫兹在电磁波谱中的位置

Fig. 1 Position of terahertz wave on electric-magnetic wave spectrum

基于以上良好特性,THz 波用于通信领域成为了近几年来国内外研究的热点。其中室内无线安全接入^[5]和高速短距离无线互联通信正是 THz 超宽带无线通信带宽的两个发展方向。

1.2 太赫兹波用于通信的独特性质

THz 波介于微波与远红外光之间,处于电子学向光学的过渡领域,它集成了微波通信与光通信的优点,同时相比较 2 种现有通信手段,THz 波表现出了一些特有的优良性质。

相比较于微波通信而言:

1) THz 通信传输的容量大,THz 波的频段在 $10^8 \sim 10^{13}$ Hz 之间,比微波通信高出 1~4 个数量级,可提供高达 10 Gb/s 的无线传输速率,比当前的超宽带技术快几百甚至上千倍^[6~9];

2) THz 波束更窄,方向性更好,可以探测更小的目标以及更精确地定位;

3) THz 波具有更好的保密性及抗干扰能力^[10~12];

4) 由于 THz 波波长相对更短,在完成同样功能的情况下,天线的尺寸可以做得更小,其他的系统结构也可以做得更加简单、经济。

相比较于光通信而言:

1) THz 光子能量低,只有 10^{-3} eV,这大概是光子能量的 1/40,因此,相比于光通信而言,能量效率更高;

2) THz 波具有很好的穿透沙尘烟雾的能力,

因此可以在大风沙尘以及浓烟等恶劣环境下进行正常通信工作^[12,13]。

当然,如图 2 所示,THz 波在通过大气时,水蒸气等导致的强吸收使得其效率较低,以及在目前的 THz 源中相对低的发射功率会给太赫兹通信带来明显的不利。但是,随着高功率 THz 光源、高灵敏度的探测技术及高稳定性的系统日益突破,占有许多独特优势的太赫兹通信必将指日可待^[13]。

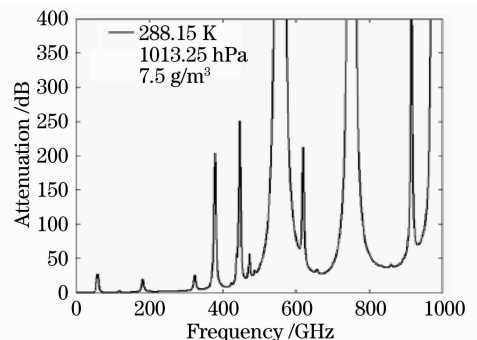


图 2 太赫兹波谱范围的大气衰减

Fig. 2 Atmosphere attenuation in the terahertz wave range

1.3 太赫兹通信系统结构

在目前的 THz 通信研究中,主要以 THz 无线通信系统的设计研究为主,如图 3 所示。

其中发射子系统、接收子系统、双工器和天线构成通信子系统。一般的微波通信并没有捕获、跟踪和瞄准 (Acquisition, Tracking, Pointing, 简称 ATP) 子系统。考虑到 THz 波的高频段比较接近光频,波束

窄,在一些特别的使用环境下,需要采用 ATP 子系统,但精度要求可以比光通信系统对 ATP 子系统低。ATP 子系统实现对信号的捕获、跟踪和瞄准,当跟踪和瞄准精度满足系统正常工作的要求时,启动通信子

系统,建立通信链路,完成数据传输。而辅助功能子系统则通过遥测遥控模块接收建立通信链路的指令和相关参数,并输出遥测参数,进行 THz 通信终端工作模式的切换。

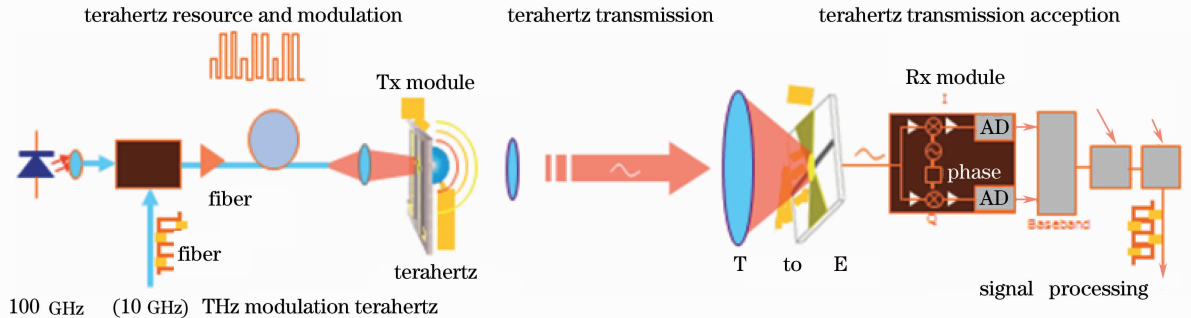


图 3 太赫兹通信框图

Fig. 3 Diagram of terahertz communication

这种设计主要是为了实现高速无线接入覆盖。经过一定的改进,可以实现高功率的空间通信。

1.4 研究太赫兹通信的重要意义

无线移动通信呈现宽带化和移动化发展趋势,开拓新的频段成为未来无线通信的重要方向。在过去的 25 年里,无线移动通信对带宽的需求几乎每 18 个月翻一番^[14]。

THz 技术可广泛应用于雷达、遥感、国土安全与反恐、高保密的数据通信与传输、大气与环境监测、实时生物信息提取以及医学诊断等领域。因此,THz 波的研究对国民经济和国家安全有重大的应用价值。同时,由于太赫兹频段属于空白频段,现在没有分配执照,可望提供固网和移动网的高服务质量(QoS)宽带多媒体 10 Gb/s^[15]左右的无线业务。将 THz 频段用在通信领域还刚刚起步,目前商业设备供应商和国际标准化组织如 ITU 和 IEEE 等正在研发 THz 通信并制定相应标准。

根据新兴市场研究报告统计,全球 THz 系统技术市场份额在 2008 年达 7720 万美元,10 年后将增长到 5.21 亿美元,年增长率约为 37.2%。目前国际上 THz 波的研究组织主要有 4 个,分布在美国 THz Science and Technology Network, 欧洲 TeraNova, 日本 Terahertz Technology Forum 和中国 THz Research and Development Network。

目前,我们已经在主干网上,通过光纤化,密集波分复用(DWDM)等方案实现扩容,同时,一些其他方案也被反复地讨论,力图通过实现全光路由以突破电路带来的带宽瓶颈。但是在接入网扩容上,各种方案都还不是很成熟。一种解决方案是基

于无源光网络(PON)的大容量接入网^[16],需要光纤接入,目前技术比较成熟,但是受到安装和维护成本的限制;另外一种方案就是通过无线接入。无线接入成本低,覆盖面广,特别是对那些偏僻的山区有着独特的优势。但是,带宽越大,需要的载波频率也就越高,按照摩尔定律的增长速度,在不久的将来,无线通信的载波就会进入 THz 波谱范围,这就使得研究 THz 通信成为必然的趋势。

由此可见,我国开展 THz 通信研究,对于抢占带宽资源,拓展无线通信带宽,具有非常高的战略意义。

2 太赫兹通信国际研究发展概述

2.1 日本的研究进展^[6-9,17-24]

1) 2004 年日本 NTT 公司率先公布了其最新研究成果,120 GHz 毫米波无线通信系统,该套系统可实现远距离(>1 km)同时传输 6 路未压缩的高清晰度电视(HDTV)节目信号。

NTT 公司长期从事通信系统的开发与研究,其无线 LAN 技术更是领跑全球。而太赫兹通信系统主要是无线通信系统,有着长期的研究传统和成熟的研究条件的 NTT 公司自然在太赫兹通信系统领域处于领先地位。NTT 的目标是在将来几年研制搭建出比较成熟的 10 Gb/s 的无线通信平台。因此 NTT 公司的研究成果值得关注。

目前 NTT 比较成功的太赫兹通信系统能够实现小于 10 m 的进程传输和大于 1 km 的远程通信,其系统的简图如图 4 所示。

从图 4 可以看到,NTT 系统采用的是光学亚太赫兹源,源的结构细节如图 5 所示,它的载波最初始

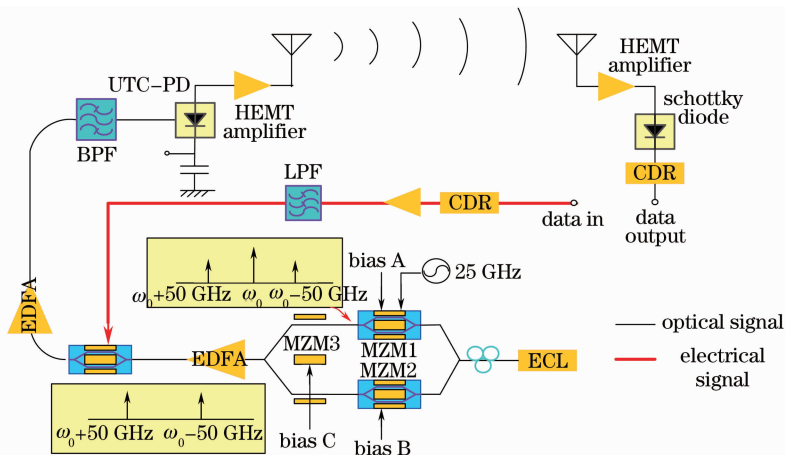


图 4 NTT 无线通信系统简图

Fig. 4 Diagram of wireless communication system of NTT

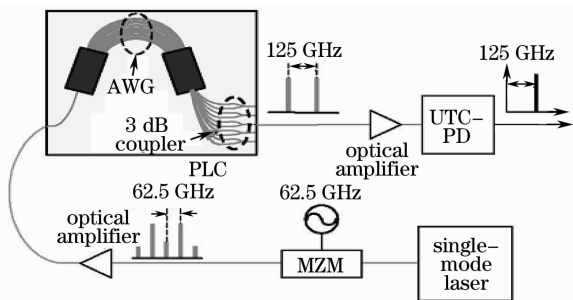


图 5 NTT 搭建的光微波链路

Fig. 5 Chain route of optical-micro wave by NTT

光源采用的是单模信号半导体激光器, 波长为 1552 nm。

NTT 在产生 125 GHz 的信号过程中采用了光学外差法。单模激光器产生的激光首先经过一个马赫-曾德尔调制器(MZM), 调制器在 62.5 GHz 的射频调制频率作用下把原来的单模脉冲展开成数个间隔 62.5 GHz 的多模激光束, 此后这个激光束被引入一个平面波导回路(PLC), 这个回路由一个阵列波导光栅(AWG)和一个 3 dB 耦合器组成, AWG 各个频率通道间的间隔约为 60 GHz。各模式的光入射到 AWG 会被分开, 进入不同的通道中。在 AWG 的输出端其相邻的频道间隔约为 120 GHz。耦合器将其中两束相邻的通道耦合在一块, 在 PLC 的输出端, 系统得到了含有两个模式的激光束, 这两个模式的间隔为 125 GHz。将光束放大后, 用此光束照射 UTC-PD, 就得到了想要的 125 GHz 的亚太赫兹载波。

载波制得以后, 又使用了一个马赫-曾德尔调制器用于信号的载入。载波通过由信号作为调制源的调制器时, 将被加载上信号。此后, 带信号的载波将被进一步放大, 然后送入发射天线。

发射天线分为远程和近程两种结构。近程结构

比较简单, 如图 6 所示, 近程天线由 UTC-PD, 狭缝天线和光学棱镜组成, 其中 UTC-PD 和狭缝天线起到发射毫米波的作用, 光学棱镜则对毫米波传播方向进行聚焦和粗略的定位。虽然 UTC-PD 比一般的光电二极管(PD)转换效率要高, 但毕竟能量有限, 这种天线一般适用于通信距离小于 10 m 的情况。远程天线的结构就较为复杂, 如图 7 所示, 除了 UTC-PD, 它还添加了一个高倍率放大器。这种放大器是由 0.1 μm 栅极 InAlAs/InGaAs 高电子迁移率的传输器薄片(HEMT Amp Chip)制成的。NTT 把 UTC-PD 和 HEMT Amp Chip 整合到一个平面回路薄片上, 完成对电信号的放大。而毫米波将由馈电喇叭(Feed Horn)发射。与近程的天线类

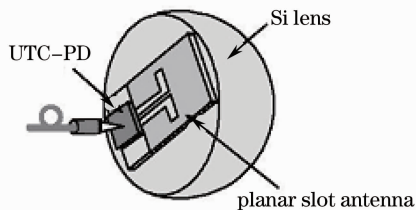


图 6 近程天线

Fig. 6 Short range antenna

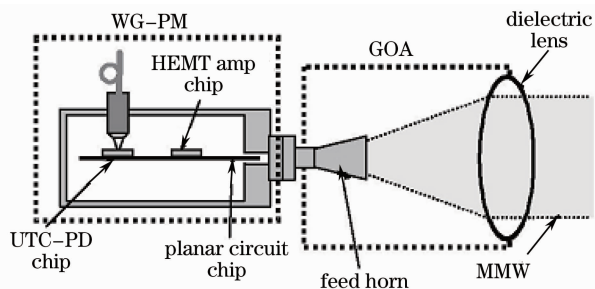


图 7 远程天线

Fig. 7 Long distance antenna

似,远程天线也采用棱镜对毫米波进行定向和聚焦。而在接收端,其接收机仍采用比较普遍的太赫兹波接受方式,即使用肖特基二极管,平面天线接收毫米波,用低通滤波器过滤信号。远程接收器添加了前置放大器。

2) 日本 Fukui 大学已经研制出频率达 0.889 THz,输出功率达数万瓦的回旋管。俄国科学研究院应用物理研究所正在研制 1 THz 的回旋管,脉冲磁场 40 T,脉宽 100 μs ,电压 30 kV,电流 5 A,输出功率有望达 10 kW。

2.2 德国的研究进展^[5,10,25~36]

德国 Braunschweig 技术大学高频段技术研究所的通信实验室在 THz 传输方面进行了大量的研究,主要分为:THz 自由空间信道特性研究,THz 天线设计,60 GHz 的无线传输系统演示平台设计,300 GHz 的无线传输系统演示平台设计,THz 通信所需的半导体器件设计。同时,该大学研究人员通过建立各种室内环境模拟,实验研究了在各种反射涂料以及反射镜对室内 THz 接收装置接收信号的改善情况,以及发射接收装置的覆盖接收最优化的空间位置的建模研究,为将来室内 THz 无线通信提供了有利的数据支持,并且预测在未来的 10 年无线通信的速度将会到达 15 Gb/s。同时,该大学已经建立了能够在室温条件下工作的新型半导体 THz 调制器,研究人员将这一调制器与可调 THz 时域光谱系统结合了起来,利用 THz 宽脉冲,以 75 MHz 的重复率来传输频率高于 25 kHz 的音频信号。利用这一系统可以传输一张 CD 上的音乐,据称在另一端接收到的音乐质量和通过电话听到的音乐质量不相上下。

2.3 美国的研究进展

1) 美国 Rensselaer Polytechnic 研究所成立了由张希成教授领导的 THz 技术研究项目组,其在 THz 波的发射和探测,THz 波光谱和成像,THz 波三维成像技术等方面都进行了众多研究。此外,美国 AT&T 实验室在 THz 技术以及光无线网络方面进行了大量研究^[37~42]。

2) 美国研究人员利用电磁波代替电流信号研发出能在 THz 下工作的新型信号调制器;加利福尼亚大学圣巴巴拉分校以及美国宇航局埃姆斯研究中心正在用自由电子激光器产生的高频电磁波来控制调制器,这些电磁波由振荡电场组成,用高频电磁波进行调制比电子学线路快得多。但由于 THz 振荡很难用现有的技术直接观测,研究人员现只能用间接的方法来检测调制速度。

3) 美国及欧洲已开始使用自由电子激光器 THz 辐射源,据估算,这种装置可产生 0.03~30 THz 的辐射,其亮度可超过现有 THz 辐射源的 9 个数量级。此外,JPL,SLAC 与 Brown 大学合作进行研制的纳米速调管,频率可达 0.3~3.0 THz,当工作电压为 500 V 时,其连续波输出功率可以高达 50 mW。

2.4 我国的研究进展

我国 THz 研究较国际上其他发达国家开始较晚,但通过各研究单位团体及个人多年的不懈努力,现已取得一定的成果。国家科技部及国家基金委等机构近年也支持了若干有关 THz 技术的 973,863,自然科学基金等大小项目。

1) 中国科学院上海微系统研究所在“十五”期间主要承担了国家自然科学基金重大项目,国家 973 计划等项目,主要目标是 THz 器件的模拟及相关物理机制的探索,并对固体 THz 源和探测器等 THz 器件的实现进行探索。

在 THz 通信系统上,由中国科学院上海微系统所信息功能材料国家重点实验室曹俊诚研究员负责的 THz 课题组自主成功研制了激射频率为 3.2 THz 的量子级联激光器(QCL)^[43]。该器件的整个研制过程,包括有源区材料生长、器件流片工艺以及光电特性测试等均在中国科学院上海微系统所完成,为发展相关 THz 应用系统奠定了基础。

2) 中国科学院物理研究所、上海应用物理研究所、首都师范大学等单位已经先后建立了 THz 时域光谱的实验室,在 THz 辐射探测和成像,时域光谱分析,THz 的产生机理,THz 脉冲在自由空间和近场区域的传播规律以及在生物样品分析和瞬态光谱中的应用等方面开展了实验和理论研究。

3) 成都电子科技大学在毫米波辐射的传输、检测和应用、电子波抽运自由电子激光、Smith-Purcell 自由电子激光及 THz-Cherenkov 辐射等方面开展了理论和实验方面的研究。

4) 南京大学在 THz 探测技术方面取得了重要成果。

5) 天津大学激光与光电子研究所在基于光学、光子学及非线性光学的 THz 辐射源,小型化、窄带连续、准连续 THz 源的研究上已取得很多重要成果,发表论文数十篇^[44~74]。

6) 中国科学院紫金山天文台正在开展 THz 频段的高灵敏度超导探测技术和测量器件的研究,并致力于在天体物理和大气物理领域的应用。

7) 西安理工大学在新型光电 THz 器件的研究,中国科学院西安光学精密机械研究所在基于飞秒激光器的 THz 源研究,上海交通大学的 THz 辐射与凝聚态体系的相互作用的研究,以及中山大学、深圳大学在 Optical pumped THz source 的研究都获得了不少成果。

8) 在 THz 通信成像方面,首都师范大学张存林教授小组建立了一套透射式逐点扫描 THz 辐射成像装置^[75],它采用〈100〉的 InAs 晶体作为高功率、宽频谱的 THz 辐射源和高灵敏度、低噪声的电光取样差分探测方法,具有对隐蔽在非透明电介质材料内物体成像的能力。并且,系统能够获得成像物体上每一点的光谱数据,可以对物体进行光谱成像。对有效利用 THz 成像技术和开展 THz 成像领域的相关研究具有指导意义。

3 太赫兹通信系统设计新设想及关键技术

太赫兹通信系统中,太赫兹信号的产生、发射、传播、调制编码、解调、接收的完整通信过程,涉及到太赫兹源的设计、太赫兹信号的产生、太赫兹信号的

性质研究、太赫兹的调制方案以及太赫兹接收端的设计方案。同时,还应研究太赫兹无线通信与基于光纤的太赫兹通信系统,解决光通信与无线通信网络共存与兼容问题,提出实现关键技术的方案。

3.1 太赫兹系统的设计方案

在原有 THz 无线通信研究的成果上,针对 THz 波大气吸收比较严重,其损耗约为 100 dB/km^[10,76]的问题,研究人员提出了光纤载太赫兹通信研究方案。

采用波分复用(WDM)技术和光载毫米波宽带信号(ToF)相结合的传输方式,如图 8 所示,它包括 Backbone 网络(数据为 IF 中频信号)、总站(CS)、基站(BS)、移动终端(UT),组成光纤通信和无线通信系统。无线通信系统为毫米波无线通信(100 GHz 的太赫兹信号)。ToF 通信系统由上行链路和下行链路组成,上行链路实现将毫米波无线 RF 信号由基站接收,进行光调制,通过光纤传送到总站(中心站),检波后为 IF 中频信号送给 Backbone 网络;下行链路则反过来,将 Backbone 网络送来的 IF 中频信号在总站进行光调制,通过光纤传送到基站,在基站检波后为毫米波 RF 信号,由天线发射给无线移动终端。

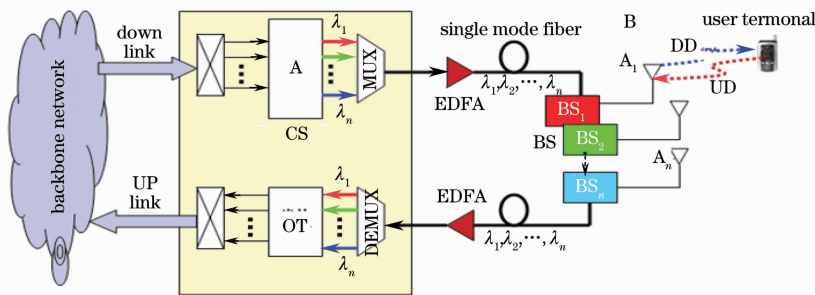


图 8 ToF 波分复用通信系统示意图

Fig. 8 Diagram of terahertz over fiber (ToF) WDM communication system

图 8 中 MUX 为光合波器,DEMUX 为光分波器,EDFA 为掺铒光纤放大器,A 表示光载毫米波信号多波长光源,B 表示毫米波无线链路,A₁ 表示天线 1,A_n 表示天线 n,CS 为总站,BS 为基站,OT 为光检测器,UD 表示上行数据,DD 表示下行数据。

3.2 关键设备及技术

3.2.1 高功率太赫兹信号发射机研究方案

缺乏高功率发射源是太赫兹频段理论研究与应用开发相对滞后的重要原因。为此,高功率低成本的太赫兹信号发射源(例如:如何用全光的方法来低成本产生毫米波信号源)将为重要的研究内容。

3.2.1.1 太赫兹产生源

(1)集成调制功能的光混频产生太赫兹波器件

设计方案

如图 9 所示,当两束中心波长为 1550 nm 且频率差恰好在太赫兹频率范围的线偏振光束以很小的夹角 δ 在 $x-z$ 平面均匀入射光混频区域后,将会在 In_{0.53}Ga_{0.47}As 材料中形成一个随时间和空间变化分布的光强;在这个光强的激励调制作用下,材料中产生时空变化分布的电子和空穴浓度;在外部所加偏置电场和内部场强的作用下,电子和空穴将会在光混频区域形成一个时空变化分布的光电流,这个光电流的调制频率恰好等于两束光的中心频率差,即太赫兹光电流。通过合理地设计衬底材料的厚度和光混频区域的面积,可将这个光混频区域视为一个矩形微带天线,从而可以使太赫兹光电流直接向

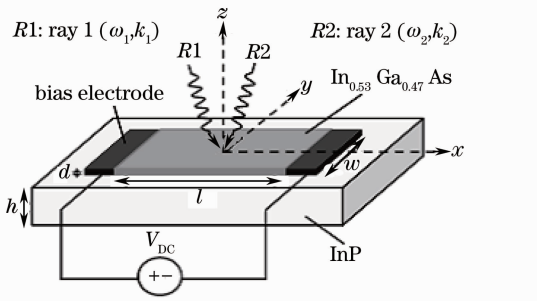


图 9 工作在 1550 nm 的集成天线结构的光混频示意图

Fig. 9 Optical frequency mixing diagram integrated antenna configuration working at 1550 nm

自由空间辐射产生太赫兹波^[77,78]。

在以上的太赫兹波产生方案中，可以实现对产生的太赫兹波的振幅、相位、频率调制效果，基本原理分别为：

1) 幅度调制：产生的太赫兹波强度与两束抽运光的强度 (P_1, P_2) 以及偏置电压 (V_{DC}) 相关，因此通过对 P_1, P_2 或 V_{DC} 进行调制，即可实现对产生的太赫兹波的幅度进行调制；

2) 相位调制：产生的太赫兹波相位与两束抽运光的入射夹角 (δ) 相关，因此通过对 δ 进行调制，即可实现对产生的太赫兹波进行相位调制；

3) 频率调制：产生的太赫兹波频率等于两束入射光的频率差，因此通过改变其中一束光的中心频率，即可实现对产生的太赫兹波进行频率调制。

以上基于光混频产生太赫兹波方案，同时拥有体积小、质量轻、易于集成、功耗低、室温条件工作的优点；它具有集成的太赫兹波调试功能，可以同时实现太赫兹波的调幅、调频和调相功能；另外，它的器件抽运光工作波长为 1550 nm，可以采用光通信中成熟的光源技术，并且为实现未来光通信系统与太赫兹无线短距离通信系统的“无缝结合”提供可能。

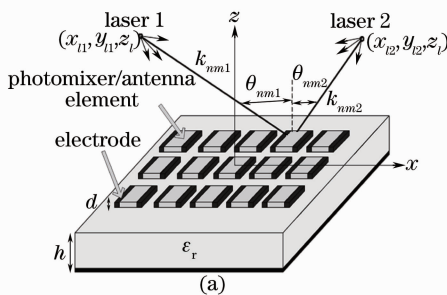


图 10 (a) 光混频器件阵列集成方案；(b) 抽运光源入射方案

Fig. 10 (a) Array integration scheme of optical frequency mixing; (b) incidence scheme of pumping source

然而，这种方案产生的太赫兹波功率太低，理论结果表明，产生的太赫兹波功率尚在纳瓦量级，为了应用于太赫兹无线短距离通信系统中，必须提高太赫兹波输出功率。

(2) 负微分电导产生 THz

上海理工大学超快电子与太赫兹技术实验室朱亦鸣副教授小组实验研究发现，超纯本征砷化镓中的负微分电导可持续到太赫兹波段，从而为制备价格低廉、高效、简单的太赫兹振荡器源打下了基础^[79]。

3.2.1.2 高功率太赫兹波的产生

针对 3.2.1.1 节提出的 THz 源方案，提出如下高功率方案：

(1) 提高抽运光功率

由理论分析表明：产生的太赫兹波功率与抽运光功率的平方成正比，因此提高抽运光功率可以有效地提高太赫兹波的输出功率。

但是，这会带来散热问题。由于光混频区域非常小 ($7 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$)，提高抽运光功率密度将会导致光混频区域温度迅速升高最终导致器件的热损伤。因此为了提高器件可以承受的最高抽运光强，必须提高器件的散热性能。

对于传统的工作在 780 nm 附近采用低温生长 (LTG) GaAs 材料制作的光混频器件，已报道了通过在衬底材料和 LTG-GaAs 材料之间生长一层热传导性更好的 AlAs 层，可以显著地提高器件可以承受的最高光功率从而提高产生的太赫兹波的功率。

(2) 器件阵列集成

尽管单个光混频器件产生的太赫兹波功率很低，但是由于产生的太赫兹波相位可以通过入射光的夹角进行控制，因此这为通过光混频器件的阵列

集成来提高输出功率提供了可能。2005 年, D. Saeedkia 等^[80] 已发表了工作在 780 nm 附近采用 LTG-GaAs 材料制作的光混频器件阵列集成来提高太赫兹波输出功率的研究报道, 结果显示, 通过器件阵列集成, 可以有效地将太赫兹波输出功率提高 3 个数量级, 达到几个微瓦。

图 10^[77] 和图 11 显示了 D. Saeedkia 等所采用的一种器件集成方案的基本原理图。

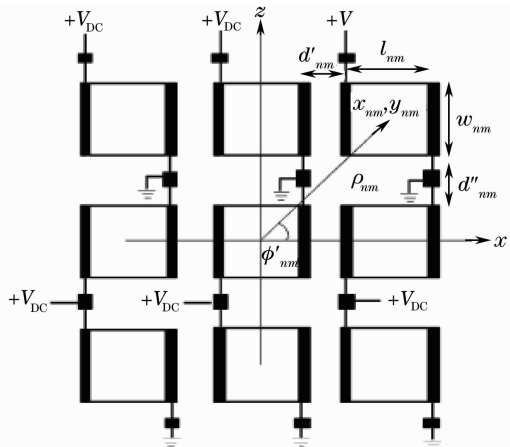


图 11 器件阵列集成的 x-y 面视图

Fig. 11 Diagram of device array integration at x-y view

通过对比两种方案可以得出, 由于太赫兹波输出功率与抽运光功率成二次关系, 而与器件阵列集成个数近似成一次关系, 因此当抽运光强度一定的条件下, 减少器件阵列集成个数而提高单个器件所能承受的最高光功率将会更有效地提高太赫兹波输出功率。

通过综合两种提高产生太赫兹波的方案, 可以有效地提高太赫兹波输出功率, 达到微瓦量级甚至更高, 从而可以有效地应用于太赫兹短距离无线通信系统中。

3.2.1.3 太赫兹无线链路——发射机系统方案

无线链路发射机由射频块、基带块、功率/控制块和天线构成。其中射频块由发射机模块、功率放大器模块和锁相振荡器(PLO)构成。结构图如图 12 所示。

发射机模块使用了 0.1 μm 门电路 InP MMIC, 它包括倍频器、振幅偏移键控模块和放大器。由 PLO 产生的 15.625 GHz 信号在 MMIC 中由三级倍频, 乘 8 得到 125 GHz。利用功率放大(PA)模块将发射机的输出功率增加到 10 mW。PA MMIC 在 125 GHz 具有 10 dB 左右的增益。两个 MMICs 都被集成到波导模块包(图 13 所示)上。基带块由 O/E 转换器、时钟和数据恢复(CDR)电路、时钟发生器和

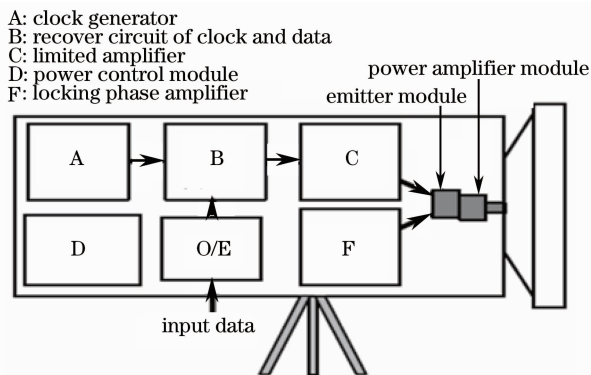


图 12 120 GHz 带宽发射机结构图

Fig. 12 Diagram of 120 GHz wide band emitter

限制放大器构成。从光纤进入的数据通过 O/E 转换器被转化成电信号, 然后进入 CDR 电路和限制放大器。时钟发生器产生 4 种频率作为 CDR 电路的参考时钟, 包括有/无前向纠错(FEC)的 OC-192 和有/无 FEC 的 10 Gb 以太网的 1/64 时钟。

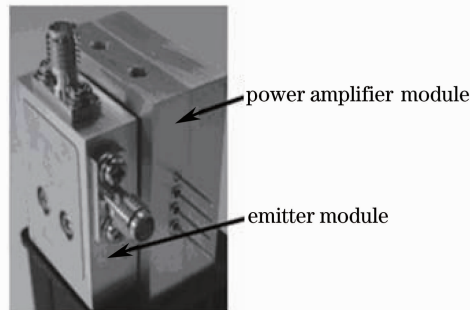


图 13 波导模块包

Fig. 13 Wave guide module bag

在发射机和接收机中, 功率/控制块将外部 +/−15 V 直流电转换为可用于元件的电压, 同时它可以监控系统参数, 例如电压、电流、温度和湿度。

由于全电毫米波模块, 使得可以分别集成发射机和接收机所需的块到一个防风雨盒, 这样可以降低功率损耗使得电池运行变成可能。天线置于防风雨天线屏蔽器内, 是可分离的。这样系统设计成可以运行于阳光直射、周围温度小于 40 °C 的情况下。对于高增益天线, 利用了蜗轮齿轮头和望远镜探测器。事先将相距 200 m 左右的天线轴和探测器轴进行对准, 由于良好的对准, 使得相隔 500 m 左右时, 只需要简单瞄准探测器, 就可以接收到足够的输入功率。发射机天线屏蔽器的直径大约 50 cm。改进了 100 GHz 无线链路, 使用了 MMICs 用于产生、调制和放大 125 GHz 信号。可望获得在误码率为 10~12 时, 10 Gb/s 的信号传输距离为 800 m, 最大的传输距离估计可达 2 km。

3.2.2 高灵敏度太赫兹探测技术研究

高灵敏度探测技术,也是太赫兹频段理论研究与应用开发的一个瓶颈。对于太赫兹探测,研究人员也提出了很多方案。

(1) 传统太赫兹波探测技术

THz 源的低发射功率及相对较高的热背景耦合,决定了在太赫兹通信中需要灵敏且体积小的探测器。传统的探测器主要包括超导(SIS)混频技术^[81]以及利用声子、电子散射冷却机制发展起来的热电子测热电阻(HEB)混频器^[82]。其中 SIS 混频技术是以光子辅助隧穿机制为理论基础的,探测频率范围约为 0.1~1.2 THz,需在液氦温度下工作。这显然不适合太赫兹通信的要求,太赫兹通信中的探测器必须轻便,可以在室温下或者大温度范围内工作。

HEB 与 SIS 混频技术相比,在探测 1 THz 以上的辐射时有更好的性能表现,其响应频率更快,目前 HEB 可探测的最高频率约达 5 THz,噪声温度约为量子极限的 10 倍左右^[83]。这些探测技术使用方便,但是只能测出强度,仅做非相干测量,它不能提供相位信息,其灵敏度也受背景辐射的限制^[13]。这对于做相位调制 PSK 的相干太赫兹通信而言也是不合适的。

(2) 太赫兹通信探测器

研究人员在寻找适合太赫兹通信的探测器上也做了大量的研究。目前报道比较成功的探测器主要有基于 AlGaIn/GaN 的空间肖特基光电二极管(HDSD)太赫兹探测器^[84]和中国科学院上海微系统研究所 THz 课题组曹俊诚研究员与加拿大国家研究院微结构研究所采用的基于抛物带有效质量近似和三维漂移-扩散器件模拟方法设计的 THz QWIP^[85]。

基于 AlGaIn/GaN 的空间肖特基光电二极管太

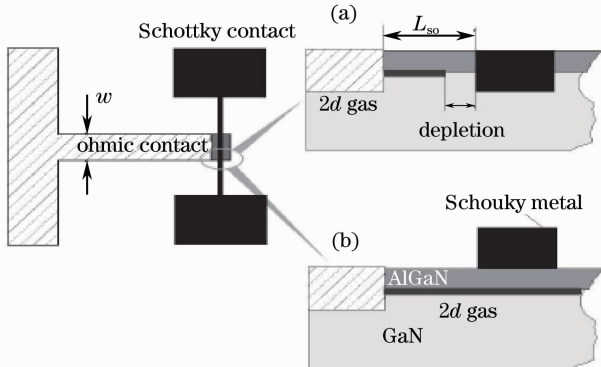


图 14 一种适合太赫兹通信的探测器

Fig. 14 One of detectors suitable for Thz communication

赫兹探测器目前报道的探测频率可达 2.24 THz,结构如图 14 所示。

这种结构的半导体太赫兹探测器通过基于 AlGaIn/GaN 的 2DEG 获得很低的晶体管电容,因此对比传统的肖特基二极管,其截止频率得到了极大的提高,并使之响应 THz 的信号。这种探测器在日本 NTT 的 120 GHz 太赫兹通信系统演示接收机模块中得到了应用^[6,17]。

中国科学院上海微系统所研究的基于抛物带有效质量近似和三维漂移-扩散器件模拟方法设计的 THz QWIP,首次实现了一种能工作在光子能量小于 34 meV 的 THz QWIP,其峰值探测频率为 7 THz (波长 42 μm)^[85]。其结构如图 15 所示^[86]。图 15(a)为无偏压情形,图 15(b)为有偏压情形。量子阱中的束缚电子吸收光子 ($h\nu$) 后,跃迁到连续态,在外电场作用下形成光电流^[87]。

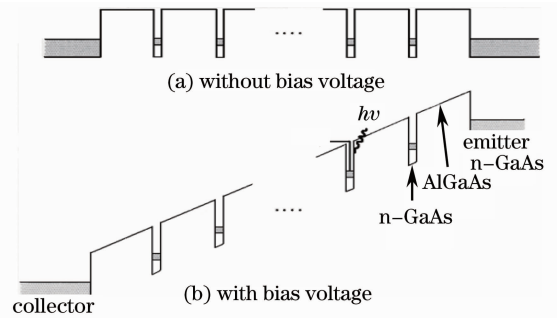


图 15 GaAs/AlGaAs QWIP 器件结构和能带示意图

Fig. 15 Diagram of GaAs/AlGaAs QWIP device configuration and energy band

该探测器在我国的首个太赫兹无线通信演示上得到了应用。中国科学院上海微系统所信息功能材料国家重点实验室曹俊诚太赫兹研究团队实现了基于太赫兹量子级联激光器(THz-QCL)和太赫兹量子阱探测器(THz-QWP)的无线通信演示,利用该通信系统成功演示了文件的传输,通信频点为 4.1 THz。

(3) 其他探测技术

最近也有报道,采用激光等离子体气体进行太赫兹波的探测^[88]。Chiko Otani 等^[89]也提出了基于 Nb 的超导隧道结(STJ)的半导体太赫兹探测技术。这种材料可以直接检测或者通过产生声子来进行间接检测。

(4) 太赫兹接收机模块

一种可能的太赫兹通信接收机结构如图 16 所示,接收机中,射频块由 MMIC 接收机模块构成,接收机模块包括低噪声放大器(LNA)和 ASK 解调

器。接收机 MMIC 集成到一个波导模块包上。经过受限放大器的解调信号进入时钟和数据恢复电路,然后经过 E/O 转换器,输入到外部光纤中。自动增益控制 (AGC) 电路用于监控解调信号和控制低噪声放大器 (LNA) 的门电压,这样额外的功率就无法进入最终的放大器从而避免了超载。

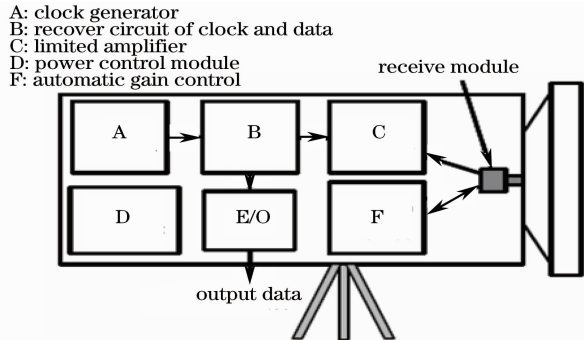


图 16 120 GHz 带宽接收机的结构图

Fig. 16 Diagram of 120GHz wide band receiver

3.2.3 高速太赫兹波调制器设计方案

中国计量学院李九生副教授提出一种简单可行的光子晶体 THz 调制器,如图 17 所示,没有外加激光时,太赫兹波顺利通过光子晶体(如图 18 所示),没有被调制;当有外加激光时,由于载流子作用,硅光子晶体产生禁带移动,太赫兹波无法通过光子晶体,从而实现太赫兹波的强度调制。

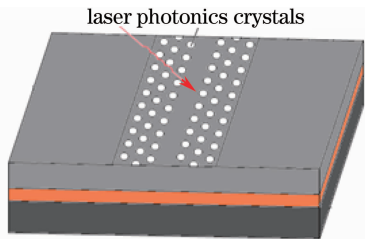


图 17 太赫兹波调制示意图

Fig. 17 Diagram of terahertz wave modulator

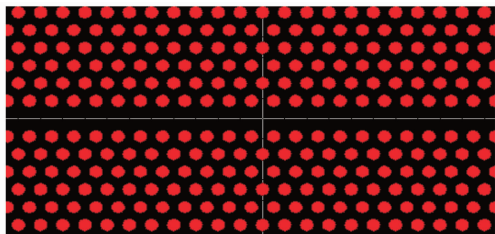


图 18 光子晶体结构示意图

Fig. 18 Diagram of photonic crystal configuration

3.2.4 适用于太赫兹系统的高效信道编码方案

高效信道编码可以为太赫兹波传输性能提供较大的性能增益。为了适应不同的数据格式,要为控制信令和数提供不同的编码方案。

(1)信令部分采用低码率的 Turbo 编码方案^[90]

计算机仿真表明, Turbo 码在低信噪比下表现出接近于香农极限的优异的误比特率 (PEW) 性能,它不但在抵御加性高斯噪声方面性能优越,而且具有很强的抗衰落、抗干扰能力,其优越的纠错性能是前向纠错编码领域的一个重要里程碑。这使得 Turbo 码在深空通信、卫星通信、移动通信及其他通信系统中都具有广阔的应用前景。

Turbo 码的核心思想是子编码器的级联和迭代译码算法,其中交织器的引入起到了非常重要的作用。编码器由两个子编码器通过交织器并行级联,经过删截与复接得到编码数据流。在 Turbo 码的各种软输入软输出译码算法中, MAP 最大后验概率算法的性能最好,译码器结构见图 19。LOGMAP 算法是 MAP 算法在对数域中的实现。可把繁琐的指数和乘除运算转化为加减运算,降低了运算复杂度。MAXLOGMAP 算法对 LOGMAP 算法做了近似运算,进一步降低了运算复杂度,比 MAP 算法要损失 0.3~0.5 dB 的增益。

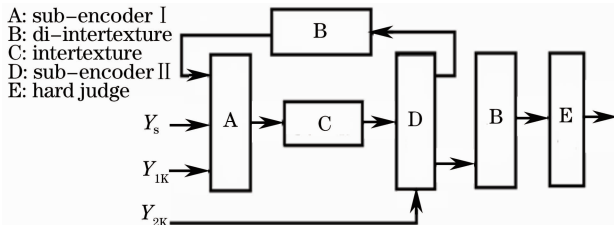


图 19 译码器

Fig. 19 The encoder

(2)数据部分采用高码率的 LDPC 编码方案

LDPC 码是近些年来受到广泛关注的一种纠错码,它与 Turbo 码有着相似的构成原则。LDPC 码的特点是:性能优于 Turbo 码,具有较大灵活性和较低的差错平底特性 (error floors);描述简单,对严格的理论分析具有可验证性;译码复杂度低于 Turbo 码,且可实现完全的并行操作,硬件复杂度低,因而适合硬件实现;吞吐量大,极具高速译码潜力,更适合高码率数据部分的传输应用。

3.2.5 适用于太赫兹系统的先进电信号处理算法方案研究

我们也将研究先进电信号接收处理算法的应用可能性,如正交频分复用 (OFDM) 技术^[91,92]。以此为太赫兹无线通信系统提供有效对抗多径效应,以及频谱利用率高的传输手段。

正交频分复用是一种多载波数字调制技术。它的基本原理是将高速串行数据变换成多路相对低速

的并行数据并用不同的载波对其进行调制。且各载波频谱相互重叠但是在整个符号周期内满足正交性,从而保证接收端能够不失真地恢复再生原信号。

其调制框图如图 20 所示。其中数据编码器用来将输入的二进制比特转化为电的脉冲信号。

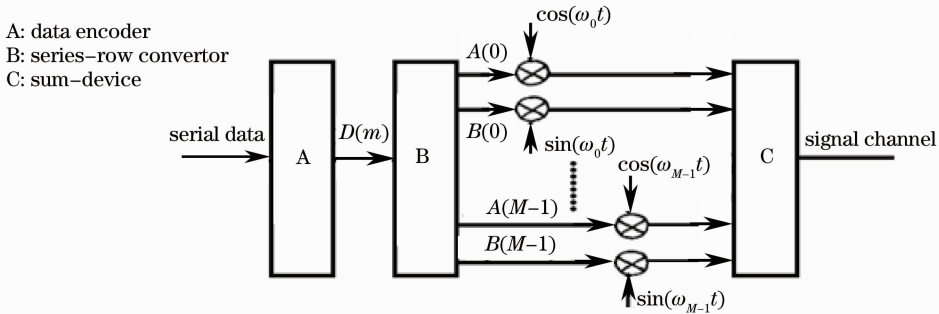


图 20 调制框图

Fig. 20 Diagram of OFDM

但是由于上述方法所需设备非常复杂,当 M 很大时,需要大量的正弦发生器、滤波器、调制器和解调制器等设备,因此系统非常昂贵。为了降低成本和

复杂度,目前采用离散傅里叶变换(DFT)和反变换(IDFT)来实现 OFDM 调制以及解调功能,如图 21 所示。

S/P: series/parallel transform
A: encoder
P/S: parallel/series transform
B: redundancy checkout with circulation

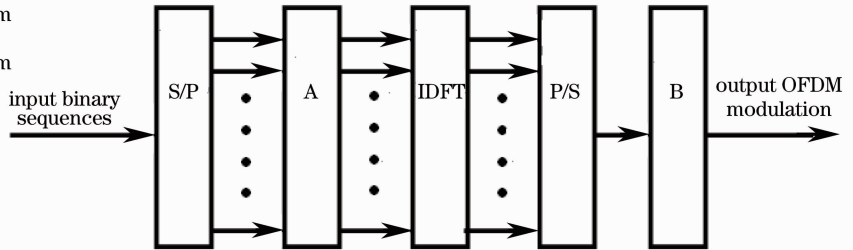


图 21 用 DFT 实现 OFDM 调制框图

Fig. 21 Diagram of OFDM modulation with DFT

OFDM 技术之所以应用到各种无线接入系统中是由于它具有以下优点:

1) 抗多径衰落的能力强

并行传输体制大大扩展了符号的脉冲宽度,提高了抗多径衰落的性能。且由于一般的 OFDM 系统均采用循环前(CP)方式,使得它在一定条件下可以完全消除信号的多径传播造成的码间干扰,完全消除多径传播对载波间正交性的破坏。

2) 频谱利用率高

传统的频分复用方法为了减小各个子载波间的相互串扰,各个子载波的频谱互不重叠,保持了足够的频率间隔,降低了系统的频率利用率。而现代 OFDM 系统采用数字信号处理技术,采用了在整个符号间隔内正交的载波提高了频谱的利用率。另外,OFDM 的各个子信道上还可以采用多进制调制(如频谱效率很高的 QAM),进一步提高了 OFDM 系统的频谱效率。

3) 系统复杂度低、成本低

传统的频分复用需要使用大量的发送滤波器和

接收滤波器,大大增加了系统的复杂度和成本。而现代的 OFDM 系统的各子载波的产生和接收都由数字信号处理算法完成,极大地简化了系统的结构,降低了成本。

4) 均衡简单

OFDM 的子载波把整个信道划分成许多窄信道,尽管整个信道有可能是极不平坦的衰落信道,但在各子信道上的衰落却是近似平坦的。这使得 OFDM 系统子信道的均衡特别简单,往往只需一个抽头的均衡器即可。OFDM 系统的调制和解调也可以采用傅里叶正/反变换的快速算法(FFT/IFFT)来实现,而数字信号处理器(DSP)的快速发展使得 FFT/IFFT 的实现变得更加容易了。

3.2.6 太赫兹多跳网络的设计方案

鉴于太赫兹通信在高频段运行,路径衰减严重。而且,由于复杂无线环境中阴影、阻挡等因素的影响,将使用户难以获得持续的高速率和高质量的通信服务。多跳中继(Multi-hop Relay)技术借助新型中继站的开发,可以降低无线网络布建成本,增加数

据传输的可靠性,并提升网络覆盖能力以及系统营运效益^[93]。

为了解决中继系统的多跳信号互干扰(Inter-hop Interference)问题,提高多跳中继网络在复杂无线环境中的系统传输性能,提出了基于交织迭代的 OFDM-IDMA 多跳中继太赫兹通信系统,其工作原

理是通过伪随机交织器产生不同的交织图案,分配至多跳中继各阶段;系统根据最优化时频资源分配理论,构建非正交化的多跳传输信道。各中继阶段则利用交织迭代技术进行多跳信号干扰消除,其通信方案参见图 22。

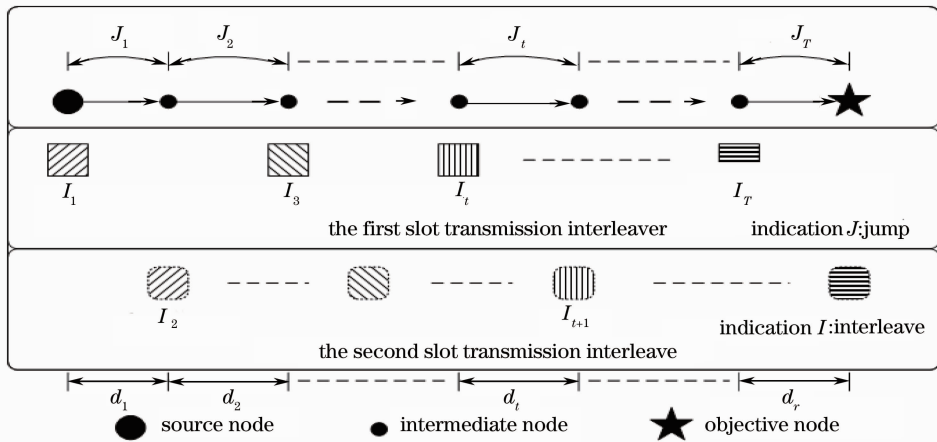


图 22 基于交织迭代的 OFMD-IDMA 无线中继太赫兹网络工作原理示意图

Fig. 22 Working principle diagram of OFMD-IDMA wireless relay terahertz network based on join iterative

(注:1)双时隙设计是为了避免 OFDM 系统中相邻中继阶段的耦合干扰问题,2)同一时隙每个中继阶段采用不同的交织器)

与现有 TDMA,FDMA,OFDMA 等中继系统容量相比,本项目中的 OFDM-IDMA 中继系统在每跳阶段可以占用全部的频域资源,可有更高的系统容量,并可显著降低多跳传输信道的构建复杂度。在中继传输过程中,由于每跳阶段的邻近互干扰源节点个数有限,所以迭代干扰消除算法运算简单、收敛速度较快,系统计算复杂度较低,适合太赫兹高速通信系统的传输。

ToF 通信系统一个重要的应用方向是室外微蜂窝无线传输。鉴于无线电频率资源的紧张,众多研究人员致力于设计高频带利用率的传输手段,如多天线 MIMO 技术、高阶调制方案。但是,无线终端的尺寸限制了多天线的配置;同时,高阶调制也带来了传输功率的增大及误码率的增加。

本项目研究的太赫兹 ToF 无线通信将利用太赫兹频段丰富的频率资源,提供 Gb/s 的高速率的数据传输,同时,项目将采用光纤多跳传输技术实现远距离通信,如图 23 所示。

太赫兹 ToF 通过光纤多跳传输实现远距离通信,在传输末端将提供太赫兹无线接入。其中

1)中心站完成信息数据的物理层信道编码、星座调制、成形滤波等基带处理,以及太赫兹副载波调制、光波调制;还有数据链路层的 CRC 校验,数据包

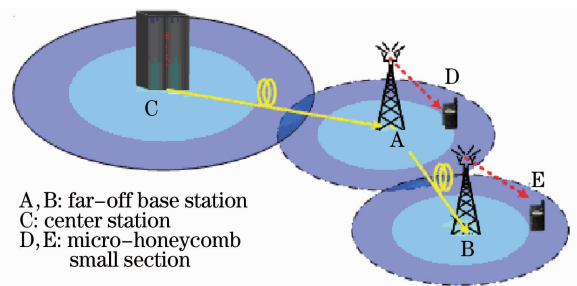


图 23 基于太赫兹 ToF 的室外微蜂窝无线通信系统

Fig. 23 Outer door micro-honeycomb wireless communication system based on terahertz over fiber 整理等。

2)远端基站 A 完成对小区 A 的太赫兹频段线无通信覆盖;同时,基站 A 还将完成对小区 B 数据的放大、转发,以实现太赫兹光纤多跳传输,扩大传输距离。

3)远端基站 B 完成对小区 B 的太赫兹频段线无通信覆盖。

3.2.7 ToF 室内无线局域网传输系统设计方案

ToF 通信系统可以应用到室内短距无线通信环境,为室内用户提供大容量的数据传输服务。太赫兹 ToF 传输能够降低楼宇墙壁的阻挡,提供太赫兹无线通信所需的直射传输路径。如图 24, 25 所示。

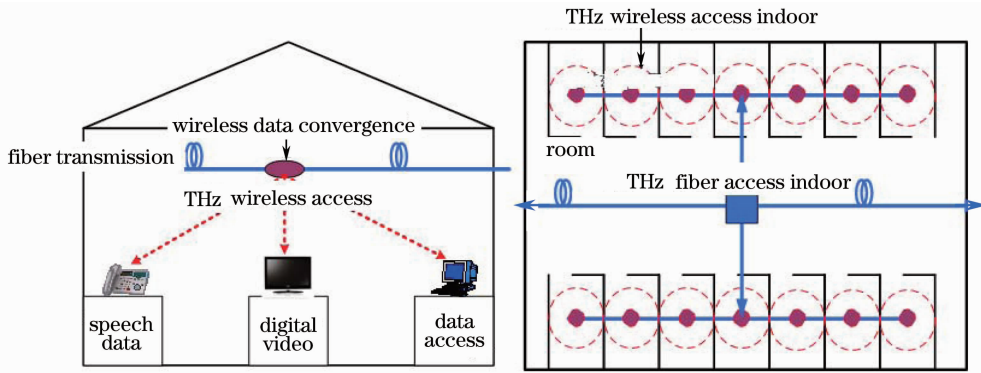


图 24 ToF 室内无线局域网传输系统

Fig. 24 ToF indoor wireless local network transmitting system

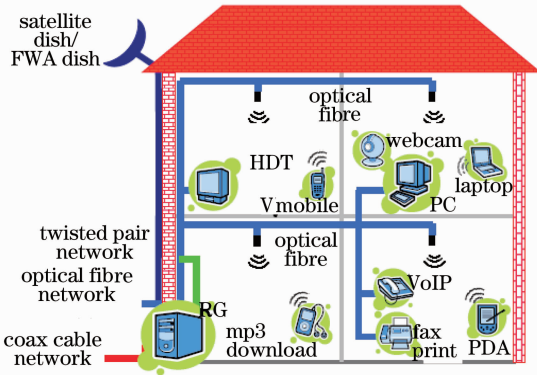


图 25 室内 THz 传输网

Fig. 25 Indoor THz transmitting network

3.2.8 毫米波的光产生、调制及双向 ToF 链路方案

ToF 研究以毫米波宽带副载波信号的全光产生技术为基础,以 ToF 传输系统组建和性能测试为核心,采用理论分析、数值模拟与实验工作相结合的方法,多点同步开展 WDM-ToF 系统中宽带副载波信号的新型调制技术研究、多路微波同时光域上变频技术研究、毫米波副载波信号损伤的补偿技术研究、天线匹配设计以及 WDM-ToF 系统性能的理论分析和实验研究。

3.2.8.1 毫米波的光产生方案

这里提出以下几种方案来实现毫米波的光产生。根据具体的毫米波产生方案,调制及双向链路的方案也略有不同。下面分别介绍。

(a) 方案 1 —— 双模锁模相干混频

本方案的关键之处是采用双模锁模且相位相同的双波长光连续波(CW)信号,将双模(双波长)的模间距设计为毫米波频率,通过锁模激光自混频(自差拍),可以产生毫米波信号。图 26 为产生一路双波长锁模输出的原理示意图。图中的多模 FP 半导体激光器作为从激光器,分布反馈式(DFB)激光器作为主激光器。微波振荡器产生比毫米波低 N 倍的频率信号(示意图中的举例,为了简单取 $N = 2$),通过同样低频的外光电调制器调制光信号,从而产生多谐波分量的光信号,当其中两个谐波分量正好和多模输出的 FP 激光器的两个模输出相吻合时,产生谐波锁模。谐波锁模的发生不仅仅激发了两个有用的模的功率输出,同时还抑止了噪声和其他模式的输出,因此 FP 激光器在这里起到了放大、滤波和提高信噪比的三重作用。例如输出的两个模式间距为 100 GHz 毫米波时,激光器输出为二者的拍频,即 100 GHz 的毫米波光载波信号。

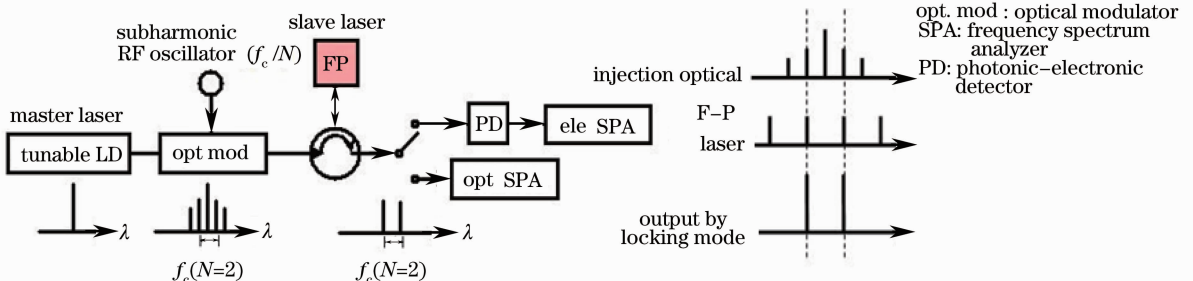


图 26 通过注入锁模产生双波长 CW 光信号的原理框图

Fig. 26 Principle diagram of generation of double wavelength CW signal by injection mode locking

此毫米波信号光源的优点为：

1)系统只公用一个频率比毫米波频率低 N 倍的微波振荡器和一个同样低频的光电调制器调制光信号。

2)采用多模 FP 半导体激光器,可以获得信噪比很高、线宽很窄的双模锁模输出毫米波信号光源,其双模的模间距设计为毫米波的频率。

3)FP 激光器已有廉价的商业产品,工艺成熟,具有成本优势。

图 27 则是基于这种双模锁模自混频方式实现毫米波上下变频技术的双向 ToF 系统示意图。所有的光源均集中在总站,多个不同波长的 DFB 激光器用同一个外调制器进行调制,频率为 f_c/N ,经解复用后分别注入不同的 FP 激光器,通过注入锁模产生具有不同中心波长的双波长输出。其中一组双

波长(如中心波长为 λ_1 的一组)用一个外调制器加载数据或副载波,经光复用后用光纤传送到拉远基站 1,在 PD 中相干混频产生 100 GHz 毫米波副载波,经过射频放大、滤波后从天线发射出去。同时还从总站发送另一组没有经过调制的双波长(如中心波长为 λ_2 的一组)到拉远基站 1,从天线接收下来的 100 GHz 毫米波副载波信号经放大后调制这一组双波长(λ_2),这两个波长调制后产生的边带各有一个落在另一个波长上,经光滤波去掉另两个边带后复用到回传光纤上,传送到总站,再经过一次解复用(光滤波),只留下一个波长和另一个波长调制产生的边带,二者的相位是关联的,在 PD 中相干混频后直接输出数据(或中频信号)。这样在上行链路接收端省掉了高频混频器、滤波器等,从而大大降低了毫米波 ToF 光通信系统的成本。

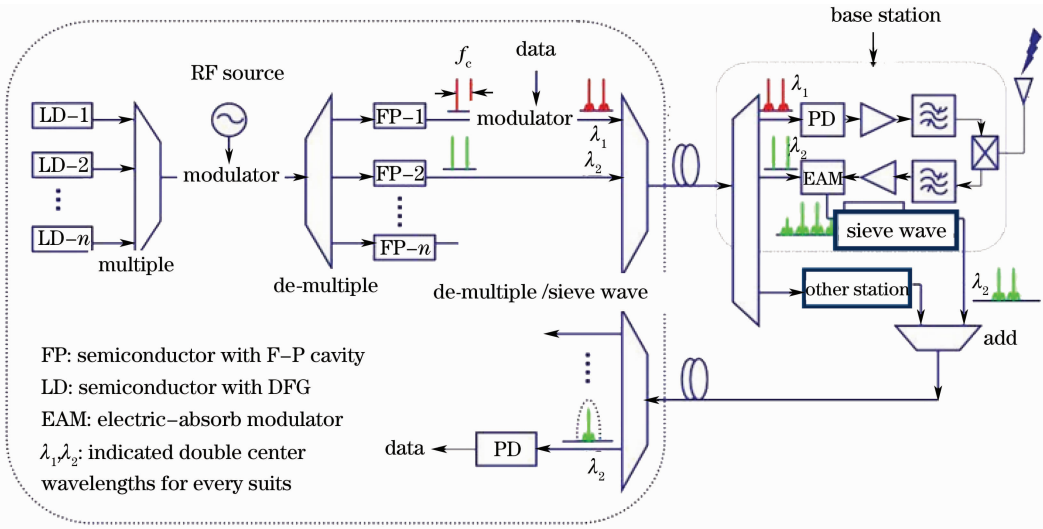


图 27 利用双模锁模自混频实现毫米波上下变频、调制,以及组成双向 ToF 链路系统示意图

Fig. 27 Diagram of up and down frequency conversion and modulation of mm wave, and two direction ToF system by double mode locking-self frequency mixing

在本方案中,将对 FP 激光器双模锁模特性进行详细实验研究,研究分析 FP 多模激光器的双模锁模机理,建立理论模型,对信噪比(SNR)的提高提

出建议。建立测试平台,考察锁定范围、射频源稳定性、光系统的稳定性等系统特性对本方案的影响,并提出解决办法。

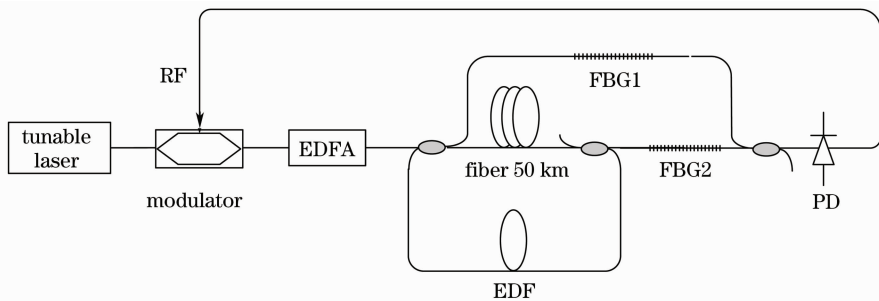


图 28 基于 SBS 效应高频微波光子产生及上变频方案

Fig. 28 Scheme of generation of high frequency micro wave photon and up frequency conversion based on SBS effect

需要说明的是,在图 26 的方案中,上行链路的毫米波直接通过外调制器调制到双波长上。另一个方法是将天线接收下来的毫米波信号经混频、滤波降到中频,再去调制光波。

(b)方案 2 —— 基于受激布里渊散射(SBS)效应的毫米波上下变频

基于 SBS 效应的全光产生 100 GHz 以上毫米

波方案,可通过图 28 表示。

这种方案应用在上变频技术中,可简化 ToF 系统结构,降低成本。同时,它也能应用于下变频技术,只要选取特定波长即可产生中频信号,实现新型同一系统的同时实现上下变频结构。其方案如图 29 所示。

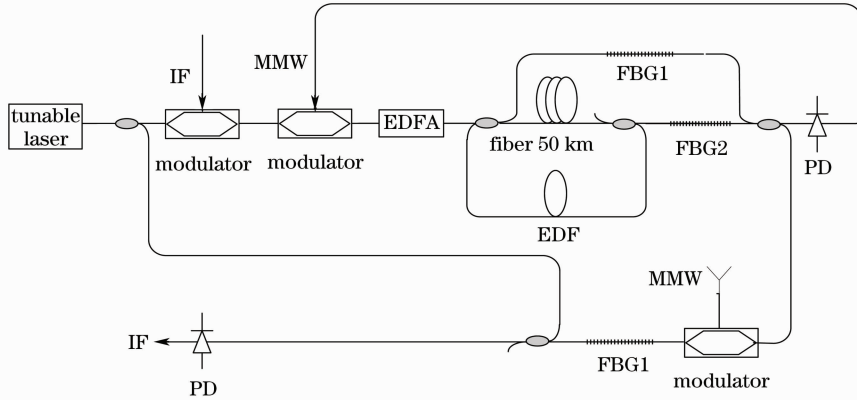


图 29 基于 SBS 效应的上下变频方案

Fig. 29 Scheme of up and down frequency conversion based on SBS effect

(c)方案 3 —— 载波抑制双边带调制

本方案的原理如图 30 所示,简单叙述如下:中心站采用多个光源,多路不同波长的光经过复用器进入调制器,用本地射频信号抑制载波双边带调制,每个波长的上边带和下边带的频率差即为下行传输的毫米波副载波频率。经过一个多波长分配模块(MWDM)的周期滤波作用后,同一通道的两个边带

分别输出到两个端口。其中一路用中频信号调制,同时控制另一束光偏振态;合路后信号为单边带调制信号,然后通过光纤传到远端节点。在远端节点,通过解复用器分开各路信号,并发送到各天线站;在天线站光电转换以后,以高频毫米波无线信号形式发送出去,实现微蜂窝或者微微蜂窝覆盖。

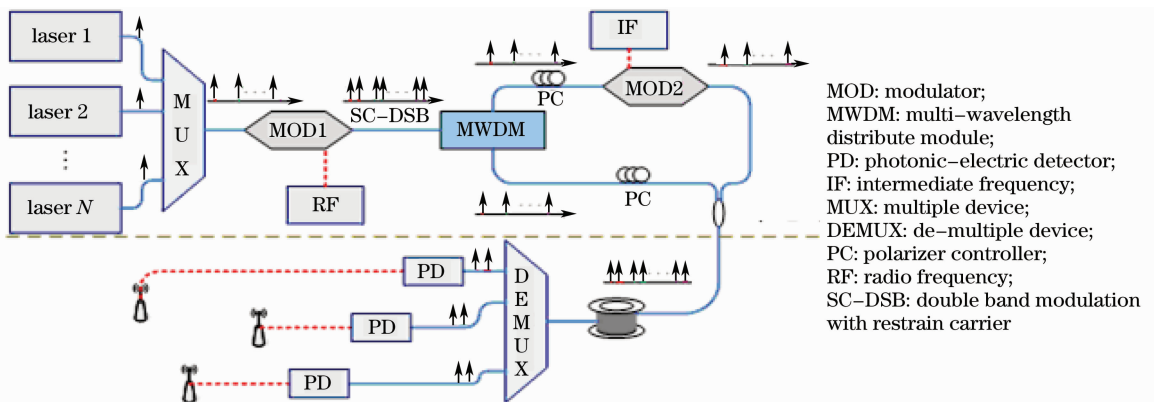


图 30 方案 3 及下行链路结构图

Fig. 30 Scheme 3 and downriver chain configuration

该方案的特点是:传统的中频数据调制结合光域上变频技术不但具有转换效率低、边频分量多、在接收端需要高性能射频滤波器等缺点,而且数据调制速率仍然受电子瓶颈的限制。本方案创新性地使用了相干光调制技术,能够在光域实现各种复杂格式的副载波数字信号调制。将多波长滤波技术应用于

WDM-ToF 系统中,还巧妙地将多路微波同时上变频技术、多波长单边带调制技术和宽带副载波信号全光产生技术有机结合在一起。这个方案具有转换效率高、无边频分量、信号接收简单、系统结构简单等特点,而且整个毫米波信号的产生传递过程,脱离了传统的对高频信号发生器、高频宽带混频器、高频

宽带合路器、滤波器等大量昂贵的毫米波器件电子瓶颈的限制,实现超高速信号的调制。

3.2.8.2 毫米波副载波的全光宽带多制式相位调制技术方案

调制方案通过图 31 表示。差频副载波源

(HSS)产生的光微波信号通过由环形器和光纤光栅(FBG)组成的解复用器后,被分为两个单频光信号。其中一个单频光信号经过光相位调制器(OPM)被数据基带信号调制,然后两路光合路干涉。由此则产生了携带数据信号的毫米波副载波。

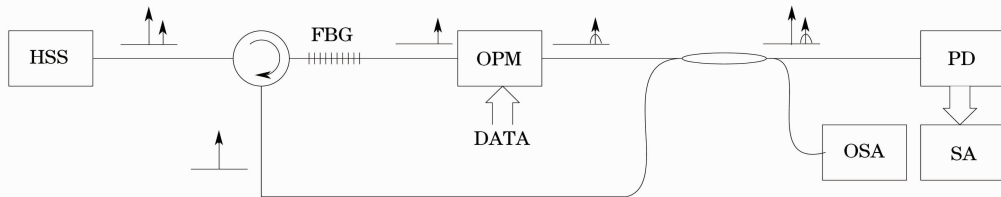


图 31 全光宽带多制式相位调制原理图

Fig. 31 Phase modulation principle diagram with all-optical wide band system

3.2.8.3 多路单边带调制毫米波 ToF 的波分复用/解复用方案

通过理论分析和实验,研究不同调制格式信号通过非平坦滤波器前后相应评价参数的变化,结合分析结果提出滤波器的设计要求,并通过提高滤波器性能或设计预失真电路,解决非平坦滤波器带来的信号性能恶化。

对于 FP 和 AWG 滤波器的性能要求,并对比该方案与其他多路单边带信号复用/解复用的技术,提出系统改进方向,并选用合适的器件搭建系统。通过计算与实验,结合相关工艺特点,提出系统小型化和集成化的方向,找出解决温度稳定性、偏振稳定性等问题的关键。

研究基于 FP 和阵列波导的多路单边带信号产生/上变频方案。通过计算、仿真和实验,提出系统

图 32 和图 33 分别是基于 FP 和 AWG 滤波器的多路单边带信号产生/上变频方案系统框图。

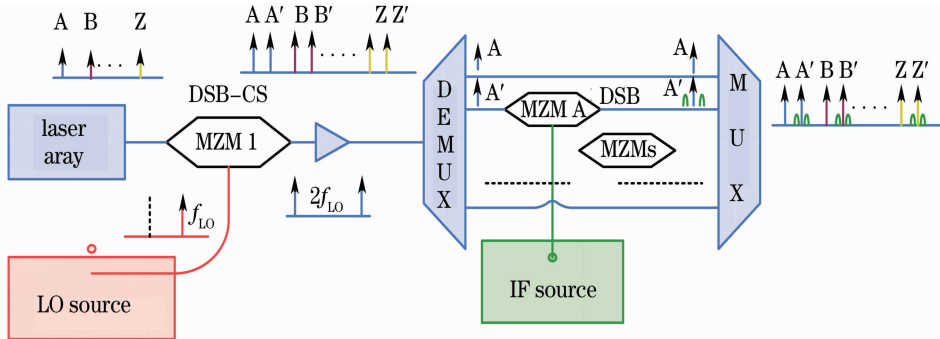


图 32 基于 FP 的多路单边带信号产生/上变频原理图

Fig. 32 Principle diagram of generation of multi-pathway single webbing signal and up-frequency conversion based on F-P effect

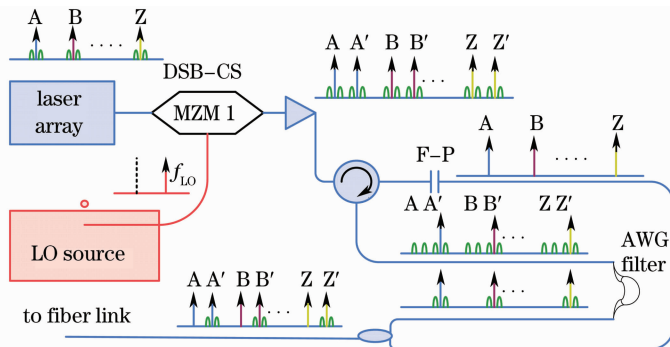


图 33 基于 AWG 的多路单边带信号产生/上变频原理图

Fig. 33 Principle diagram of generation of multi-pathway single webbing signal and up-frequency conversion based on AWG

3.2.8.4 毫米波 ToF 在光纤中传输的损伤机制和补偿技术研究

(a) ToF 系统中 100 GHz 副载波信号在光纤中传输性能研究

研究不同光学技术产生毫米波信号的相位噪声特性,进行光产生毫米波信号的相位噪声理论分析,提出消除方法。根据毫米波信号在 WDM 光纤链路中的不同问题(例如:色散,非线性效应,偏振模色散,WDM 串扰(XPM)和二阶谐波失真(2HD)等)建立各种类型的理论模型,通过数值模拟和软件仿真,对综合各种因素的影响进行理论分析。研究毫米波 WDM-ToF 系统中主要噪声来源,通过理论仿真与实验结合,评估它们对不同格式数字调制信号(例如:DPSK,QPSK,QAM 等)的损伤机制。

(b) 100 GHz-ToF 系统的信道评估和补偿研究

基于微波光子学与系统传输理论,利用 Weiner 系统进行建模,包括线性动态系统(无线信道)和静态非线性系统(光链路),并用 Hammerstein 系统进行反馈补偿建模。从而实现整个 ToF 系统对宽带无线信号的性能评估。针对毫米波 ToF 系统中毫米波副载波信号的不同损伤机制(噪声、色散、非线性效应,WDM 带内串扰等)导致的毫米波信号功率衰减、限制信号的动态范围、降低副载波的信噪比、增加信号的误码率,分别进行多波长单边带调制远程上变频技术、光学的结构实现 100 GHz 系统的非线性预失真补偿、色散管理抑制 WDM 带内串扰等补偿抑制技术研究。

4 太赫兹通信展望

4.1 太赫兹通信的应用展望

作为一个极具研究和应用前景的通信频道,其应用前景一直是各国研究人员的一大关注重点。预计 THz 通信将在以下几个领域得到广泛应用,甚至在一些领域带来革命性的改进。太赫兹技术具有极好的应用前景,可以为解决现在通信领域的一些问题提供相应方案。

4.1.1 高速短距离无线通信

随着无线通信网络对高速的要求越来越迫切,研究人员正在试图将频率往更高波段延伸,如 THz 波段。THz 波在空气中传播时很容易被其中的水分所吸收,因此它比较适合于短距离通信。有专家预言,在不远的将来无线 THz 网络将会取代无线局域网或蓝牙技术,成为短距离无线通信的主流技术。

4.1.2 光纤载太赫兹通信系统(ToF)及宽带无线安全接入

THz 波在通过大气时,由于水蒸气而导致的强吸收、低效率以及在目前可选的 THz 源中相对的低发射功率会给 THz 通信带来明显的不利,THz 通信面临的主要问题在于传输介质对于太赫兹波进行长距离传输时具有很大的损耗,从而导致使用频率的高频扩展受限。此外,电磁辐射对人体安全的影响也越来越得到人们的关注。因此,光纤波导 THz 通信系统(ToF)应运而生。其主要优点是实现了 THz 波和光线之间的转换,结合了微波和光纤通信的优势。

这一应用稍加改进,就可以作为家庭级、大楼级、村级高速无线通信网络。

4.1.3 宽带无线安全接入

随着 HDTV 等宽带多媒体广播的日益兴起,对室内的宽带无线通信需求日益迫切。由于高清电视等多媒体传输在无压缩情况下所需带宽已经在吉赫兹,目前的无线通信方法(包括正在研究的 UWB 等)均无法胜任;而采用 THz(100 GHz 以上)可以满足这一需求。

另外,现在计算机和通信网络、电视和电话已经成为我们日常生活当中的重要组成部分,而目前的军事活动等众多方面也越来越依赖于计算机和网络,太赫兹波具有极高的带宽,能够在该领域内发挥一些自身的优点,进行宽带无线安全接入。

4.1.4 宽带通信和高速信息网络

THz 波用于通信可以获得 10 Gb/s 的无线传输速度,比目前的超宽带技术快几百甚至上千倍之多,而且与可见光和红外相比它同时具有极高的方向性以及较强的云雾穿透能力,这就使得 THz 通信可以以极高的带宽进行高保密卫星通信。

由于 THz 频段位于红外线和高频无线电(主要用于移动电话和其他无线通信系统中)之间,并且该频率是目前手机通信频率的 1000 倍左右,所以它是很好的宽带信息载体,特别适合作卫星间、星地间及局域网的宽带移动通信。因此利用 THz 电磁波进行无线电通信,则可以极大地增宽无线电通信网络的频带,可望使无线移动高速信息网络成为现实。

4.1.5 太赫兹波空间通信

THz 波在 350,450,620,735 和 870 μm 波长附近存在着相对透明的大气窗口。与微波通信相比,THz 波束较窄,波束方向性好,可以实现外差接收,可以作定点保密通信或作宽频带、大容量的通信系

统,因此,是将来用于多媒体传输大容量无线通信的希望。在外层空间,THz波可以无损耗传输,用很小的功率就可实现远距离通信,而且相对于光谱通信来说,其波束较宽,容易对准,量子噪声较低,天线系统可以实现小型化、平面化。另外,THz波在空间技术上的另一个重要应用就是与重返大气层的飞行器,如导弹、人造卫星、宇宙飞船等进行通信和遥测。当飞行器重返大气层时,由于空气摩擦产生高温,飞行器周围的空气被电离形成等离子体,使通信遥测信号迅速衰减,造成信号中断。此时,THz波是一有效的通信工具。因此,THz波可以广泛应用于太空基地雷达和太空通信当中。

4.1.6 太赫兹通信在军事上的应用

THz波穿透云层、浓雾及伪装物的能力比红外线强。这一特性在军事和国防上使用很有价值。利用它可以制作高分辨率全天候的导航系统,在浓雾中导航,指挥飞机着陆。利用太赫兹波方向性强、能量集中的特点,可制作高分辨率的战场雷达和低仰角的跟踪雷达。

利用THz大气传输窗口也可进行THz波近距离战术通信。在某些情况下,鉴于战区作战地带通信声道的混乱和拥塞,有限的传输距离反而能成为优势,大气衰减能实现隐蔽的近距离通信,因为这些信号根本无法传播到远处敌人的潜听哨所。倘若太赫兹通信设备能够做得足够小而轻,那么则可实现以排级单位间的单兵之间的通信。

4.2 太赫兹通信的技术发展趋势

THz技术发展至今,作为一种新的通信频段和信号载体的出现,极大地促进了THz通信相关技术的大量发展。从THz源,到THz传输,THz调制方式,THz探测技术等都需要进一步的研究。作为THz通信的关键部分,今后的研究还将集中在以下几个方面:

1)继续研究高功率的THz源。从目前的研究看,通信系统还需要解决输出功率低的问题。在研究合适的THz源时,还应考虑稳定、高效、环保的技术要求。THz波应用在空间通信、短距离高速通信对THz源的要求很高。

2)THz波传输性能的研究。THz波传输性质目前的理论和实践研究都还不够。对于THz通信,将会存在两个研究趋势。一是从电子领域,即从微波向毫米波、亚毫米波以至于THz波方向研究;一是从光频向低频长波长的THz波方向靠拢。呈现出两头向中间靠拢的研究趋势。

3)研究合适THz信道传输的调制技术和调制器件。从信号传输的角度看,对于信号还需要研究放大、去噪、滤波、解调等过程。

4)进一步优化高灵敏的THz探测技术。这个方面还将涉及到THz波的传输环境对探测技术的影响。还应考虑THz信号的处理过程,研究合适高效的电子处理技术。

5 结束语

THz通信是一个极具应用前景的技术,THz波有非常宽的还没分配的频带,并且具有速率高、方向性好、安全性高、散射小、穿透性好等许多特性。发展THz通信技术成为各国研究热点。无论从技术上还是战略上,研究THz通信都具有必要性。

THz通信必将给通信系统带来很大技术进步,解决目前面临的一些技术问题,同时给新的应用提供了技术支持。在高速无线技术进一步发展,高速率的趋势必然会向更高频率的THz频段发展,而作为主干网上成熟的光通信,在接入网和无线化移动化的发展要求下,也必然会寻求与毫米波亚毫米波相结合。另外,在国际安全和空间通信方面,THz波也表现出很多优秀的性质,具有很大的发展潜力。

对我国而言,发展THz通信,可以抢占300GHz以上空白带宽资源,使得我国科研组织参与制定国际标准化组织ITU和IEEE等关于THz通信相应标准,拓展无线通信带宽,实现宽带无线严格有限范围内安全接入,实现高传输速率及高可靠性安全性的新一代无线通信网络,从战略上和技术上抢占研究的制高点,掌握核心技术,走在THz通信的技术前沿。

参 考 文 献

- 1 See: <http://www.ntia.doc.gov/osmhome/allochrt.pdf>
- 2 Ken Suto, Jun-ichi Nishizawa. Developments of terahertz wave generation technologies[C]. *SPIE*, 2004, **5401**: 311~317
- 3 A. Charles, Schmuttenmaer. Exploring dynamics in the far-infrared with terahertz spectroscopy[J]. *Chem. Rev.*, 2004, **104**: 1759~1779
- 4 M. Nagel, P. H. Bolivae, M. Brucherseifer *et al.*. Integrated Thz technology for label-free genetic diagnostics[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**: 154~156
- 5 Radoslaw Piesiewicz, Martin Jacob, Martin Kochet *et al.*. Performance analysis of future multigigabit wireless communication systems at THz frequencies with highly directive antennas in realistic indoor environments[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2008, **14**(2): 421~430
- 6 Akihiko Hirata, Toshihiko Kosugi, Hiroyuki Takahashi *et al.*. 120-GHz-band millimeter-wave photonic wireless link for 10-Gb/s data transmission[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory*

- and Technology*, 2006, **54**(05): 1937~1944
- 7 Tadao Nagatsuma, Akihiko Hirata. 10-Gbit/s wireless link technology using the 120-GHz band. *Letters[J]*. *NTT Technical Review*, 2004; 58~62
 - 8 T. Kosugi, M. Tokumitsu, T. Enoki *et al.*. 120-GHz Tx/Rx chipset for 10-Gbit/s wireless applications using 0.1- μ m-gate InP HEMTs[C]. IEEE, Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, 2004. 171~174
 - 9 Ryoichi Yamaguchi, Akihiko Hirata, Toshihiko Kosugi *et al.*. 10-Gbit/s MMIC wireless link exceeding 800 meters[C]. IEEE, Radio and Wireless Symposium, 2008. 695~698
 - 10 Martin Koch. Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects[M]. Terahertz Communication; A 2020 Vision. 2007. 325~338
 - 11 Crowe, T. W. Multiplier technology for terahertz applications [C]. IEEE, Terahertz Electronics Proceedings, 1998. 58~61
 - 12 Michael J. Fitch, Robert Osiander. Terahertz waves for communications and sensing[J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2004, **25**(4): 348~355
 - 13 Shen Jin-e, Rong Jian, Liu Wenxin. Progress of terahertz in communication technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(s3): 333~347
申金娥, 荣健, 刘文鑫. 太赫兹技术在通信方面的研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(s3): 333~347
 - 14 S. Cherry. Edholm's law of bandwidth[J]. *IEEE Spectr*, 2004, **41**(7): 58~60
 - 15 Tadao Nagatsuma, Akihiko Hirata, Naoya Kukutsu *et al.*. Multiplexed transmission of uncompressed HDTV signals using 120-GHz-band millimeter-wave wireless link[J]. *IEEE*, 2007, 1-4244-1168-8/07; 237~240
 - 16 Wai Hung, Chun-Kit Chan, Lian-Kuan Chen *et al.*. An optical network unit for WDM access networks with downstream DPSK and upstream remodulated OOK data using injection-locked FP laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(10): 1476~1478
 - 17 A. Hirata, M. Harada, T. Nagatsuma. 120-GHz wireless link using photonic techniques for generation, modulation and emission of millimeter-wave signals[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(10): 2145~53
 - 18 Akihiko Hirata, Toshihiko Kosugi, Nicholas Meisl *et al.*. High-directivity photonic emitter using photodiode module integrated with HEMT amplifier for 10-Gbit/s wireless link [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 2004, **52**(8): 1843~1850
 - 19 Tadao Nagatsuma. Exploring sub-terahertz waves for future wireless communications[C]. IEEE, IRMMW-THz 2006, Joint 31st International Conference. 4
 - 20 F. Nakajima, T. Furuta, H. Ito. High power terahertz wave generation using a resonant antenna integrated uni-travelling-carrier photodiode [J]. *Nippon Telegraph and Telephone Corporation*, 2006, **40**(20): 1297~1298
 - 21 T. Nagatsuma, A. Hirata, R. Yamaguchi *et al.*. Sub-terahertz wireless communications technologies[C]. IEEE, ICECom 2005, 18th International Conference. 1~4
 - 22 Toshihiko Kosugi, Masami Tokumitsu, Koichi Murata *et al.*. 120-GHz Tx/Rx waveguide modules for 10-Gb/s wireless link system[J]. *IEEE*, 2006, 1-4244-0126-7/06; 25~28
 - 23 Ho-Jin Song, Naofumi Shimizu, Tomofumi Furuta *et al.*. Broadband-frequency-tunable sub-terahertz wave generation using an optical comb, AWGs, optical switches, and a uni-traveling carrier photodiode for spectroscopic applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(15): 2521~2530
 - 24 Akihiko Hirata, Hiroyuki Takahashi, Ryoichi Yamaguchi *et al.*. Transmission characteristics of 120-GHz-band wireless link using radio-on-fiber technologies[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(15): 2338~2344
 - 25 T. Kleine-Ostmann, K. Pierz, G. Hein *et al.*. Audio signal transmission over THz communication channel using semiconductor modulator [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(2): 124~126
 - 26 T. Kleine-Ostmann, P. Dawson, K. Pierz *et al.*. Room-temperature operation of an electrically driven terahertz modulator[J]. *Appl. Phys. Lett.*, **84**(18): 3555~3557
 - 27 R. Piesiewicz, T. Kleine-Ostmann, N. Krumbholz *et al.*. Concept and perspectives of future ultra broadband THz communication systems[J]. *IEEE*, 2006, 4-244-0400-2/06; 96
 - 28 N. Krumbholz, K. Gerlach, F. Rutz *et al.*. Omnidirectional terahertz mirrors: A key element for future terahertz communication systems [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**: 202905-1-3
 - 29 Thomas Kurner, Radoslaw Piesiewicz, Martin Koch *et al.*. Propagation models, measurements and simulations for wireless communication systems beyond 100 GHz [J]. *IEEE*, 2007, 1-4244-0767-2/07; 108~111
 - 30 Radoslaw Piesiewicz, Martin Jacob, Joerg Schoebel *et al.*. Influence of hardware parameters on the performance of future indoor THz communication systems under realistic propagation conditions[J]. *EuMA*, 2007, 978-2-87487-001-9: 1606~1609
 - 31 Radoslaw Piesiewicz, Christian Jansen, Daniel Mittleman *et al.*. Scattering analysis for the modeling of THz communication systems[J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2007, **55**(11): 3002~3009
 - 32 C. Jastrow, K. Munter, R. Piesiewicz *et al.*. 300 GHz transmission system [J]. *Electron. Lett.*, 2008, **44**(3): 213~214
 - 33 Ibraheem A. Ibraheem, Norman Krumbholz, Daniel Mittleman *et al.*. Low-dispersive dielectric mirrors for future wireless terahertz communication systems [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2008, **18**(1): 67~69
 - 34 Ibraheem A. Ibraheem, Norman Krumbholz, Daniel Mittleman *et al.*. Low-dispersive dielectric reflectors for future wireless terahertz communication systems [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2008, 978-1-4244-1438-3: 930~931
 - 35 M. Koch. Terahertz applications and techniques[J]. *OSA*, 2006, 1-55752-830-6
 - 36 Christian Jansen, Radoslaw Piesiewicz, Daniel Mittleman *et al.*. The impact of reflections from stratified building materials on the wave propagation in future indoor terahertz communication systems[J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2008, **55**(5): 1413~1419
 - 37 Q. Chen, Z. Jiang, X. C. Zhang. All-optical THz imaging[C]. *SPIE*, 1999, **3617**: 98~105
 - 38 A. Menikh, R. MacColl, C. A. Mannella *et al.*. Terahertz biosensing technology: Frontiers and progress[J]. *Chem. Phys. Chem.*, 2002, **3**: 655~658
 - 39 Qi Wu, Xi-Cheng Zhang. Design and characterization of traveling-wave electro-optic terahertz sensors[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1996, **2**(3): 693~700
 - 40 K. Liu, X. Zhang, J. Xu. GaSe crystals for broadband terahertz wave detection[J]. *US Patent Appl.*, 2005, **85**(6): 863~865
 - 41 H. Zhong, J. Xu, X. Xie *et al.*. Nondestructive defect identification with terahertz time-of-flight tomography[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, **5**(2): 203~208
 - 42 N. M. Froberg, B. B. Hu, X. C. Zhang *et al.*. Terahertz radiation from a photoconducting antenna array[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(10): 2291~2301
 - 43 <http://www.cas.cn/10000/10003/10000/2009/134952.htm>
 - 44 Wang Zhuo, Yao Jian-quan. Research on THz wave created by ZnGeP₂ crystal[J]. *Science Technology and Engineering*, 2007,

- 17(13): 3101~3103
王 卓, 姚建铨. ZnGeP₂ 晶体差频产生 THz 波的研究[J]. 科学与技术, 2007, **17**(13): 3101~3103
- 45 Yao Jianquan, Lu Yang, Zhang Baigang *et al.*. New research progress of THz radiation[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(4): 503~507
姚建铨, 路 洋, 张百钢 等. THz 辐射的研究和应用新进展[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(4): 503~507
- 46 Sun Bo, Yao Jianquan. Generation of terahertz wave based on optical methods [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33** (10): 1349~1359
孙 博, 姚建铨. 基于光学方法的太赫兹辐射源[J]. 中国激光, 2006, **33**(10): 1349~1359
- 47 Y. Lu, B. G. Zhang, Y. Z *et al.*. Analysis of surface-emitted terahertz-wave difference frequency generation in slant-stripe-type MgO-doped periodically poled lithium niobate [C]. *Conference Digest of the 2006 Joint 31ST International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14TH International Conference on Terahertz Electronics*, 2006, 103
- 48 T. L. Zhang, X. Y. Zhu, P. Zhao *et al.*. Widely tunable, dual-signal-wave optical parametric oscillator for terahertz generation by using two periodically poled crystals[C]. *Conference Digest of the 2006 Joint 31ST International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14TH International Conference on Terahertz Electronics*, 2006, 104
- 49 Yuye Wang, Baigang Zhang, Yizhong Yu *et al.*. Theoretical study of dual-wavelength PPKTP-OPO as a source of DFG THz-wave[J]. *Conference Digest of the 2006 Joint 31ST International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14TH International Conference on Terahertz Electronics*, 2006, 105
- 50 B. Sun, J. Q. Yao, Z. Wang *et al.*. Study of tunable terahertz-wave generation in isotropic semiconductor crystals based on dual-wavelength KTP-OPO operating near degenerate point [C]. *Conference Digest of the 2006 Joint 31ST International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14TH International Conference on Terahertz Electronics*, 2006, 107
- 51 P. Zhao, B. G. Zhang, Y. Z. Yu *et al.*. Theoretical investigation of dual-wavelength terahertz wave generation based on slant-stripe-type periodic poled lithium niobate crystal[C]. *Conference Digest of the 2006 Joint 31ST International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14TH International Conference on Terahertz Electronics*, 2006, 109
- 52 H. Liu, D. G. Xu, P. Zhao *et al.*. Propagation characteristics of two-dimensional photonic crystals in the terahertz range[C]. *Conference Digest of the 2006 Joint 31ST International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14TH International Conference on Terahertz Electronics*, 2006, 238~238
- 53 Huan Liu, Jianquan Yao, Degang Xu *et al.*. Characteristics of photonic band gaps in woodpile three-dimensional terahertz photonic crystals[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(2): 695~703
- 54 Liu Huan, Yao Jianquan, Xu Degang *et al.*. Propagation characteristics of two-dimensional photonic crystals in the terahertz range[J]. *Appl. Phys. B-Lasers and Optics*, 2007, **87**(1): 57~63
- 55 Youfu Geng, Xiaoling Tan, Peng Wang *et al.*. Design of terahertz photonic crystal fiber by finite difference frequency domain method[J]. *J. Optics; Pure and Applied Optics*, 2007, **9**(11): 1019~1023
- 56 Liu Huan, Yao Jian-Quan, Zheng Fang-Hua *et al.*. A novel woodpile three-dimensional terahertz photonic crystal[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24**(5): 1290~1293
- 57 Sun Bo, Yao Jianquan, Wang Zhuo *et al.*. Study of tunable terahertz-wave generation via difference frequency mixing in isotropic semiconductor crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(3): 1390~1396
孙 博, 姚建铨, 王 卓. 利用各向同性半导体晶体差频产生可调谐 THz 辐射的理论研究[J]. 物理学报, 2007, **56**(3): 1390~1396
- 58 He Zhihong, Yao Jianquan, Shi Huafeng *et al.*. Semiclassical theory of optically pumped D₂O gas tera-Hz laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(10): 5802~5807
何志红, 姚建铨, 时华锋 等. 光泵重水气体产生 THz 激光的半经典理论分析[J]. 物理学报, 2007, **56**(10): 5802~5807
- 59 He Zhihong, Yao Jianquan, Shi Huafeng *et al.*. Effect of pump laser intensity on optically pumped D₂O gas terahertz laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(11): 6451~6456
何志红, 姚建铨, 时华锋 等. 抽运光强度对光学抽运重水气体产生 THz 激光的影响分析[J]. 物理学报, 2007, **56**(11): 6451~6456
- 60 Yangxiang Bao, Xiao Huang, Zhihong He *et al.*. Effects of pump source on spectra of optically pumped sub-millimeter wave laser [J]. *International J. Infrared and Millimeter Waves*, 2006, **27**: 1315~1322
- 61 Sun Bo, Yao Jianquan, Zhang Baigang *et al.*. Theoretical study of phase-matching properties for tunable terahertz-wave generation in isotropic nonlinear crystals [J]. *Optoelectronic Letters*, 2007, **53**(2): 152~156
- 62 Geng Youfu, Tan Xiaoling, Wang Peng *et al.*. Transmission loss and dispersion in plastic terahertz photonic band-gap fibers[J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 2008, **91**(2): 333~336
- 63 Li Jiusheng, Yao Jianquan. Novel optical controllable terahertz wave switch[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(23): 5697~5700
- 64 Li Jiusheng, Yao Jianquan. Controllable terahertz wave attenuator [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, **50**(7): 1810~1812
- 65 Geng Youfu, Tan Xiaoling, Zhong Kai *et al.*. Low loss plastic terahertz photonic band-gap fibers[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(11): 3961~3963
- 66 Li Jiusheng, Yao Jianquan. Controllable terahertz wave attenuator [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, **50**(7): 1810~1812
- 67 He Zhihong, Yao Jianquan, Ren Xia *et al.*. Study of optimal gas pressure in optically pumped D₂O gas terahertz laser [C]. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2008, **6840**: 84004~84004
- 68 Liu Huan, Xu Degang, Yao Jianquan. Theoretical study of tunable terahertz radiation based on difference-frequency generation in GaSe and ZnGeP₂ crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(9): 5662~5669
刘 欢, 徐德刚, 姚建铨. 基于 GaSe 和 ZnGeP₂ 晶体差频产生可调谐太赫兹辐射的理论研究[J]. 物理学报, 2008, **57**(9): 5662~5669
- 69 Zheng Fanghua, Liu Huan, Li Xifu *et al.*. Simultaneous dual-wavelength quasi-continuous-wave laser-diode-end-pumped Nd:YAG laser for terahertz wave source [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 200~205
郑芳华, 刘 欢, 李喜福 等. 产生太赫兹辐射源的 Nd:YAG 双波长准连续激光器[J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 200~205
- 70 He Zhihong, Yao Jianquan, Ren Xia *et al.*. Experimental and theoretical research on a compact superradiant optically pumped D₂O gas terahertz laser [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(1): 34~37
何志红, 姚建铨, 任 侠 等. 紧凑型超辐射光泵重气体 THz 激光器的研制[J]. 光电子·激光, 2008, **19**(1): 34~37
- 71 Huang Lei, Sun Bo, Yao Jianquan *et al.*. Collinear phase-matching study of terahertz-wave generation via difference frequency mixed in GaAs and InP [J]. *Optoelectronics Letters*, 2008, **4**(3): 234~238
- 72 Liu Huan, Zheng Fanghua, Yao Jianquan. A simultaneous dual-

- wavelength diode-end-pumped Nd:YAG laser operating at 1319 nm and 1338 nm: a pumping source for high coherent terahertz generation[C]. *2007 Conference on Lasers and Electro Optics and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2008, 782~783
- 73 He Zhihong, Yao Jianquan, Shi Huafeng *et al.*. The numerical calculation and analyze of the pulse-laser pumped D₂O gas terahertz laser[C]. *2007 Joint 32nd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and the 15th International Conference on Terahertz Electronics (IRMMW-THz)*, 2008, 470~471
- 74 Cao Tieling, Yao Jianquan, Zheng Yi. Ways of wavelength mesasurement of terahertz wave based on Fabry-Perot interferometer[J]. *Optical Instruments*, 2008, **30**(2): 13~16
曹铁岭, 姚建铨, 郑义. 基于法布里-珀罗干涉仪的太赫兹波长测试方法[J]. *光学仪器*, 2008, **30**(2): 13~16
- 75 Zhang Zhenwei, Cui Weili, Zang Yang *et al.*. Terahertz time-domain spectroscopy imaging[J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2006, **25**(3): 217~220
张振伟, 崔伟丽, 张岩等. 太赫兹成像技术的实验研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(3): 217~220
- 76 Peter H. Siegel. Terahertz technolog [J]. *Transactions on microwave theory and theory and techniques*, 2002, **50**(3): 910~928
- 77 Daryoosh Saeedkia, Amir Hamed Majedi, Safieddin Safavi-Naeini *et al.*. Analysis and design of a photoconductive integrated photomixer/antenna for terahertz applications[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(2): 234~241
- 78 D. Saeedkia, R. R. Mansour, S. Safavi-Naeini. The interaction of laser and photoconductor in a continuous-wave terahertz photomixer[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(9): 1188~1196
- 79 Y. M. Zhu, T. Unuma, K. Shibata *et al.*. Power dissipation spectra and terahertz intervalley transfer gain in bulk GaAs under high electric fields[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**: 232102
- 80 D. Saeedkia, R. R. Mansour, S. Safavi-Naeini. Modeling and analysis of high-temperature superconductive terahertz photo mixers[J]. *IEEE Trans. Appl. Super Cond.*, 2005, **15**(3): 3847~385
- 81 A. Karpov, D. Miller, F. Rice *et al.*. Low noise 1.2 THz SIS receiver[C]. in *8th Int. Superconduct. Electron. Conf.*, 2001, June 19-22: 521~522
- 82 M. Kroug, S. Cherednichenko, M. Choumas *et al.*. HEB quasioptical heterodyne receiver for THz frequencies[C]. *Proc. 12th Int. Space Terahertz Technol.*, 2001, 244
- 83 M. C. Gaidis, H. M. Pickett, C. D. Smith *et al.*. A 2.5 THz receiver frongt-end for spaceborne applications [J]. *IEEE Trans-MTT*, 2000, **48**(4): 733~739
- 84 D. Veksler, F. Aniel, S. Romyantsev *et al.*. GaN heterodimensional schottky diode for THz detection[J]. *IEEE Sensors*, 2006, 1-4244-0376-6: 323~326
- 85 J. C. Cao, H. C. Liu, C. Y. Song *et al.*. Terahertz quantum-well photodetector [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(20): 4068~4070
- 86 Cao Juncheng. Terahertz semiconductor detectors[J]. *Physics*, 2006, **35**(11): 953~956
曹俊诚. 太赫兹半导体探测器研究进展[J]. *物理*, 2006, **35**(11): 953~956
- 87 H. Schneider, H. C. Liu. Quantum Well Infrared Photo-Detectors[M]. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2006, 45
- 88 J. M. Dai, X. Xie, X. C. Zhang. Detection of broadband terahertz waves with a laser-induced plasma in gases[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(10): 103903
- 89 Chiko Otani1, Ran Nakano2, Tohru Taino2 *et al.*. Direct and indirect detection of terahertz waves using a Nb-based superconducting tunnel junction [J]. *J. Physics, Conference Series* 43, 2006: 1303~1306
- 90 Feng Yong, Zhang Ping. Study on reliable transmission of H. 264-encoded video streams based on turbo channel coding[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2009, **37**(2): 146~148
冯勇, 张平. 基于 Turbo 信道编码的 H. 264 视频流的可靠传输研究[J]. *计算机与数字工程*, 2009, **37**(2): 146~148
- 91 B. Park, H. Cheon, C. Kang *et al.*. A novel timing estimation method for OFDM systems[J]. *IEEE Communications Letter*, 2003, **7**(5): 239~241
- 92 W. Shieh, H. Bao, Y. Tang. Coherent optical OFDM: theory and design[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 841~859
- 93 Zhao Rui, Yu Fei, Yang Lüxi. Relay-aided cooperative communication networks [J]. *ZTE Communications*, 2008, **14**(13): 22~25
赵睿, 俞菲, 杨绿溪. 中继辅助协同通信网[J]. *中兴通讯技术*, 2008, **14**(13): 22~25