

文章编号: 2095-4980(2014)01-0001-13

太赫兹高速无线通信: 体制、技术与验证系统

张 健^{a,b}, 邓贤进^{a,b}, 王 成^{a,b}, 林长星^{a,b}, 陆 彬^{a,b}, 陈 琦^{a,b}

(中国工程物理研究院 a. 电子工程研究所; b. 太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 对太赫兹高速无线通信的国内外现状和发展趋势进行了全面的综述与分析。首先介绍了太赫兹通信的特点、频段和调制体制。在此基础上详细讨论了太赫兹无线通信的关键技术, 包括太赫兹产生和功率放大技术、太赫兹接收检测技术、太赫兹调制解调技术、太赫兹传输技术、太赫兹高速通信数据流和网络协议技术、太赫兹集成微系统技术; 然后重点介绍了日本、德国、美国和中国的几个典型的太赫兹通信验证系统; 最后对太赫兹高速无线通信的应用和发展进行了展望。

关键词: 太赫兹; 无线通信; 调制; 倍频; 太赫兹单片集成电路; 功率放大; 集成微系统

中图分类号: TN78

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201401.0013

Terahertz high speed wireless communications: systems, techniques and demonstrations

ZHANG Jian^{a,b}, DENG Xian-jin^{a,b}, WANG Cheng^{a,b}, LIN Chang-xing^{a,b}, LU Bin^{a,b}, CHEN Qi^{a,b}

(a. Institute of Electronic Engineering; b. Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The present research state and future development tendency of terahertz high speed wireless communication at home and abroad are reviewed and analyzed comprehensively. Firstly, the features, frequency band and modulation mode of terahertz communications are introduced. And then the key techniques of terahertz communications, including terahertz generation, amplifier, detection, modulation/demodulation and transmission are discussed, as well as high speed data stream construction, network protocols and integrated microsystems technology. Several typical terahertz communication demonstration systems developed in Japan, Germany, America and China are also highlighted. Perspectives on the applications of terahertz high speed wireless communication and further research directions are presented at last.

Key words: terahertz; wireless communication; modulation; frequency multiplication; Terahertz Monolithic Integrated Circuit; power amplifier; integrated microsystems

太赫兹(Terahertz, THz)波是指频率为 0.1 THz~10 THz、波长为 3 mm~30 μm 的电磁波, 其频段介于毫米波与远红外光之间。太赫兹科学技术发展至今, 大致经历了三个阶段: 第一阶段始于上世纪中后期天文学领域对太赫兹光谱及其检测技术的研究(至今仍是太赫兹的一个重要研究方向), 当时还不叫“太赫兹”, 一般称为“亚毫米波”或“远红外光”; 第二阶段是 20 世纪 90 年代以来, 由于飞秒激光、光电导开关、光整流等技术的发展, 超宽谱太赫兹源、时域光谱分析、光谱成像等技术迅速发展并开始得到一定应用, 同时自由电子激光、量子级联激光、气体激光等太赫兹源也得到较大发展, 形成了太赫兹光电子学与太赫兹光子学等重要研究方向; 第三阶段是近 10 年来, 基于 III-V 族化合物半导体和锗硅半导体的固态电子学太赫兹源与检测器件, 以及电真空太赫兹器件取得了重要突破, 频段已达到 1 THz 以上, 并推动了太赫兹通信、雷达和成像等技术的发展, 太赫兹电子学及其在通信、雷达与成像中的应用技术成为太赫兹的重要研究方向, 掀起了太赫兹研究的新高潮。目前, 科学家和工程师正在致力于把电磁理论与量子理论结合起来形成新的太赫兹物理理论, 把电子学、光电子学与光子学结合起来形成太赫兹产生、调控、传输与检测的新技术, 期望真正解决太赫兹源的功率和效率难以提高、太赫兹难

以调控以及太赫兹检测灵敏度低等难题,从而填补“太赫兹间隙(THz Gap)”,实现太赫兹的广泛应用,太赫兹正逐渐成为一门相对独立的新学科^[1-2]。太赫兹高速无线通信^[3-6]是太赫兹的一个重要研究方向,本文将从体制、技术与验证系统等方面对太赫兹高速无线通信的进展进行评述。

1 太赫兹无线通信体制

1.1 太赫兹无线通信的特点

太赫兹无线通信是在传统无线电通信的基础上,从微波、毫米波频段向太赫兹频段发展,同时结合了激光无线通信的部分思想。太赫兹通信不是代替微波通信和激光通信,但它具有很多微波通信和激光通信所不具备的独特优势。

微波无线通信发展很早,已得到广泛应用,是目前无线通信的主要频段。30 GHz 以上毫米波无线通信也逐步得到广泛应用,如空间通信(天—地: 31 GHz,45 GHz; 天—天: 60 GHz)、无线接入与无线局域网通信(60 GHz)等。目前微波毫米波无线通信的速率基本不超过 1 Gbps。太赫兹通信相比较于微波通信而言: a) 太赫兹通信传输的速率高、容量大,太赫兹波的频段在 10^{11} Hz~ 10^{13} Hz 之间,具有很宽的瞬时带宽,可提供 Gbps 以上到 100 Gbps 甚至更高的无线传输速率,这是目前微波通信无法实现的; b) 太赫兹波束更窄,方向性更好,还可采用扩频、跳频技术实现更好的保密性及抗干扰抗截获能力; c) 太赫兹波长更短,太赫兹器件、天线和系统可以做得更小更紧凑。

激光有线通信(光纤通信)可实现很高的速率,已得到了广泛应用。激光无线通信^[7]包括空间激光通信、大气激光通信、水下激光通信等。空间激光通信对瞄准捕获跟踪(Pointing Acquisition and Tracking, PAT)要求很高。大气激光通信尽管在调制解调技术方面可实现很高的速率,但由于大气湍流闪烁效应,引起折射率波动。激光传输一定距离后,其平坦波前受到破坏,传输速率和传输距离受到极大制约,实际应用的激光大气通信不超过 2.5 Gbps(大多为 155 Mbps 和 622 Mbps),最大传输距离为几公里范围,直到最近才有采用正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术在仿真的大气环境中达到 10 Gbps 的实验报道^[3]。太赫兹通信相比较于激光通信而言: a) 太赫兹传输的闪烁效应远小于红外激光,传输速率可以更高; b) 太赫兹波具有很好的穿透沙尘烟雾的能力,可在恶劣环境下进行正常通信; c) 太赫兹通信对 PAT 的要求相对较低。

太赫兹无线通信系统的构成和一般的无线通信系统基本相同,包括信源编码、信道编码、调制发射机、发射天线、无线信道、接收天线、解调接收机、信道解码、信源解码等,各部分的原理也与一般的无线通信基本相同。

太赫兹无线通信系统的设计首先要考虑以下几个因素:通信频段选择、通信速率与带宽要求、调制解调体制的选择等。这几个因素是进一步设计太赫兹源、检测器和天线的基础。

1.2 太赫兹无线通信频段选择

太赫兹无线通信的频段主要可分为两段: a) 0.1 THz~1 THz 的太赫兹低频段: 在 0.1 THz~0.4 THz 之间存在 0.14 THz,0.24 THz,0.34 THz 几个大气衰减较低的“窗口”,可用于远距离空间通信、中距离地面点对点通信和近距离无线个域网等(同微波通信相比,其带宽和速率的优势十分明显,这是太赫兹高速通信的主要频段); 0.4 THz~1 THz 的大气衰减很大,即使是相对较低的几个“窗口”,大气衰减也在数十 dB/km 以上,只能用于近距离(一般为 100 m 以内)大气通信或远距离空间通信。b) 1 THz 以上的太赫兹高频段: 大气衰减更大,同时在这个频段受调制技术的制约和大气衰减的影响,目前的传输速率较低,距离很近,还处于科学研究阶段,将来可用于空间通信(也有人认为与空间激光通信相比,其优势不明显)。

太赫兹大气窗口频段的衰减有一些数据可供参考^[5],但其传输信道的幅度、频率、相位特性还有待进一步理论和实验研究。另外太赫兹是否存在一些很透明的“微窗口”(带宽较窄但大气衰减很低的窗口)是一个在理论和实际应用上很有价值的研究课题。

1.3 太赫兹无线通信的调制体制

当通信频段确定后,调制解调体制、太赫兹源与检测的实现方式是决定太赫兹无线通信技术体制的主要因素,并将影响通信速率、通信带宽、通信距离等性能。

调制是用待传输的数据或信号控制太赫兹载波的某些参数(如幅度、频率、相位等),使太赫兹载波的这些参数随着数据或信号的变化而变化。解调是与调制相反的过程。调制体制是通信研究的主要问题。

太赫兹调制可分为直接调制和变频调制两大类。直接调制是直接在发送载波频率上进行内部或外部调制,内

部调制是在太赫兹源上直接进行调制,即用信号或数据控制太赫兹源的某个参数变化实现调制;外部调制器则独立于太赫兹源。变频调制包括光调制之后下变频、中频(或者是基带,即零中频)调制之后上变频 2 种。变频调制可采用成熟的光调制或电子学调制技术。

太赫兹调制也可分为模拟调制、数字调制。模拟调制主要包括调幅、调频、脉冲位置调制等。数字调制包括二元调制和多元调制,二元调制如典型的幅移键控(Amplitude Shift Keying, ASK)、启闭键控(On-OFF Keying, OOK)等;多元调制如多元幅相正交调制 MPSK(Multi Phase Shift Keying), MQAM(Multi Quadrature Amplitude Modulation)和多元脉冲位置键控(Pulse Position Keying, PPK)等。

目前的太赫兹通信系统大都采用以下 3 种调制体制之一: a) 二元幅度调制(ASK, OOK 等), 易于实现超高速通信, 对信道幅相特性要求不高, 但占用带宽太宽, 适合于近距离超高速应用; b) 幅度和相位多元正交调制(PSK、QAM 等), 带宽效率高, 便于与电真空放大器级联, 适合于远距离通信应用, 但对信道幅相特性要求较高, 调制解调和信道均衡等信号处理复杂; c) 脉冲位置调制 PPM/OOK, 即先作脉冲位置调制再作启闭键控幅度调制, 实现简单, 能量效率高, 但带宽效率不高, 一般用于能量受限场合。

由于太赫兹可用信道较宽, 单信道的传输速率可以很高。但在一些场合, 也可考虑采用多信道频分复用(FDM)、正交频分复用(OFDM)、多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)等复杂的复用调制技术, 这样可在降低单信道速率基础上实现很高的传输容量。

2 实现太赫兹无线通信的关键技术

实现太赫兹通信的主要关键技术包括: 太赫兹产生和功率放大技术、太赫兹接收检测技术、太赫兹调制解调技术、太赫兹传输技术、太赫兹高速通信数据流和网络协议技术、太赫兹集成微系统技术。

2.1 太赫兹产生和功率放大技术

太赫兹产生(即太赫兹源)包括变频产生(光学下变频、微波上变频)的太赫兹源和直接产生的太赫兹源。变频产生的太赫兹源包括基于光电变换(光导开关、光整流等)的脉冲超宽谱太赫兹源、基于光电变换的连续波太赫兹源、微波倍频的连续波太赫兹源等。直接产生的太赫兹源包括电子学的太赫兹振荡器(半导体固态太赫兹振荡器、电真空太赫兹振荡器)和量子能级跃迁的激光器太赫兹源(如量子级联激光器太赫兹源、P 型锗激光器太赫兹源、气体激光器太赫兹源等)。

太赫兹通信一般采用连续波的太赫兹, 且要考虑待传输的信号或数据对太赫兹的幅度、频率、相位等参数的调制问题。因此, 通信用的典型太赫兹源包括基于光电变换的连续波太赫兹源、微波倍频太赫兹源、电子学太赫兹振荡器、量子级联激光器太赫兹源等。

基于光电变换的连续波太赫兹源主要包括光混频(Photomixing)和“光学梳状谱+光电二极管(Photo Diode, PD)变换”2 种^[3,8-9]。光混频, 有时又称光外差变换, 是将 2 个频率稳定、窄线宽的激光照射到光混频器上, 得到 2 个激光的差频, 即太赫兹波。这种光混频器一般采用光导天线(Photo Conductive Antenna, PCA)或非线性晶体来实现, PCA 或非线性晶体同脉冲超宽谱太赫兹源的光导开关、光整流类似, 但在这里实现光混频功能。“光学梳状谱+光电二极管变换”的本质也是外差式光混频, 但采用的是能够输出光学梳状线频谱的单台激光器。光学梳状谱是指激光脉冲序列的光谱, 激光脉冲序列由锁模脉冲激光系统产生, 或者由脉冲对连续波激光调制产生。激光脉冲序列的频谱以激光波长对应的频率为中心, 按照脉冲序列的重复频率, 分隔为一系列离散的频谱组成, 通过光滤波器选出其中 2 个谱线照射到光电二极管检测器上, 输出 2 根谱线的差频(即需要的太赫兹频率)连续波信号。光电二极管检测器是关键器件^[3], 其电学带宽要满足产生太赫兹频率的要求。UTC(Uni-Travelling Carrier)-PD 光电二极管是用于产生毫米波和亚太赫兹波的主要器件, 包括 InP/InGaAs 的 1.5 μm 激光 UTC-PD 和 GaAs/AlGaAs 的 0.8 μm 激光 UTC-PD 等。还有一种正在发展的光电二极管是 STR(Separated Transport Recombination)-PD 光电二极管。如果用 2 台连续波激光器, 把光混频和光电二极管结合起来, 就形成了基于光电二极管的光混频太赫兹源。日本 NTT 公司基于 UTC-PD 加上高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)功率放大器研制的 0.12 THz 太赫兹源, 输出功率为 8 dBm。基于 UTC-PD 技术, 在 0.3 THz~0.4 THz 的典型输出功率为 100 μW 左右, 最大可到 400 μW ; 在 0.4 THz~1 THz 已验证的输出功率为 10 μW 左右。在 0.3 THz 以上还缺少可用的 HEMT 功放, 但若采用优化电路结构和 UTC-PD 阵列技术, 其输出功率可望达到 1 mW。

二极管倍频太赫兹源^[10]利用二极管电抗和电阻的非线性, 产生输出信号的谐波, 实现倍频功能, 包括基于 GaAs 肖特基二极管(Schottky Diode)、异质结势垒变容二极管、单量子势垒变容二极管的倍频器等。GaAs 肖特基

二极管应用最为广泛,由于其电压-电流的非线性效应,使得它可用于倍频、混频、检波等多种场合。美国 VDI 公司和英国 Rutherford 实验室等是肖特基二极管的代表性研制单位。利用肖特基二极管可进行二倍频或三混频的多级级联,如美国 JPL 实验室采用 3 个串联的三倍频器级联,研制出最高频率达 2.7 THz 的太赫兹源。肖特基二极管倍频器相对带宽可达到 20%,输出功率在 0.3 THz 可达几个 mW,在 0.6 THz 为 1 mW,在 2.5 THz~2.7 THz 为 2 μ W~14 μ W。

二极管太赫兹振荡源是利用某些二极管的负阻效应来实现毫米波和太赫兹波的产生, Gunn(耿氏)二极管、TUNNET(Tunnel transit-time)二极管和 IMPATT(Impact ionization avalanche transit-time)二极管振荡器已有不少产品,但其频率主要在 W 波段,目前最高可到 0.1 THz 以上。最近,共振隧穿二极管(Resonant Tunneling Diode, RTD)振荡器得到了大量研究,输出频率可达 1 THz 以上^[9,11~12],在 0.55 THz 时输出功率为 400 μ W。

量子级联激光器太赫兹源也是一种半导体固态太赫兹源,但它不是基于电子学的振荡器机理,而是基于子带能级跃迁的激光产生机理。量子级联激光器太赫兹源一般要求低温工作,目前的最低频率已达 2 THz 以下。

基于光电变换的连续波太赫兹源尽管发展较早,但由于需要激光器驱动和复杂的光路,组成复杂,效率不高,正逐渐被全电子学的太赫兹源取代,目前 GaAs 肖特基二极管倍频器已成为最受欢迎的室温小型太赫兹源之一。全电子学的微波倍频太赫兹源和固态太赫兹振荡源,目前很多还是基于分立器件实现,但分立器件的分布参数和互联影响很大,太赫兹单片集成电路(TMIC)将是主要的发展方向。TMIC 可以针对上述的二极管器件及其匹配电路进行集成,更多的是以晶体管(场效应管和双极晶体管)为基础进行集成。

太赫兹晶体管包括基于 GaAs, InP, GaN 的 HEMT, mHEMT(metamorphic HEMT)和 HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)。目前高频率的晶体管还主要基于 InP 材料, InP 晶体管的 $f_{\max}$ 已超过 1 THz。随着 GaN 晶体管在频率上的提高(目前 GaN 晶体管的 $f_{\max}$ 也达到了 0.4 THz),以及其功率上的优势, GaN 晶体管将成为太赫兹晶体管的主要发展方向。另外基于 SiGe HBT 和 CMOS 的固态太赫兹源的频率也在快速提高。晶体管 TMIC 太赫兹源,包括 2 种技术路线:“振荡器+放大器”和“倍频器+(谐波混频器)+放大器”。最近利用 InP 基 HBT 的固态太赫兹压控振荡器(Voltage Controlled Oscillator, VCO),频率可达 0.35 THz,输出功率为 -5 dBm^[3]。正在研究的各种提高晶体管振荡器频率的方法,也遇到不少技术挑战。基于晶体管的太赫兹倍频源已可实现 0.3 THz, 10 mW 的输出^[10]。TMIC 可把源、功放、低噪放、检测器、天线集成在一起,还可进一步实现电路和光路的集成,如美国 Sandia 实验室研究的把 QCL(Quantum Cascade Laser)源和二极管检测器集成在一起的单片收发器。TMIC 太赫兹源的输出功率主要取决于功率放大器,下文将讨论。NG 公司、Teledyne 公司、Fraunhofer IAF 研究所、JPL 实验室、Sandia 实验室、NTT 公司等是太赫兹 TMIC 的代表性研究单位。

利用上述方法,太赫兹源产生的信号功率较小,只能用于近距离通信。为实现远距离通信,需要构成功率放大链。固态调制信号输出一般为几百 μ W 到 mW,第一级放大一般采用固态功率放大和固态功率合成,输出为 mW 到百 mW 量级;第二级放大可采用微纳电真空行波管放大器,输出为 W 到几十 W 量级,可满足大多数应用场合的要求;如果功率要求更大,可进一步采用大功率回旋行波管进行第三级放大,输出为 kW 量级。固态放大器带宽较大,但效率低;电真空放大器效率较高,但带宽受到一定限制。

固态功率放大器采用晶体管 TMIC 技术实现,主要由晶体管及其偏置电路与匹配电路构成,文献[13]对目前各种固态集成电路放大器进行了全面综述,0.34 THz InP 的 HEMT 功放输出功率可达 10 mW,功率密度达到 62 mW/mm。最近报道的基于 InP HEMT 的功放在 0.6 THz~0.7 THz 的输出功率超过了 1.9 mW^[10],目前功放应用较多的是 InP 基的 HEMT 和 HBT 晶体管。正在研究 GaN 基的晶体管,在 0.1 THz 附近 GaN 功放输出大于 1 W,功率密度已超过 2 W/mm,太赫兹的 GaN 功放已不遥远。固态功率合成包括电路合成(如典型的二进制功率合成、混合进制功率合成)、径向波导闭合空间功率合成、阵列辐射空间功率合成等。采用 12 路 GaN MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)的径向波导合成已在 0.1 THz 附近合成输出 5 W 的功率。阵列辐射空间功率合成将是一项很有发展前途的技术,不仅全固态实现,而且阵元数扩展方便、构型灵活,输出功率可达到很大,从几 W 到几 kW,甚至更大。当然阵列辐射空间功率合成对单元的幅相一致性要求也很高,实现难度大,若同相控阵结合还可进行波束扫描,但此时阵列间距要满足 $\lambda/2$ 要求,集成化实现难度很大。

电真空放大^[14]主要指基于微纳加工技术的微纳电真空行波管放大器和扩展相互作用速调管放大器等,有些场合如果需要更大的功率,必须采用大功率回旋行波管放大器。行波管通过电子束和电磁波进行能量交换来实现信号放大。行波管按慢波系统的不同可分为螺旋线行波管、耦合腔行波管、环杆和环圈行波管、折叠波导行波管等。由于太赫兹频段的加工问题,折叠波导慢波结构行波管和场致发射冷阴极行波管是研究的重点方向。折叠波导慢波结构行波管包括电子枪、聚焦系统、折叠波导慢波电路、收集极等。电子束由电子枪产生并沿着折叠波导轴向行进,微波信号沿着折叠波导传播,降低了电磁波的相速度,通过束波互作用,电子将能量转移到了高频场中,

实现了信号的放大。同固态器件相比,电真空器件的相对带宽要小很多,为了与电真空放大器实现功率级联,采用频谱效率较高的调制体制十分重要,因此在远距离通信中宜采用 QAM 体制。太赫兹折叠波导行波管放大器的代表性成果是美国 NG 公司,在 DARPA 计划资助下研究了 0.67 THz、0.85 THz 折叠波导行波管,在 0.85 THz 的输出功率大于 100 mW。

太赫兹源(产生和放大)是太赫兹通信的关键技术,上面讨论了多种太赫兹源技术,从其频率功率关系可较为直观地反映各种太赫兹源的特点,如图 1 所示^[15]。

2.2 太赫兹接收检测技术

太赫兹接收检测技术包括低噪声放大器和检测器技术。低噪放一般采用 InP HEMT 和 HBT 晶体管实现,由于 InP HEMT 的低噪声特性,已成为低噪放器件的首选。检测器分为非相干检测和相干检测两大类。非相干检测器包括热敏传感器(如 Bolometer, Golay Cells, Pyroelectric 器件等)、肖特基二极管检波器,以及超导检测器,如 STJ(Superconducting Tunnel Junction)、TES(Transition Edge Superconducting)等。相干检测利用一个本地参考源与输入信号进行变换检测,实现复杂但检测灵敏度高。对于脉冲太赫兹信号,相干检测包括利用非线性晶体的电光采样和利用光导天线的光导开关检测。对于连续波太赫兹信号,利用混频器进行外差式相干检测,混频器主要包括室温混频器、低温超导混频器,如 SIS(Superconductor Insulator Superconductor)、HEB(Hot Electron Bolometer)等。

对于太赫兹通信,室温工作的高灵敏度检测器是一项重要的关键技术。肖特基二极管是最常用的器件,其检测频率可到 2 THz 以上。OOK、ASK 等二元幅度调制一般采用肖特基二极管进行非相干检测;MQAM 等多元正交调制一般采用肖特基二极管进行混频相干检测。基于晶体管 TMIC 的相干混频检测也发展很快,文献[16]报道了一种基于 30 nm InP HEMT 实现的 0.67 THz 相干接收机,包括低噪放、倍频源、混频器等。另外,对于 MQAM、MPSK 等正交调制信号,解调时需要提取 I/Q(同相/正交) 2 路相干信号,可以混频后提取,也可利用 I/Q 正交混频器直接提取,这种 I/Q 正交混频器一般基于 InP HEMT 实现。

2.3 太赫兹调制解调技术

前文已介绍了太赫兹通信的主要调制体制,这里讨论太赫兹调制解调的主要实现技术。

1) 光子学高速调制,包括二元调制(ASK、OOK)和多元正交调制(MQAM、MPSK 等)。光学 MZM(Mach-Zehnder Modulator)是常用的高速调制器,不仅可实现二元调制,而且由 2 个 MZM 调制器并联在干涉仪的两臂上还可构成 I/Q 光调制器,实现 MQAM、MPSK 等多元正交调制。光学 MZM 技术较为成熟,速率可达几十 Gbps,甚至上百 Gbps,因此基于光电变换的太赫兹源,先进行光学 MZM 高速调制,再采用 UTC-PD 变换到太赫兹频率,这是很多太赫兹通信中的主要调制方式。但接收解调一般采用电子学方法进行,对于二元调制,大都采用肖特基二极管检测器直接进行非相干解调;对于多元正交调制,采用相干的正交混频解调。

2) 利用混频器进行 ASK 和 OOK 信号的直接调制。分为 2 种,一种是混频器直接用作外部调制器,即把太赫兹载波信号和高速数据信号分别作为混频器的输入,混频器输出即是太赫兹已调信号;另一种是谐波混频调制器,混频器既起到谐波倍频作用(降低了对本振源的要求),又起到调制作用。混频器可采用肖特基二极管,也可采用晶体管集成电路实现。利用混频器可实现的 ASK 和 OOK 调制速率也比较高,达到几十 Gbps。由于这种方式便于全电子学集成化实现,目前在二元高速调制中正在逐渐取代光学 MZM。

3) 多元正交调制体制(如 MQAM、MPSK 等)的基带高速调制解调。这种方式先在基带(或中频)采用复杂的波形产生技术进行调制,然后采用混频器(肖特基二极管或晶体管)上混频变换到太赫兹频率。解调是相反的过程,先变频到基带(或中频),再进行复杂的相干解调处理,包括信道均衡、定时同步、载波频率和相位同步、星座分离判决以及信道纠错译码等。其优点是基于成熟的通信信号处理理论与并行处理技术,且可采用信道均衡方法改善不良的信道特性。缺点是信号处理十分复杂,为了平衡提高传输速率和降低 AD 与 DA 采样率的矛盾,需要采

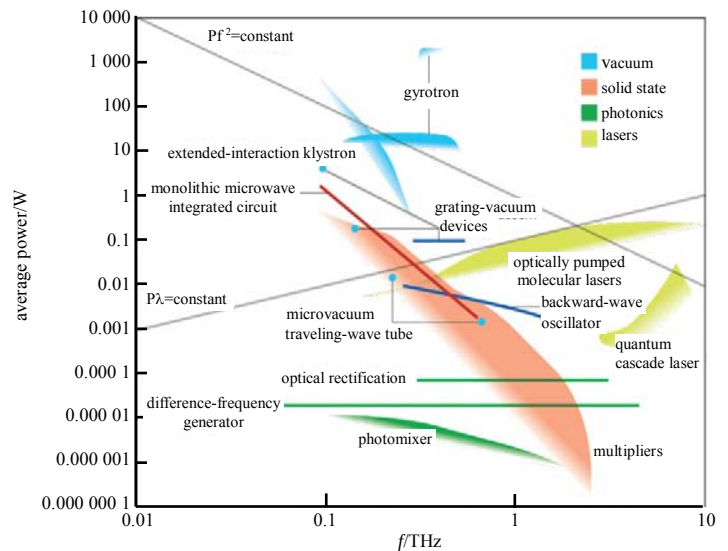


Fig.1 Frequency and power relationship of various terahertz sources

图 1 各种太赫兹源的频率功率关系图

用更高阶的多元调制体制(如 256QAM 等),调制信号阶数太高,信号星座距离更小,对信道特性和信噪比的要求更高。目前实现的实时调制解调速率为几个 Gbps,若进一步提高则代价较大。如果要想实现几十到百 Gbps 的实时正交调制,现在还是要采用光子学正交调制然后下变频的方法,但实时正交解调要求的电子学信号处理速度很高,实现难度很大。

4) 对太赫兹源的内部直接调制技术。早期有人研究过对脉冲时域光谱(Time Domain Spectrum, TDS)太赫兹源进行直接调制,但实用价值不大。对 VCO 太赫兹源进行直接调制也不断有研究,调制带宽较小。最近报道的对太赫兹 RTD 振荡源的内部直接调制技术取得了重要进展,将调制信号和直流偏压叠加后作用在 RTD 上。文献[9]在 0.3 THz 实现了 2.5 Gbps 的 ASK 调制,文献[12]在 0.542 THz 实现了 3.25 Gbps 的 ASK 调制,由于它基于振荡源而不是变频源(属于直接调制而不是变频调制),基于内部调制而不是外部调制,因此组成简单,非常易于小型化集成化,且调制速率较高,它同后面的太赫兹放大器一起使用,在很大程度上代表了太赫兹通信期待的太赫兹源和调制技术的发展方向。

5) 基于微纳结构功能器件的外部直接调制解调器。基于超材料(Metamaterials)、石墨烯等微结构和功能材料的强度调制器,尽管目前的开关速度和调制带宽很小,但由于基于直接调制方式,一旦突破将具有重要应用价值。最近有很多研究在开展,目前能够实现的低速调制可用于波束形成和调控等场合^[3]。

2.4 太赫兹传输技术

太赫兹通信的传输包括发射机接收机中的有线传输和天线辐射后的空间电磁波传播,空间电磁波传播是个特殊的重要问题,本文暂不讨论。太赫兹在发射机接收机中的传输主要包括太赫兹传输线、滤波器等无源器件技术。对于传输线,在太赫兹频段高端一般采用光学或准光学传输,在太赫兹频段低端可沿用微波毫米波微带线和波导传输技术。考虑损耗问题,太赫兹模块大都使用波导传输线,而对于 TMIC 芯片,由于波导传输线不易实现,采用共面波导(Co-Planar Waveguide, CPW)结构来实现。太赫兹滤波器是通信中不可缺少的元件,通信中常采用腔体结构的滤波器,除了采用精密机械加工的办法外,更多地采用 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技术来实现腔体滤波器,它们结构大致相同,整个结构采用模式匹配方法来设计,同时考虑寄生模式与机械加工的影响,可以选择合适的腔体谐振模式与波导宽边,达到降低加工要求的目的。基于超材料、光子晶体、石墨烯等的微纳结构太赫兹传输器件也是目前的重要研究热点。

天线是通信系统发射与接收的重要部分,对于小增益的太赫兹天线,一般采用喇叭天线来实现,结构简单,加工容易,输入输出均是标准波导接口,与收发模块连接方便;对于高增益天线,常采用卡塞格伦天线来实现,因太赫兹波长短,反射面天线的口径可以做得很小,也容易实现,但加工精确度要求较高。对于有特殊要求的天线(如波束扫描天线),采用准光技术的反射面天线来实现,采用此办法实现的天线能够进行扫描。单脉冲跟踪测角天线、相控阵天线有很多优点,但在太赫兹频段的实现难度不小,正在开展研究。另外,在 TMIC 中集成片载微天线是近距离超小型太赫兹通信的必然选择,片载微天线还将用于空间阵列合成。有些场合从发射机到天线还要考虑模式变换问题,这种情况下模式变换器也是太赫兹传输技术的重要研究内容。

2.5 太赫兹高速通信数据流和网络协议技术

太赫兹通信的速率将达到几十 Gbps 至百 Gbps 以上,过去这么高速率的数据流只在光纤通信中出现,因此基带数据流如何形成(包括数据采集、信源编码、数据复用、编帧、信道编码等),能否完全基于电接口实现,具有很大的挑战。同时太赫兹无线通信中的组网也不同于光纤通信,现有的无线网络通信协议如何适应这么高的速率,还有很多研究工作尚未开展。2008 年 IEEE 802.15 成立了一个太赫兹兴趣小组(THz Interest Group, IG-THz),其主要工作是研究板与板之间、机器与机器之间、人与机器之间、人与人之间、室内(室外)的太赫兹无线通信与无线个域网(Wireless Personal Area Network, WPAN),旨在提供数十 Gbps 至 1 Tbps 的通信技术,传输距离在数 cm 至数 km 范围。2013 年 7 月从兴趣小组升级到研究小组(Study Group),即 Study Group 100 Gbit/s Wireless(SG100G),除继续关注毫米波太赫兹频段应用外,主要研究 100 Gbps 的高速点对点和网络通信技术,高速数据流和网络协议无疑是其研究重点,技术一旦成熟,未来可望成为制定标准的工作小组(Working Group)。另外,将太赫兹与纳网络(Nanonetworks)结合起来是一个十分有价值的研究前沿,其网络协议的研究十分重要,文献[17]介绍了一种太赫兹频段电磁纳网络的 MAC 协议(PHLAME),可支持密集纳网络并以几十 Gbps 的速率传输。

2.6 太赫兹集成微系统技术

微系统技术源于微电子和微纳科学技术。集成微系统技术是以美国 DARPA 的 MTO(Microsystem Technology

Office)和 Sandia 的 MESA(Microsystem and Engineering Science Application)等倡导发展起来的一个划时代的新技术,集成微系统不同于各个单独的分立微系统技术,而是要实现“电子学+光子学+MEMS/NEMS+架构+算法”的异构集成,如图 2 所示。

在微波频段器件特征尺寸远小于波长,在光学频段器件特征尺寸远大于波长,而在太赫兹频段器件特征尺寸与波长处于同一量级,因此将出现不同于微波和光学频段的许多新现象,太赫兹科学与微纳科学存在某种必然的联系。从技术角度,太赫兹技术也必然是电子学、光子学和 MEMS/NEMS 技术的有机结合,因此太赫兹技术同集成微系统技术的思路是一致的。基于集成微系统技术研究异构集成的太赫兹通信系统,包括太赫兹产生、放大、接收检测、调制解调、天线和信号处理等,是太赫兹通信的核心基础技术。国际上太赫兹通信和雷达的主要研究机构(如日本 NTT 公司、德国 IAF 研究所、美国 Sandia 实验室、美国 JPL 实验室等)都是基于其相应的集成微系统技术实验室来开展太赫兹系统的研发。

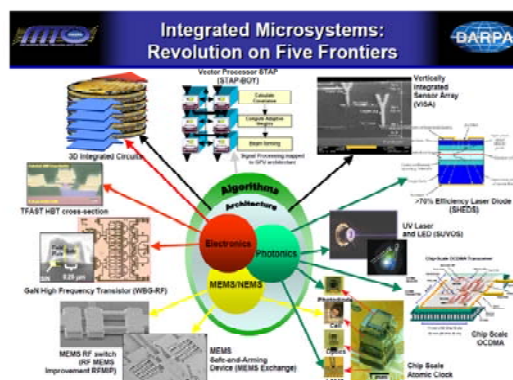


Fig.2 Integrated microsystems:revolution on five frontiers

图 2 集成微系统:五大部分的异构集成

3 典型的太赫兹无线通信验证系统

目前国际上完成的太赫兹无线通信验证系统主要包括光电混合太赫兹通信系统、全电子学太赫兹通信系统(基于肖特基二极管或基于 HEMT TMIC)、QCL 太赫兹通信系统、时域脉冲太赫兹通信系统等。国外典型的系统主要有日本 NTT 的 0.12 THz 和 0.3 THz 通信系统^[18-20]、德国 IAF 的 0.22 THz 和 0.24 THz 通信系统^[21-24]、美国 Bell 实验室的 0.625 THz 通信系统^[25]。国内的中国工程物理研究院电子工程研究所^[26-33]、中科院微系统与信息技术研究所^[34]、电子科技大学^[35]、天津大学^[36]等单位都开展了太赫兹无线通信技术的研究,其中代表性成果有:中国工程物理研究院电子工程研究所的 0.14 THz 和 0.34 THz 通信系统、中科院微系统与信息技术研究所的 4.13 THz 通信系统。

3.1 日本 NTT 的 0.12 THz,0.3 THz 通信系统

日本 NTT 公司在国际上较早开展了太赫兹通信技术研究,采用 ASK,OOK 体制,先后基于光电结合和全电子学的方式研究了 0.12 THz 通信系统并进行了演示验证实验,最近又研究了 0.3 THz 的通信系统。

2004 年~2006 年期间,NTT 公司采用基于 UTC-PD 的光电变换太赫兹源和光学 MZM 调制的发射机,以及肖特基二极管检测接收机研制了 0.125 THz 通信系统,如图 3(a),3(b)所示。在图 3(a)中使用 62.5 GHz 信号调制光波,通过平面分波电路产生相隔 0.125 THz 光信号,此光信号受发射数据(数据先由光信号转换为电信号)的调制,然后进入 UTC-PD 进行光电转换,产生 0.125 THz 的调制波,经过放大后馈入天线发射;接收端经天线后进入低噪放、检波器变成基带信号,经过放大、时钟数据恢复、电-光转换成光信号数据输出,如图 3(b)所示。采用该系统进行了 10 Gbps,300 m~800 m 的传输实验,成为国际太赫兹通信的标志性成果。随着 InP HEMT TMIC 技术的发展,NTT 公司研究了全电子学 0.12 THz 发射机代替了原来的光电变换发射机,如图 3(c)所示,15.625 GHz 信号经 8 倍频至 0.125 THz,而输入的光信号数据经光-电转换为电信号数据后对 0.125 THz 载波进行 ASK 调制,然后经过二级放大器放大后(40 mW)输出至天线。接收端仍然采用肖特基二极管检测技术来实现。图 3(d)中表格列出了光电结合和全电子 2 种技术的比较,显然全电子技术具有明显的优势。

图 4 是 0.12 THz 通信系统实物与实验场景,NTT 公司利用 0.12 THz 系统做了许多实用性的实验。2008 年将该系统用于北京奥运会赛事直播演示;2009 年进行了 5.8 km 的远距离传输实验,还进行了雨衰统计实验;2010 年使用天线极化复用技术实现双向 10 Gbps 或单向 20 Gbps 传输速率;2012 年在前面极化复用的模式变化器基础上进行了改进,实现了双向 10 Gbps 与 10 GbE 的无缝连接。

在 0.12 THz 通信系统的基础上,NTT 公司将载频提高至 0.3 THz,发射机采用的是光电变换太赫兹源,但不是基于单台激光器脉冲调制后的光学梳状谱,而是用 2 台可调谐激光器耦合放大后由 UTC-PD 差频变换为太赫兹波输出,接收机仍然采用肖特基二极管检测技术,如图 5 所示,由于 0.3 THz 的 UTC-PD 输出没有合适的放大器,使用了 2 个介质透镜来提高天线的增益,总发射天线、接收天线增益分别为 40 dBi,35 dBi。采用 ASK 调制,在

0.5 m 距离实现 16 Gbps 传输；2012 年，将传输速率提高至 24 Gbps。

3.2 德国 Fraunhofer IAF 的 0.22 THz, 0.24 THz 通信系统

德国 IAF 研究所基于其固态电子学基础，与 KIT(Karlsruhe Institute of Technology)等单位一起，近几年推出了 TMIC 实现的太赫兹通信系统，引领了全电子学太赫兹高速无线通信技术的发展。2011 年德国 IAF 完成了基于 InP mHEMT TMIC 的全固态 0.22 THz 通信系统，如图 6 所示，并实现了 OOK 与 QAM 两种体制。发射机主要由 12 倍频链、功放、二倍频器、混频调制器和 LNA(Low Noise Amplifier)(用作功放)组成，接收机的组成与发射机组成差不多。整个发射机全部集成为一块 TMIC 芯片，接收机也是一块 TMIC 芯片。

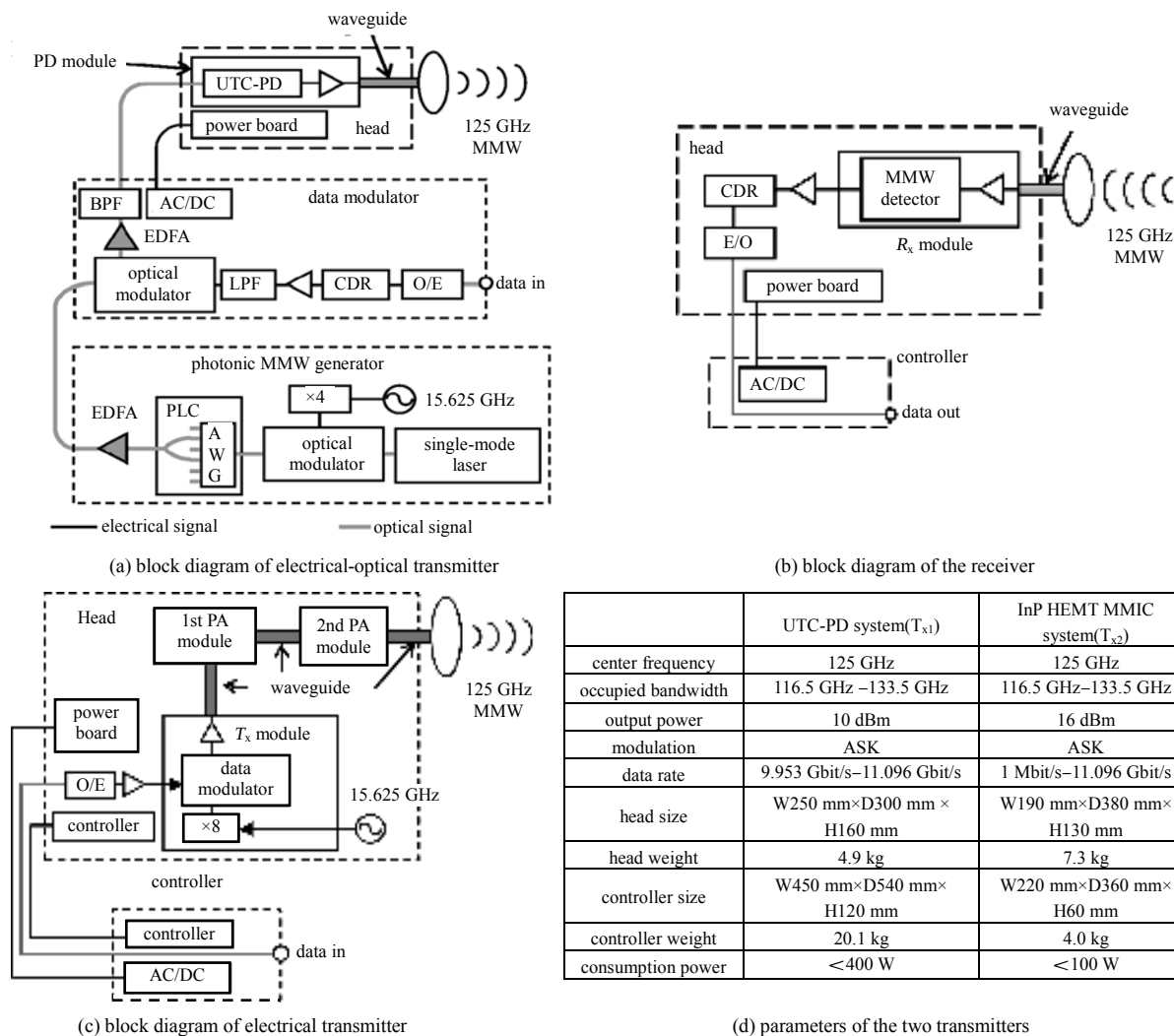


Fig.3 0.12 THz communication system of Japan's NTT

图 3 日本 NTT 公司的 0.12 THz 通信系统

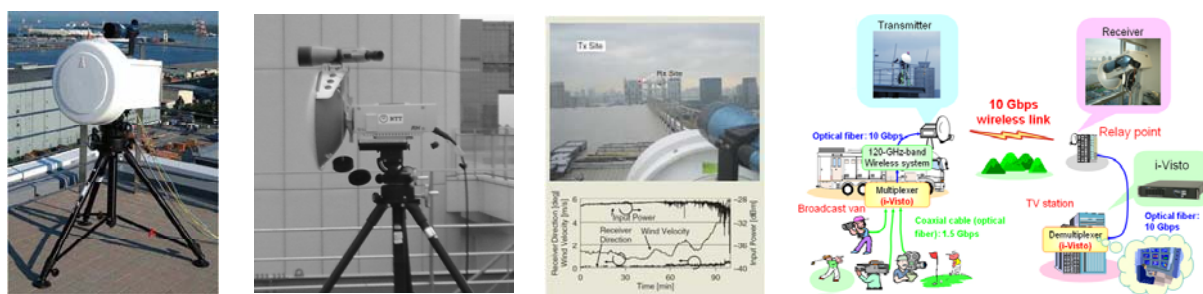


Fig.4 0.12 THz communication system and experimental scene of Japan's NTT

图 4 日本 NTT 公司的 0.12 THz 通信系统实物与实验场景

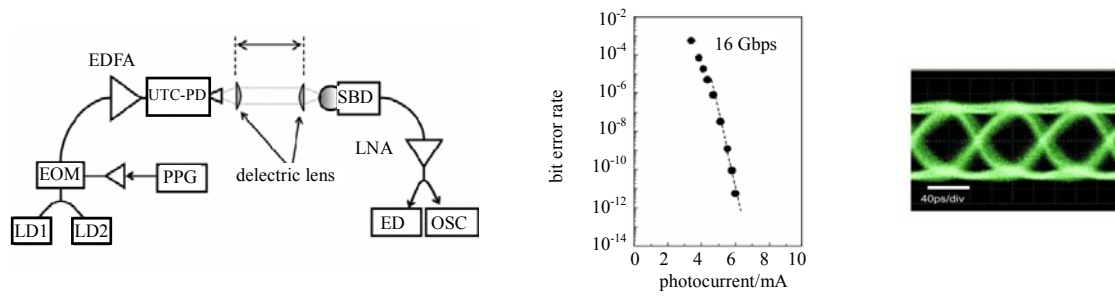


Fig.5 0.3 THz communication system of Japan's NTT and the experimental results

图 5 日本 NTT 公司的 0.3 THz 通信系统与实验结果

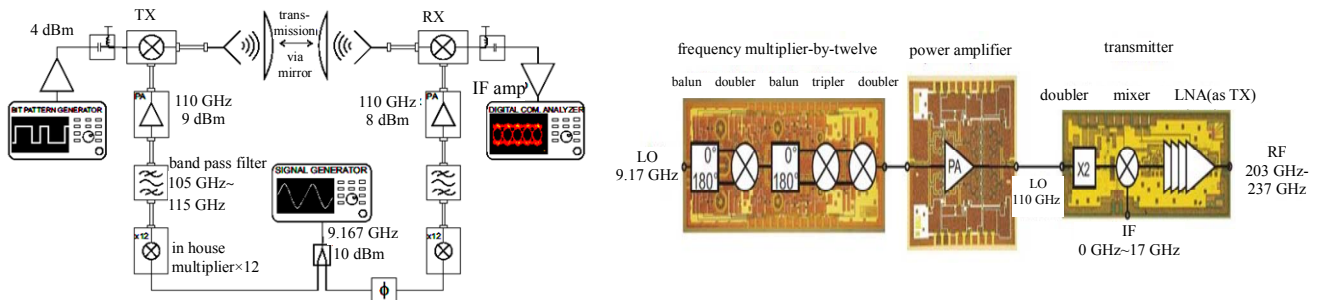


Fig.6 0.22 THz communication system of German IAF

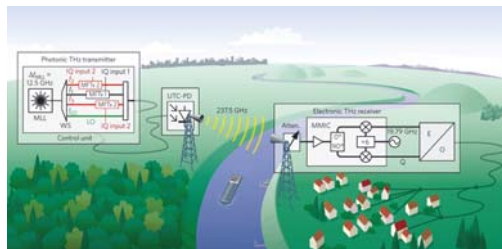
图 6 德国 IAF 0.22 THz 通信系统

利用该系统进行了 QAM 体制的低速传输和 OOK 体制的高速传输。分别采用 16QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM 调制进行了 DVB-C 数据传输, 64QAM 的传输码率为 10 Mbps, 256QAM 的传输码率为 14 Mbps, 在相距 1 m 时误码率分别为 1×10^{-8} 和 9.1×10^{-4} 。在进行 OOK 调制传输时, 传输码速率从 7.5 Gbps 到 25 Gbps, 距离为 0.5 m 到 2 m。

2013 年 5 月, 德国 IAF 在其网页上报道了新的研究成果, 在 0.24 THz 上基于全电子学方式实现了 40 Gbps 速率、1 km 距离的无线传输, 系统实物和实验场景如图 7(a)所示, 采用 mHEMT 工艺研究的发射机和接收机 TMIC 芯片仅有 $4 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 大小, 创造了基于 TMIC 全电子学方式实现的太赫兹高速无线通信的新世界纪录, 标志着太赫兹将可取代光纤实现“最后一公里”的无线传输。2013 年 10 月, 德国 IAF 在 Nature Photonics 上报道了其最新研究成果^[24], 采用光电变换的发射机(光学梳状谱+UTC-PD, UTC-PD 由日本 NTT 研制)和电子学的 mHEMT TMIC 接收机芯片, 基于 QPSK, 8QAM, 16QAM 多元调制体制, 在 0.24 THz 实现了 100 Gbps 速率、20 m 距离的无线传输和离线软件解调, 如图 7(b)、(c)所示, 再次创造了新的世界记录。报道中提到进一步的研究方向: 研究提高频谱利用率的技术(如极化复用、频分复用、空分复用等), 期望在 0.2 THz~0.3 THz 的大气窗口内向 1 Tbps 速率迈进; 在 UTC-PD 的输出增加 TMIC 放大器, 采用高增益天线, 实现 1 km 以上的传输距离; 研究电子学和光子学的单片或混合异构集成技术, 以实现小巧的太赫兹收发系统。



(a) 40 Gbps system prototype



(b) block diagram of the 100 Gbps system



(c) 100 Gbps/20 m transmission experiment

Fig.7 0.24 THz, 40 Gbps/100 Gbps communication system of German IAF

图 7 德国 IAF 的 0.24 THz、40 Gbps/100 Gbps 通信系统

3.3 美国 Bell 实验室的 0.625 THz 通信系统

美国 Bell 实验室的 0.625 THz 通信系统是目前报道的采用全电子学方式实现的最高载波频率的太赫兹通信系统^[25], 如图 8 所示。它基于肖特基二极管, 采用 4 个二倍频器和 1 个 3 倍频器, 组成级联的倍频太赫兹源,

输出功率为 1 mW。接收机采用肖特基二极管检测器。基于双二进制(Duobinary)基带调制制式, 传输速率为 2.5 Gbps, 传输距离为数米。

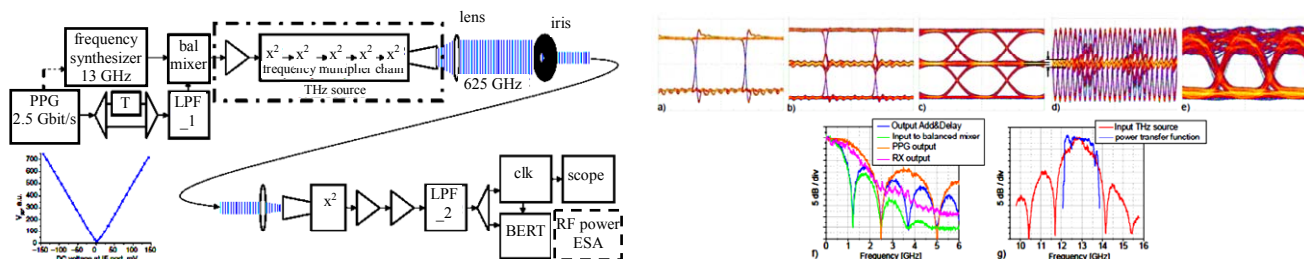


Fig.8 0.625 THz communication system of Bell LABS in the US

图 8 美国 Bell 实验室的 0.625 THz 通信系统

3.4 中国工程物理研究院的 0.14 THz、0.34 THz 高速无线通信系统

中国工程物理研究院(电子工程研究所和太赫兹研究中心)研究了一种先进的“16QAM 正交调制+次谐波混频+多级放大”的太赫兹高速无线通信技术体制, 频谱利用率高, 便于功率级联和远距离通信。在实现技术路线方面, 采用了全电子学的技术途径, 即基于固态肖特基二极管研制倍频源和混频器, 基于 MEMS 技术研制滤波器, 基于微纳电子真空技术研制折叠波导行波管放大器, 基于并行结构的高速信号处理技术实现调制解调等。2010 年底完成了 0.14 THz/16QAM 10Gbps 的 0.5 km 无线传输实验(离线软件解调);2011 年进行了 1.5 km 无线通信实验, 包括 2 Gbps 16QAM 实时解调和 10 Gbps 16QAM 的离线软件解调, 如图 9 所示。实验表明:当传输速率为 2 Gbps, 采用实时解调, 误码率为 1×10^{-7} ; 当传输速率为 10 Gbps, 采用软件解调, 误码率优于 1×10^{-6} 。目前正在开展固态功率合成和折叠波导行波管放大器研究, 以实现更远传输距离。

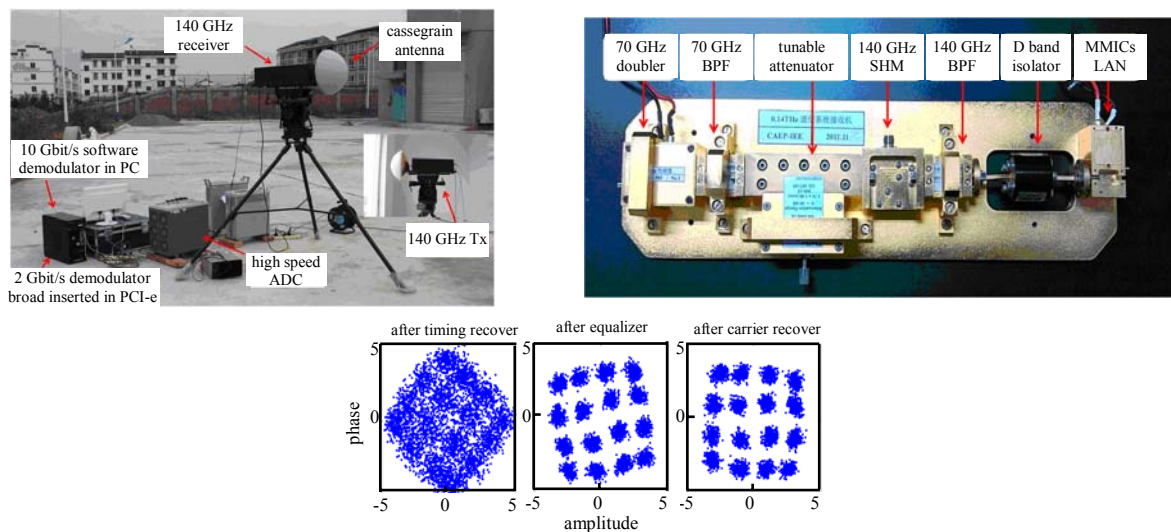


Fig.9 0.14 THz wireless communication system of CAEP

图 9 中国工程物理研究院的 0.14 THz 无线通信系统

在此基础上, 2012 年中国工程物理研究院进一步实现了 0.34 THz 16QAM 3 Gbps 实时解调通信系统, 完成了 50 m 无线传输实验, 如图 10 所示。当传输速率为 3 Gbps 时, 误码率优于 1×10^{-6} 。利用该系统还进行了基于 IEEE 802.11 的 WLAN 通信实验。目前中国工程物理研究院正在开展 0.14 THz~0.34 THz 的 TMIC 芯片技术研究, 以及速率 10 Gbps 以上到几十 Gbps 的超高速太赫兹调制解调技术研究。

3.5 中科院微系统与信息技术研究所的 4.13 THz 通信系统

在 2 THz 以上, 太赫兹源一般只能采用激光器方法实现, 如量子级联激光器(QCL)、气体激光器、自由电子激光器等。由于 QCL 基于半导体技术实现, 便于集成, 引起了人们的广泛研究兴趣, 大部分研究集中在 QCL 本身和成像应用, 但也有少量研究探讨了它在通信中的应用。国外在 3.8 THz 基于 QCL 和 QWP(Quantum Well Photodetector)开展了无线通信实验。国内中科院微系统与信息技术研究所在 4.1 THz 基于 QCL 和 QWP 先后开展

了音频、文件和视频通信实验,系统构成和 1 Mbps 传输实验结果如图 11 所示^[34],采用 OOK 数字调制,传输距离为 2.2 m。

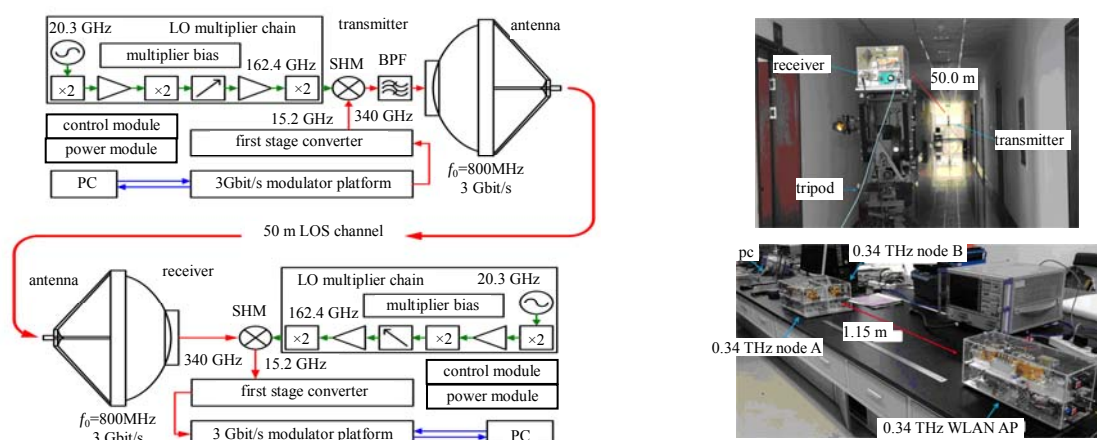


Fig.10 0.34 THz wireless communication system of CAEP

图 10 中国工程物理研究院的 0.34 THz 无线通信系统

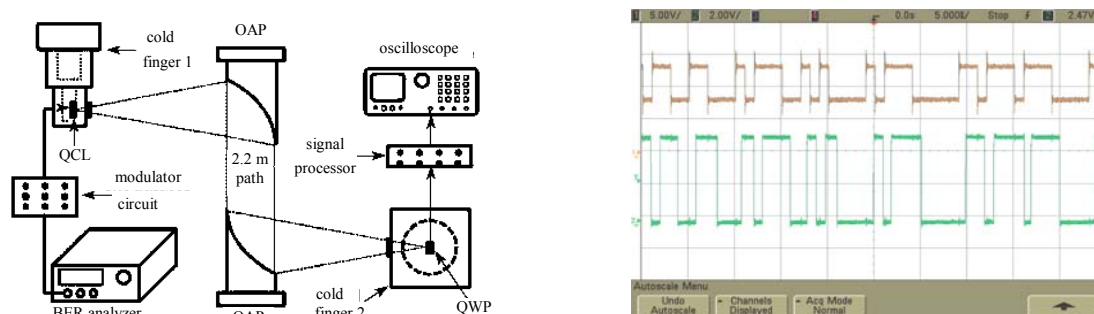


Fig.11 4.13 THz communication system of CAS

图 11 中科院微系统与信息技术研究所的 4.13 THz 通信系统

4 应用与展望

太赫兹通信尽管还没有进入到实际应用阶段,但可以相信太赫兹通信的应用已并不遥远。太赫兹高速无线通信的主要应用领域:

1) 空间通信,包括天-天高速通信与组网、天-地高速数传(采用太赫兹低频段大气窗口)等,由于空间传输没有大气衰减问题,比微波通信要求的功率小,更易实现小型化,而精确跟瞄比激光要求低,因此可预期空间通信将是太赫兹高速无线通信最主要应用之一。

2) 地面高速通信与组网,如地面点对点高速传输(代替光纤入户的“最后一公里”无线传输、楼宇间通信、不便铺设电缆的特定点对点通信等)、地面超高速组网(无线接入、无线下载、无线个域网、器件无线互连、机器无线互联等)。由于这类应用需求十分广泛,且通信距离不是很远(从 cm 到 km 范围,大气衰减的影响几乎可以忽略),但通信速率要求很高(从 Gbps 到百 Gbps),无疑也将会是太赫兹高速无线通信的最主要的应用之一。

3) 穿透等离子体通信与测控,高速飞行的临近空间飞行器以及飞行器重返大气层时都会产生不同程度的等离子体,造成无线电信号中断,当载波频率超过等离子体碰撞频率(几十 GHz),即采用太赫兹无线通信可解决该问题。

4) 安全和保密通信,如宽带扩调频通信(几十 GHz 到百 GHz 的扩跳频带宽)^[4]、战术级区域保密通信与组网、航空编队通信等。

太赫兹通信能否广泛应用还取决于太赫兹通信相关理论和技术的研究能否取得进一步突破,包括以下一些重要问题: a) 器件功率和效率的突破:从产生和检测来说,太赫兹“间隙”尽管已初步填补了,但源的功率低、能量转换效率低等问题还远远未解决,能否把电磁场理论和量子理论结合起来,把电子学与光子学结合起来,把太赫兹科学与微纳技术结合起来,形成太赫兹物理的新理论,出现新的小巧、易于集成、大功率、高效率、室温

工作的太赫兹源和高灵敏度的检测器件? 现有的光电变换太赫兹源和微波倍频太赫兹源实现均比较复杂, 能否出现期待的新型全固态、室温、高效率、大功率直接振荡型太赫兹源, 并可进行复杂体制的直接高速调制?

b) 加载宽带复杂调制波形, 进行信道复用, 并处于复杂环境下(不同气候条件, 室内和楼群等复杂传播条件)的太赫兹信道传输特性。c) 太赫兹通信的新体制和新的信号处理方法等。从技术实现途径来说, 目前光子学和电子学 2 种途径均在不断向前发展, 文献[5]预测, 电子学的实现将是一个重要发展趋势, 如图 12 所示。当然电子学实现并不排斥光电结合, 目前的光电结合只是在发射机和接收机的不同环节分别采用光子学和电子学实现, 这是一种简单的结合, 只在一些特殊场合有价值, 但深度的光电结合, 即: 从物理机理出发, 基于微纳技术实现基础层面内在的光电结合, 这样的太赫兹系统既具有高速性能, 又具有室温工作、小巧和易于集成等优势, 将是我们追求的重要发展方向。

参考文献:

- [1] Lee Yun Shik. Principles of Terahertz Science and Technology[M]. [S.l.], Springer, 2010.
- [2] Lewis R A. Terahertz Physics[M]. Cambridge University Press, 2013.
- [3] Federici J F, Moeller L, Su K. Handbook of Terahertz Technology for Imaging, Sensing and Communications(Edited by Daryoosh Saeedkia)[M]. Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [4] Federici John, Moeller Lothar. Review of terahertz and subterahertz wireless communications[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(11): 111101–111122.
- [5] S. Ho-Jin, Nagatsuma T. Present and Future of Terahertz Communications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 256–263.
- [6] Thomas Kleine-Ostmann, Tadao Nagatsuma. A Review on Terahertz Communications Research[J]. J. Infrared Milli. THz Waves, 2011, 32(2): 143–171.
- [7] LI Yuquan, ZHU Yong, WANG Jiangping. Optical Communication Technology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [8] Naoya Kukutsu, Yuichi Kado. Overview of Millimeter and Terahertz Wave Application Research[J]. NTT Technical Review, 2009, 7(3): 1–6.
- [9] Tadao Nagatsuma. Terahertz Communications Technologies Based on Photonic and Electronic Approaches[C]// 2012 18th European Wireless Conference. Poznan, Poland: [s.n.], 2012: 1–4.
- [10] Chattopadhyay G. Technology, Capabilities, and Performance of Low Power Terahertz Sources[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 33–53.
- [11] Suzuki S, Asada M, Teranishi A, et al. Fundamental oscillation of resonant tunneling diodes above 1 THz at room temperature[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(24): 242101–242103.
- [12] Ishigaki K, Shiraishi M, Suzuki S, et al. Direct intensity modulation and wireless data transmission characteristics of terahertz-oscillating resonant tunneling diodes[J]. Electronics Letters, 2012, 48(10): 582–583.
- [13] Samoska L A. An Overview of Solid-State Integrated Circuit Amplifiers in the Submillimeter-Wave and THz Regime[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 9–24.
- [14] Booske J H, Dobbs R J, Joye C D, et al. Vacuum Electronic High Power Terahertz Sources[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 54–75.
- [15] Armstrong C M. The Truth about Terahertz[EB/OL]. [2012–09]. <http://spectrum.ieee.org/aerospace/military/the-truth-about-terahertz>.
- [16] Deal W, Mei X B, Leong K M K H, et al. THz Monolithic Integrated Circuits Using InP High Electron Mobility Transistors[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 25–32.
- [17] Jornet J M, Pujol J C, Pareta J Sol é . PHLAME: A Physical Layer Aware MAC Protocol for Electromagnetic Nanonetworks in the Terahertz Band[J]. Nano Communication Networks, 2012, 3(1): 74–81.
- [18] Hirata A, Kosugi T, Takahashi H, et al. 120 GHz-band millimeter-wave photonic wireless link for 10-Gb/s data transmission[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(5): 1937–1944.

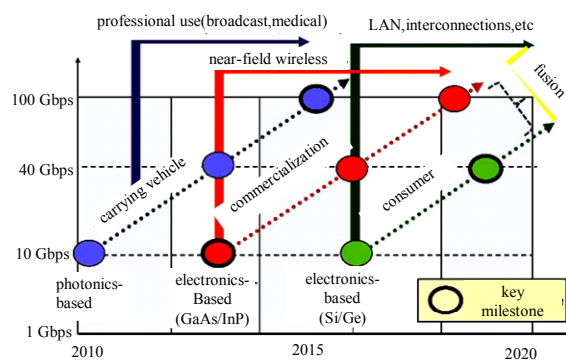


Fig.12 Development trend of THz high-speed communications
图 12 太赫兹高速通信的技术发展趋势

- [19] Hirata A, Kosugi T, Takahashi H, et al. 5.8 km 10 Gbps data transmission over a 120 GHz-band wireless link[C]// 2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems. Honolulu, HI:[s.n.], 2010:1–4.
- [20] Song H J, Ajito K, Muramoto Y, et al. 24 Gbit/s data transmission in 300 GHz band for future terahertz communications[J]. Electronics Letters, 2012, 48(15):953–954.
- [21] Kallfass I, Antes J, Schneider T, et al. All Active MMIC-Based Wireless Communication at 220 GHz[J]. IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(2):477–487.
- [22] Kallfass I, Antes J, Lopez-Diaz D, et al. Broadband Active Integrated Circuits for Terahertz Communication[C]// 2012 18th European Wireless. Poznan, Poland:[s.n.], 2012:1–5.
- [23] Antes J, König S, Leuther A, et al. 220 GHz wireless data transmission experiments up to 30 Gbit/s[C]// 2012 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Montreal, QC, Canada:[s.n.], 2012:1–3.
- [24] Koenig S, Lopez-Diaz D, Antes J, et al. Wireless sub-THz communication system with high data rate[J]. Nature Photonics, 2013, 7(12):977–981.
- [25] Moeller L, Federici J, Su K. 2.5 Gbit/s duobinary signalling with narrow bandwidth 0.625 terahertz source[J]. Electronics Letters, 2011, 47(15):856–858.
- [26] DENG Xianjin, WANG Cheng, LIN Changxing, et al. Experimental research on 0.14 THz super high speed wireless communication system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6):1430–1432.
- [27] WANG Cheng, LIN Changxing, DENG Xianjin, et al. 140 GHz data rate wireless communication technology research[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011, 9(3):263–267.
- [28] Wang Cheng, Lin Changxing, Deng Xianjin, et al. Terahertz communication based on high order digital modulation[C]// 2011 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. Houston, TX:[s.n.], 2011:1–2.
- [29] Wang Cheng, Lin Changxing, Chen Qi, et al. 0.14THz High Speed Data Communication Over 1.5 Kilometers[C]// 2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. Wollongong, NSW:[s.n.], 2012:1–2.
- [30] WANG Cheng, LU Bin, MIAO Li, et al. 0.34 THz T/R front-end for wireless communication[C]// The 1st National Terahertz Science and Technology and Application Symposium. Beijing:[s.n.], 2012:331–337.
- [31] Wang Cheng, Lin Changxing, Chen Qi, et al. A 10 Gbit/s Wireless Communication Link Using 16QAM Modulation in 140 GHz Band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(7):2737–2746.
- [32] Wang Cheng, Lu Bin, Lin Changxing, et al. 0.34 THz Wireless Link Based on High Order Modulation for Future Wireless Local Area Network[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014, 4(2):75–85.
- [33] LIN Changxing, LU Bin, WANG Cheng, et al. 0.34 THz Wireless Local Area Network demonstration system based on 802.11 protocol[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(1):12–15.
- [34] Tan Zhiyong, Chen Zhen, Cao Juncheng, et al. Wireless terahertz light transmission based on digitally-modulated terahertz quantum-cascade laser[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(3):031403.
- [35] 国内首部基于光电结合的太赫兹高速无线通信系统联调成功[EB/OL]. (2012–06–27). <http://www.ee.uestc.edu.cn/2011/html/201226/10743.html>, 2012.
- [36] YAO Jianquan, CHI Nan, YANG Pengfei, et al. Study and outlook of terahertz communication technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9):2213–2233.

作者简介:

张 健(1968–), 男, 四川省大竹县人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为电子学系统、无线电测控通信、太赫兹科学技术、集成微系统技术等.email:zhjmy@263.net.

王 成(1987–), 男, 四川省射洪县人, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为太赫兹通信、太赫兹固态半导体器件、太赫兹无源器件等.

陆 彬(1985–), 男, 重庆市人, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为太赫兹通信系统、毫米波太赫兹波电路设计.

邓贤进(1973–), 男, 四川省安岳县人, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为电磁场理论、仿真技术、微波技术、收发信道系统技术、太赫兹通信系统技术研究等.

林长星(1986–), 男, 重庆市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹通信, 高速通信调制解调技术及FPGA实现技术研究, 高速实时信号处理系统设计和嵌入式系统设计.

陈 琦(1981–), 男, 重庆市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为电磁场理论与仿真技术、太赫兹电子学、微波毫米波天线等.