

# 宽带太赫兹波在大气中的远程探测研究及展望\*

杨玉平<sup>1,2,†</sup> 杨一宏<sup>2</sup> D. R. Grischkowsky<sup>2</sup>

(1 中央民族大学理学院 北京 100081)

(2 School of Electrical and Computer Engineering, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma, 74078, USA)

2013-06-12收到

† email: ypyang\_cun@126.com

DOI: 10.7693/wl20131005

## Broadband long-path THz pulse transmission through the atmosphere

YANG Yu-Ping<sup>1,2,†</sup> YANG Yi-Hong<sup>2</sup> D. R. Grischkowsky

(1 School of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

(2 School of Electrical and Computer Engineering, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma 74078, USA)

**摘要** 宽带太赫兹波由于具有传输容量大、速率高、方向性好、安全性高、散射小及穿透性好等许多特性,使太赫兹技术在高保密卫星通信、短距离无线通信等方面具有独特的优势。但是,如何克服大气中水蒸气的强吸收,找出适合太赫兹通信的频段,是发展宽带太赫兹远程传输亟待解决的问题。文章介绍了宽带太赫兹波在大气中远程探测的一些关键技术和最新研究成果,同时,对太赫兹通信技术的发展趋势和应用前景作了展望。

**关键词** 太赫兹波, 远程传输, 太赫兹无线通信

**Abstract** Broad band THz radiation has great potential application in wireless communications due to the following features: high data transfer rate, good directionality, high safety, low scattering, high transmittance, and so on. However, many technical problems, such as how to avoid absorption by water vapor and finding the most promising windows of transparency, need to be resolved. In this paper we review several key techniques and latest achievements in the research on long-path THz transmission through the atmosphere. Future trends and application prospects are also discussed.

**Keywords** Terahertz wave, Long-path transmission, THz wireless communication

## 1 引言

太赫兹通信是指用太赫兹波作为信息载体进行的空间通信。因为太赫兹波介于微波与远红外之间,处于电子学向光子学的过渡领域,所以它集合了微波通信与光通信的优点;同时,THz通

信又表现出微波通信与光通信所不具有的优良性质。相对于微波通信,THz通信具有以下优势:

(1)THz通信传输的容量更大,THz波的波段在 $10^{11}$ — $10^{13}$ 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倍甚至上千倍;

(2)太赫兹波束更窄,方向性更好,可以探测更小的目标并进行更精确的定位;

(3)太赫兹波具有更好的保密性及抗干扰能力;

\* 国家自然科学基金(批准号:11104360;11204191)、国家重大仪器设备开发专项(批准号:2012YQ140005)资助项目

(4)由于太赫兹波长相对更短一些,因此,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。

相对于光通信,THz通信具有以下优势:

(1)太赫兹光子能量只有 meV,大概是光子能量的 1/40,相比于光通信而言,能量效率更高;

(2)太赫兹具有很好的穿透沙尘烟雾的能力,可以在大风沙尘以及浓烟等恶劣环境下进行全天候的通信工作。

当然,如图1所示,太赫兹波在通过各种不同天气条件下的大气时,水蒸气导致的强吸收致使其效率很低,以及在目前的太赫兹源中相对低的发射功率,都会给太赫兹通信带来明显的不利。因此,本文重点介绍美国俄克拉荷马州立大学 Grischkowsky 教授发展的高效率太赫兹时域光谱系统,以及近期在大气中远程探测宽带太赫兹波的重要成果。

## 2 基于光电导天线的太赫兹时域光谱系统

1986年,美国IBM的研究人员<sup>[2]</sup>首次将两束具有皮秒量级光程差的光脉冲打在精心设计的光导器件上,通过移动延迟线将皮秒量级的电脉冲记录下来。1988年,D. Grischkowsky<sup>[3]</sup>将这种技术应用于太赫兹波的产生和探测上,创造性地发明了被后人称为 Grischkowsky 天线的专用于太赫兹发射和接收的光电导天线,拉开了太赫兹光谱研究的序幕,此后,他所使用的太赫兹系统的基本结构也一直被沿用至今,成为太赫兹时域光谱(Terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS)系统的典型结构<sup>[4]</sup>,如图

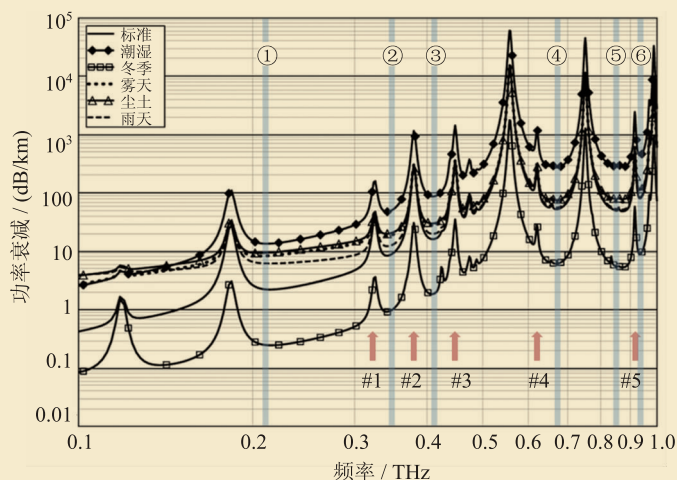


图1 水蒸气强吸收导致的太赫兹功率衰减(引自文献[1])(其中,标准天气: 20°C,相对湿度(RH)为44%;潮湿天气: 35°C, RH为90%;冬季: -10°C, RH为30%;雾天: 20°C, RH为44%;尘土: 20°C, RH为44%;雨天: 20°C, RH为44%)

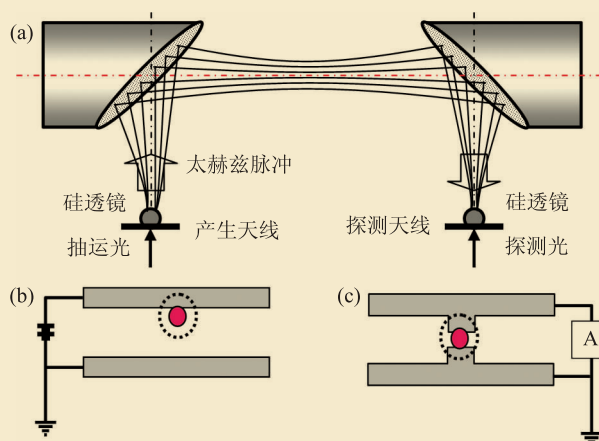


图2 (a)基于光电导天线产生和探测的太赫兹时域光谱系统示意图; (b)激发偶极子天线; (c)探测光电导天线示意图

2(a)所示。Grischkowsky 教授也被国际学术界誉为“太赫兹时域频谱之父”。

掺钛蓝宝石激光器作为激发光源,发射出中心波长为 800 nm,脉宽为 80 fs,平均功率为 330 mW 的超短脉冲, GaAs 光电导天线分别安装在两个高阻硅半球透镜上,形成太赫兹发射器和探测器。飞秒激光束被分成两束,一束作为产生 THz 脉冲的抽运光激发偶极子天线(如图2(b)所示),光生载流子在偏置电场作用下做加速运动,发射出 THz 辐射。另一束作为探测 THz 脉冲的探测光,

激发另一个光电导天线(如图2(c)所示),利用探测光在半导体上产生的光电流与THz驱动电场成正比的特性,测量THz脉冲的瞬间电场。延迟装置通过改变探测光与产生光之间的光程差,使探测光在不同的时刻对THz脉冲的电场强度进行取样测量,最后获得THz脉冲电场强度的时间波形。

该系统有如下突出特点:

(1)效率高:光导天线产生太赫兹辐射的能量主要来自于偏置电场,与非线性晶体相比,辐射效率高。正如下文所述,实验过程中仅使用平均功率为10 mW的抽运光和探测光,即可实现167 m的远程探测;

(2)带宽宽:由于激发偶极子天线的两平行金属电极的间距仅有5  $\mu\text{m}$ ,可实现0.2—4.5 THz的有效带宽,可为太赫兹“指纹谱”鉴别技术提供更丰富的光谱信息,增强辨别能力<sup>[5]</sup>;

(3)信噪比高:THz-TDS是同步相干探测,对热背景噪声不敏感,可以获得很高的信噪比;同时,太赫兹发射器和探测器的两个高阻硅半球透镜能改善进入(或远离)光导天线的THz光束耦合效率;系统信噪比高于5000,且长期稳定,易于维护;

(4)光谱分辨率高:基于光电导天线产生和探测的宽带太赫兹光谱技术,能有效地避免界面的多重反射,并实现长扫描,测量分辨率高于7 GHz,

可以用于观测超高分辨的表面等离子体共振<sup>[6-8]</sup>,进行炸药检测<sup>[9]</sup>和生物化学指纹谱分析<sup>[10-12]</sup>等。

### 3 0.2—2 THz 太赫兹波在大气中传输6.18 m的透射特征

太赫兹波的远距离探测系统是在传统的太赫兹时域光谱系统的基础上发展起来的,最关键的就是要将发射器中产生的太赫兹波耦合到空间或将空间中的太赫兹波耦合进探测器而不破坏波束质量。2011年,Grischkowsky等人<sup>[13]</sup>将一对可移动的反射镜单元插入到两个抛物反射镜之间,将光学平台(见图3中的Box #1)上激发出的太赫兹波耦合到长管道(见图3中的Box #2)中,该管道的末端与直径为15.24 cm、曲率半径为304.8 cm的金属凹面镜连接起来。经金属凹面镜反射回来的太赫兹波再由反射镜单元耦合进太赫兹探测天线中,整个路程为309 cm,往返距离为6.18 m。加上密封箱(Box #1)中附加的25 cm,总往返距离为6.68 m,恰为激光超短脉冲间隔3.34 ns(对应的重复频率为89.82 MHz)的两倍。因此,远程传输的太赫兹脉冲恰好由2个脉冲延迟后的采样脉冲进行相干扫描测量,从而有效地克服了延迟线的有限长度,这也是超短太赫兹脉冲远程相干探测的另一个关键技术。

取干燥空气情况下测量的THz脉冲为参考脉冲,湿润空气情况下(相对湿度 $RH=51\%$ ,温度 $T=21^\circ\text{C}$ )测量的THz脉冲为样品脉冲,如图4(a)所示;时域波形经插值补零后达到1650 ps的扫描窗口(以保证光谱的分辨率达到0.61 GHz),再快速进行傅里叶变换,得到参考脉冲和样品脉冲的傅里叶变换光谱,如图4(b)所示;两者相比,可得到大气在0.2—2 THz范围内的振幅透射谱,其

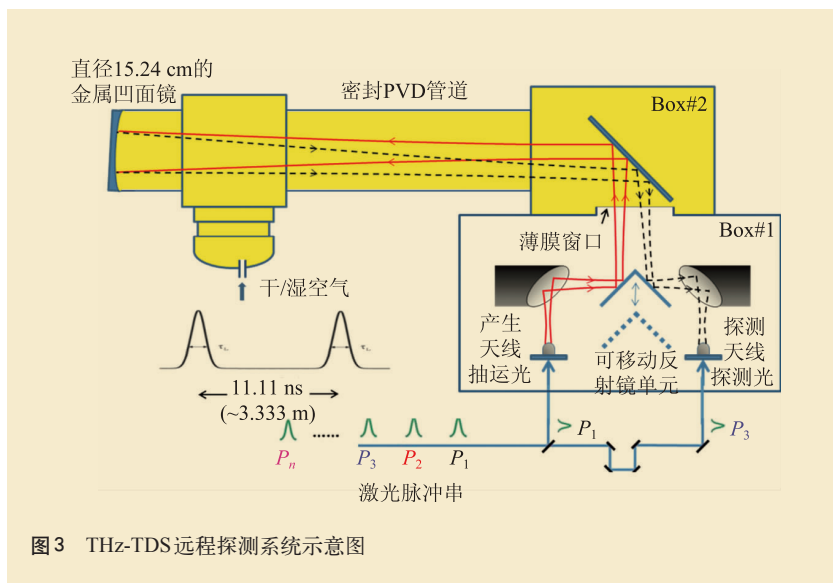


图3 THz-TDS 远程探测系统示意图

功率损耗的测量精度优于 $\pm 10$  dB/km, 如图 4(c)所示。可以看出, 经过6.68m的远程传输, 大气在 0.325(#1), 0.381(#2), 0.448(#3), 0.620(#4), 0.916(#5), 0.971(#6), 1.278(#7), 1.296(#8), 1.322(#9) 和 1.542(#10)THz 附近有弱吸收线, 在 0.557, 0.752, 0.988, 1.100( $\pm 0.003$ ), 1.157( $\pm 0.003$ ), 1.219( $\pm 0.010$ ), 1.411, 1.794( $\pm 0.133$ )THz 附近有强吸收线。在这些吸收线之间存在 10 个高透射窗口, 且它们的透射率随频率的增加而递减。这 10 个高透射窗口是:  $\sim 100\%$  @ 0.21 THz ① (其中@表示位于某处, 此处表示位于频率为 0.21 THz 处的透过率为 $\sim 100\%$ ), 98% @ 0.35 THz ②, 97.5% @ 0.41 THz ③, 95% @ 0.68 THz ④, 94% @ 0.85 THz ⑤, 90% @ 0.93 THz ⑥, 80% @ 1.03 THz ⑦, 77.5% @ 1.35 THz ⑧, 79% @ 1.49 THz ⑨ 和 66% @ 1.98 THz ⑩。

#### 4 0–1.8 THz 太赫兹在大气中传输 167 m 的透射特征

随着 THz 波传输距离的增加, 由于 THz 波长较长, 光学元件的有限尺寸引起的衍射效应不能忽略。2007 年, 美国伦斯勒理工学院的张希成研究小组<sup>[14]</sup>搭建了传输距离为 108 m 的太赫兹波探测系统, 并用于爆炸样品的远程检测, 其中低频分量衰减主要是由于系统中 30 多个反射镜的衍射损耗引起的。2011 年, 美国俄克拉荷马州立大学的 Grischkowsky 研究小组<sup>[15]</sup>基于低功率的太赫兹天

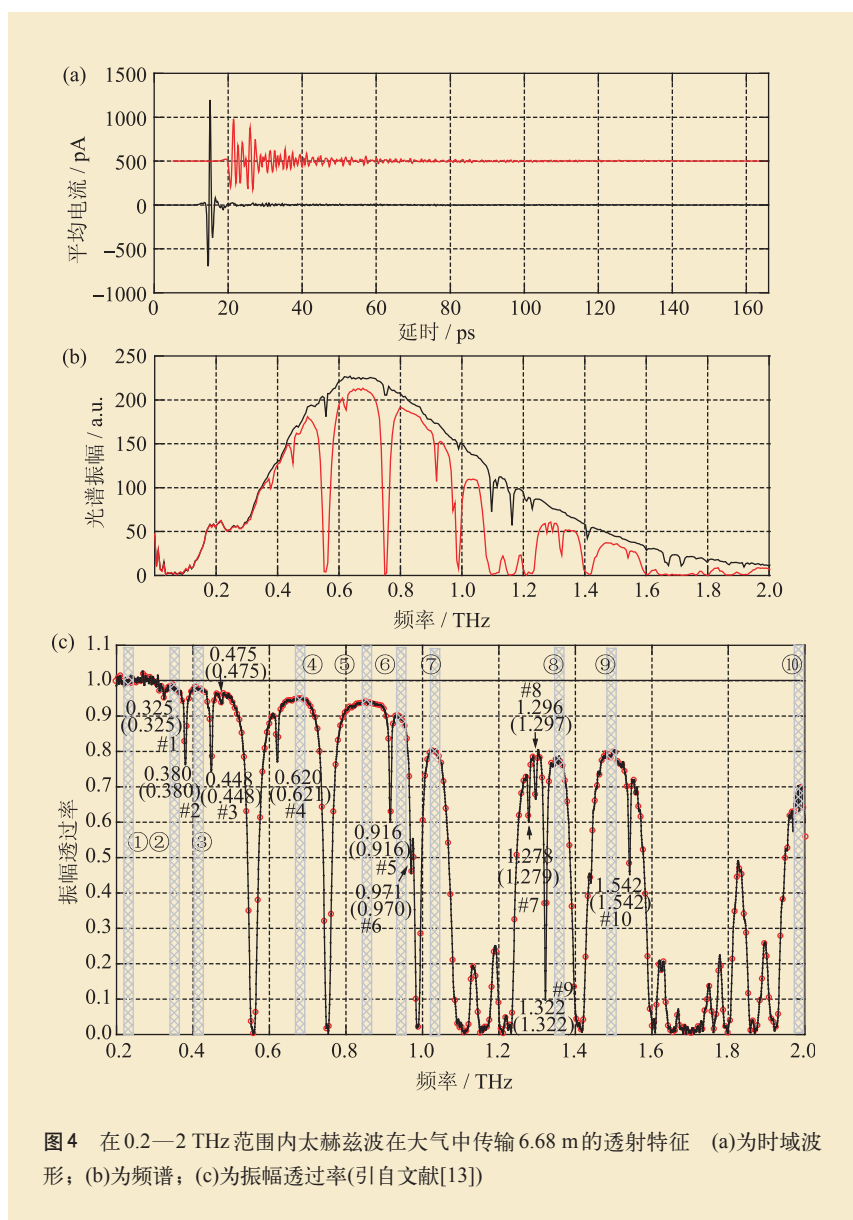


图4 在0.2—2 THz 范围内太赫兹波在大气中传输 6.68 m 的透射特征 (a)为时域波形; (b)为频谱; (c)为振幅透射率(引自文献[13])

线(10 mW)搭建了世界上距离最远的高 SNR(信噪比)太赫兹远程探测系统。传输距离为 167 m, 恰为激光超短脉冲间隔(3.34 m)的 50 倍。该系统的性能主要取决于以下三个因素: 进出图 3 所示 Box#1 的耦合效率, 系统的稳定性和衍射损耗。在实验中, 为了减小衍射损耗, 图 3 的 Box#2 中, 均选用尺寸较大光学元件, 其中直径为 31.8 cm, 曲率半径为 635 cm(焦距 $f=317.5$  cm)的金属凹面镜的焦距恰好放置在 THz 波高斯光束的束腰位置, 用于准直和收集太赫兹波。

在干燥空气情况下( $RH=7\%$ ,  $T=21^\circ\text{C}$ ), 经

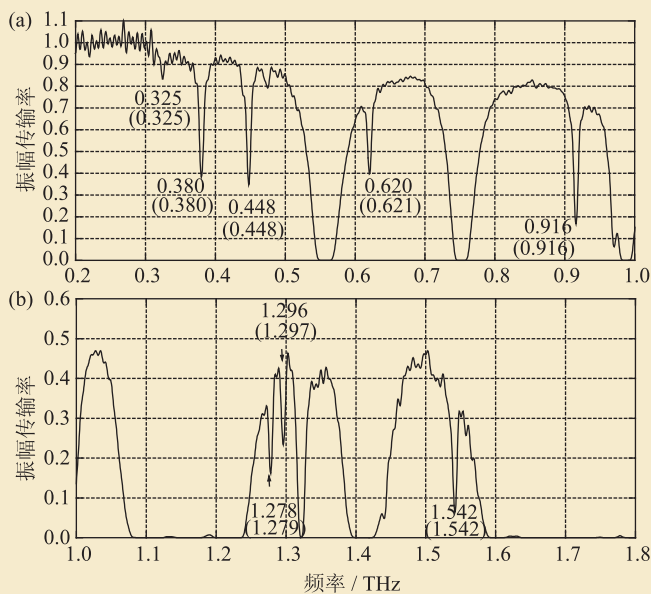


图5 在0.2—1.8 THz范围内,太赫兹波在大气中传输167 m的透射特征(引自文献[15])(其中,括号内的数字是数据库参考值;括号上方的对应数字是测量值)

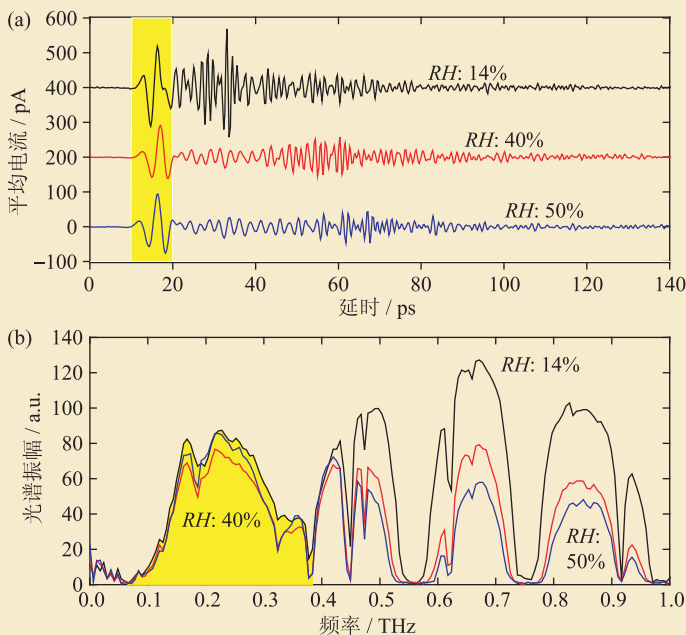


图6 在0—1.0 THz范围内太赫兹波在 $L=167\text{ m}$ ,  $RH=14\%$ ,  $40\%$ ,  $50\%$ 情况下的透射特征 (a)为时域波形; (b)为频谱(引自文献[15])

167 m 远程传输,得到大气在0.2—1.8 THz范围内的振幅透射谱如图5所示。从图5可以看出,在0.2—0.3 THz范围内,太赫兹波几乎无衰减;在0.3—0.5 THz范围内,太赫兹波有少量吸收;在

0.5—1.0 THz范围内,透明窗口中出现少量以水蒸气吸收线为中心的窄带吸收;在1.0—2.0 THz范围内,太赫兹波被大量、连续的宽带吸收,太赫兹波几乎被全部衰减。

改变空气的相对湿度,在167 m的潮湿路径下( $RH=40\%$ 和 $50\%$ ),由于水蒸气的吸收衰减加强,所有大于1 THz的频率都被吸收了,而0.07—1 THz的频率则被选择性地吸收,其中0.37—1.0 THz的太赫兹波(黄色标注后面区域)随着相对湿度的加大,吸收明显增强,并且整个传播脉冲也由于群速度色散(GVD)而被展宽。但是,0.07—0.37 THz的太赫兹波(黄色区域)几乎没有被吸收,色散展宽基本可以忽略,如图6所示。由于0.07—0.37 THz太赫兹波在远程大气传输中的低损耗、低色散特性,它可用于太赫兹数字通信的比特脉冲。

## 5 用于数字通信的THz比特脉冲

THz时域光谱的突出特点是,能将THz波远程传输过程中THz电场脉冲信号的时间演变和位相信息同时观测出来,可以方便地用于研究THz比特脉冲的衰减与色散信息。THz发射脉冲如图4(a)中的黑色曲线所示,脉宽大约为0.5 ps。在大气远程传输过程中,由于高频分量具有较高的衰减率和较低的群速度,最初的亚皮秒THz脉冲被展宽为160 ps的超长脉冲;同时高频分量和低频分量在时域上被分离开。频率越高,延迟时间越长,损耗也越大;相反,脉冲前端(黄色所示为主脉冲)

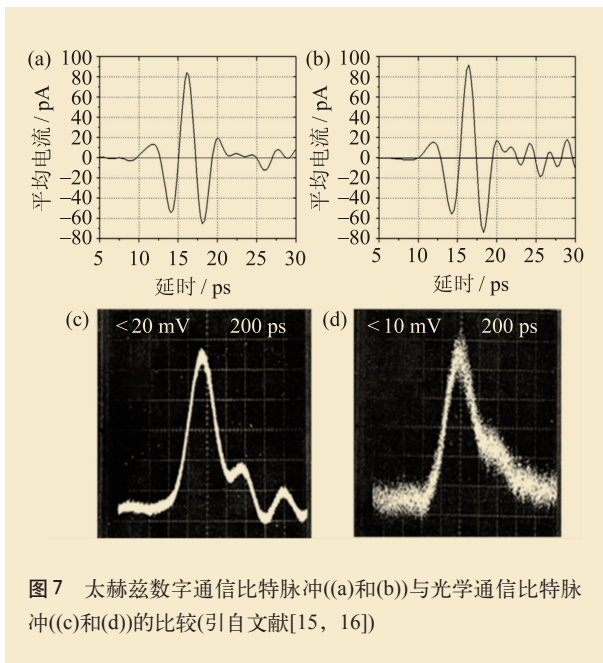


图7 太赫兹数字通信比特脉冲((a)和(b))与光学通信比特脉冲((c)和(d))的比较(引自文献[15, 16])

的低频分量由于受水蒸气吸收和色散影响很小, 振幅和形状几乎没发生改变。由此类推, 随着传播距离的进一步增加( $>1 \text{ km}$ ), 高频分量将被全部吸收, 仅剩下低频段的比特脉冲用于太赫兹数字信号传输。

为了进一步验证 THz 比特脉冲经 167 m 传输路径后的位相相干特性, 我们将 0.07—0.37 THz 波段的太赫兹振幅谱( $RH=50\%$ )做反傅里叶变换计算, 得到位相相关的太赫兹波形, 如图 7(a)所示。与实验测量得到的时域波形图 7(b)保持一致, 且具有相同的时间尺度。假设在  $L=167 \text{ m}$  传播距离下, 两相邻 THz 比特脉冲的间隔为  $\Delta t=20 \text{ ps}$ , 则最大的比特率  $B=1/\Delta t=50 \text{ Gb/s}$ , 通信容量为  $B \cdot L=8.3(\text{Gb/s}) \cdot \text{km}$ 。这一结果可与早期第二代

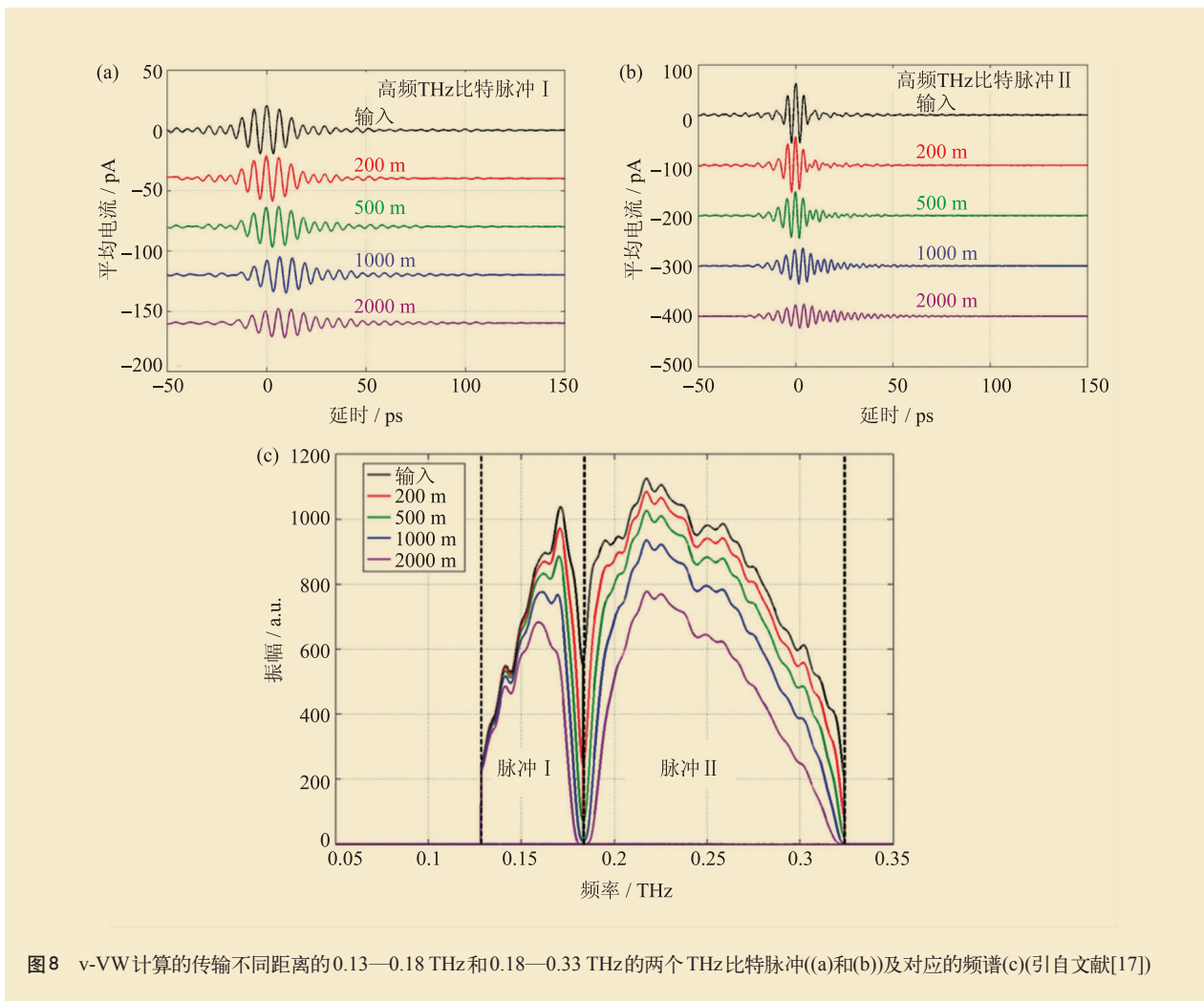


图8 v-VW 计算的传输不同距离的 0.13—0.18 THz 和 0.18—0.33 THz 的两个 THz 比特脉冲((a)和(b))及对应的频谱(c)(引自文献[17])

单模光纤通信的通信容量( $10 \text{ Gb/s} \cdot \text{km}$ )相比拟,如图7(c)和(d)所示。

最近,我们采用 van-Vleck Weisskopf (v-VW) 理论数值计算<sup>[17, 18]</sup>,发现当 THz 比特脉冲在  $>1000 \text{ m}$  的传输路径下,可演变成  $0.13 - 0.18 \text{ THz}$  和  $0.18 - 0.33 \text{ THz}$  的两个 THz 比特脉冲,它们在  $200 \text{ m}$ ,  $500 \text{ m}$ ,  $1000 \text{ m}$  和  $2000 \text{ m}$  传输路径下的波形和振幅谱如图8所示。在  $L = 2000 \text{ m}$  传播距离下,比特脉冲 I 和 II 的通信容量分别可达到  $20(\text{Gb/s}) \cdot \text{km}$  和  $40(\text{Gb/s}) \cdot \text{km}$ 。因此,THz 无线通信完全可以取代现有的无线设备,来满足日益增长的高速率数据无线传输的需求,尤其是在现有无线设备已经无法发挥正在使用的光纤骨干网极大通信容量优势的今天,THz 无线通信作为信息高速公路的“最后一英里”用户接入技术,能够将用户与光纤骨干网超高速连接,提高用户接入端的传输容量和速度,较好地满足市场对宽带的要求。

## 6 宽带太赫兹波远程探测的应用及展望

### 6.1 安全监测

太赫兹时域光谱技术是一种非常有效的爆炸物测试技术,宽带太赫兹波远程探测的一个非常吸引人的用途是,可以在远距离实现对危险物品

的检测,也就是说,可以允许检测者位于安全距离对可疑物品进行远程遥感检测,以保证检测者的安全。张希成等人<sup>[19]</sup>曾利用太赫兹远程探测技术,通过炸药黑索金(RDX)位于  $0.82 \text{ THz}$  的吸收峰将  $30 \text{ m}$  以外的爆炸样品辨认出来。2012年,美国海军实验室的 Melinger 等人<sup>[20]</sup>将本文中描述的  $6.68 \text{ m}$  和  $167 \text{ m}$  远程探测系统应用到了  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{HCl}$  和  $\text{H}_2\text{S}$  等小分子气体的光谱检测中,通过精确的分子振动模式鉴别分子结构,使该项研究成果在大气空气质量监测、环境污染检测等领域具有广泛应用前景。

由于 THz 波具有比微波更短的波长和具有更高的时间检测精度,因而太赫兹雷达可以对更小的目标实现更精确的定位,进行敏感探测与监视。另外,由于常规吸波材料构成的隐形目标只对很窄的一个波段(微波)适合,宽带太赫兹雷达可使隐形飞机的窄带吸波涂层失去作用。总之,宽带太赫兹雷达具有高分辨率、低截获率、强抗干扰性以及优越的反隐身能力,完全可用于维护国家安全的远程检测与探测。

### 6.2 THz 无线通信

中国是全球最大的移动通信市场,目前大多数业务都集中在  $30 \text{ GHz}$  以下,这使得低频波段的无线电磁谱资源十分拥挤,未来高速的宽带无线通

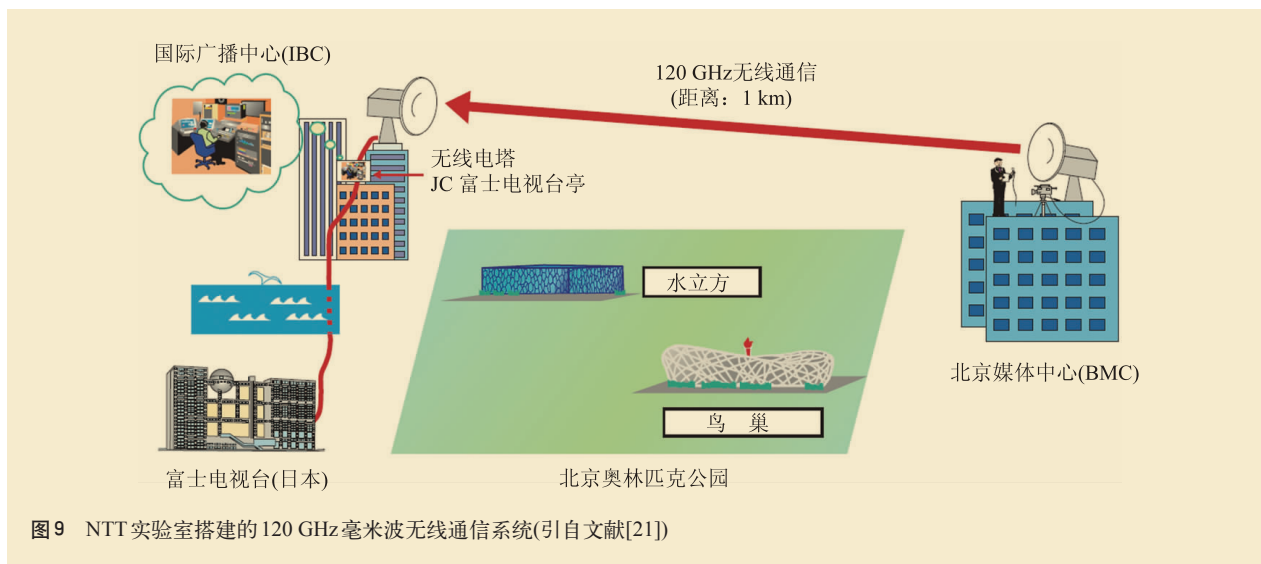


图9 NTT实验室搭建的120 GHz毫米波无线通信系统(引自文献[21])

信必将向无线电磁谱的高频波段扩展。太赫兹波段不需要授权即可使用,且具有传输容量大、速率高、方向性好、安全性高等优点,是未来10 Gb/s无线通信的首选频段。近几年宽带太赫兹波在大气中的远程探测研究成果表明,宽带太赫兹无线通信技术(包括太赫兹蓝牙技术)必将指日可待。

日本NTT公司长期从事通信系统的开发与研究,在无线局域网络(wireless local area networks, WLAN)技术拥有领先的研究条件和技术水平。2004年,该公司首次公布了其搭建的120 GHz毫米波无线通信系统,该系统可实现远距离(>1 km)同时传输6路未压缩的高清晰度电视(HDTV)节目信号。2008年,他们又首次将该无线通信系统发射的太赫兹信号由北京媒体中心(BMC)大楼传输到国际广播中心(IBC)大楼,用于北京奥运会电视节目的直播,如图9所示<sup>[21]</sup>。其中,实验时用到的120 GHz毫米波是由单模信号半导体激光器产生的激光经过光学外差法得到的单频信号,如果采用本文所述的宽频信号,通信传输容量必将大幅度提高。另外,THz无线通信

势必在少数民族、部落等常规微波通信与光通信无法覆盖的偏远、孤立地区,或军事保密基地等发挥巨大作用。

## 7 结束语

本文简单介绍了宽带太赫兹通信的独特优势、综述了宽带太赫兹波在大气远程传输中的传输特性和研究进展。但是作为一种新的通信手段,宽带太赫兹波通信仍然存在着一些困难,主要是如何进一步提高太赫兹波的收发效率,系统的收集效率以及提高高效码调制技术水平等。对于如何进一步提高光电导太赫兹源的性能,可以考虑使用大间距的光电导天线;与小间距天线相比,大孔径光电导天线不但制作更简单,而且能够发射高功率的太赫兹辐射脉冲,且不容易饱和;对于如何提高系统的收集效率,可以考虑使用多跳中继(multi-hop relay)技术,借助新型中继站或空间卫星中转站的开发,可以降低无线网络布建的成本,增加数据传输的可靠性,并提升网络覆盖能力等。

## 参考文献

- [1] Appleby R, Wallace B H. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 2007, 55: 2944
- [2] Ketchen M B, Grischkowsky D, Chen T C *et al.* Appl. Phys. Lett., 1986, 48: 751
- [3] Grischkowsky D, Ketchen M B, Chi C C *et al.* IEEE J. Quantum Electronics, 1988, 24: 221
- [4] Exter M, Fattinger C, Grischkowsky D. Opt. Lett., 1989, 14: 1128
- [5] Yang Y P, Harsha S S, Shutler J A, Grischkowsky D. J. Pharm. Biomed. Anal., 2012, 62: 177
- [6] Yang Y P, Grischkowsky D. Opt. Lett., 2011, 36: 4218
- [7] Yang Y P, Grischkowsky D. Opt. Lett., 2012, 37: 1709
- [8] Yang Y P, Grischkowsky D. IEEE Trans. Terahertz Science and Technology, 2013, 3: 151
- [9] Laman N, Harsha S S, Grischkowsky D *et al.* Opt. Express, 2008, 16: 4049
- [10] Laman N, Harsha S S, Grischkowsky D *et al.* Biophysical Journal, 2008, 94: 1010
- [11] Laman N, Harsha S S, Grischkowsky D. Appl. Spectroscopy, 2008, 62: 319
- [12] Harsha S S, Grischkowsky D. J. Phys. Chem. A, 2010, 114: 3489
- [13] Yang Y, Shutler J A, Grischkowsky D. Opt. Express, 2011, 19: 8830
- [14] Liu H B, Zhong H, Karpowicz N *et al.* Proc. IEEE, 2007, 95: 1514
- [15] Yang Y, Mandehgar M, Grischkowsky D. IEEE Trans. on THz Science and Technology, 2011, 1: 264
- [16] Kawana A, Kawachi M, Miyashita T *et al.* Opt. Lett., 1978, 2: 106
- [17] Yang Y, Mandehgar M, Grischkowsky D. IEEE, Trans. on THz Science and Technology, 2012, 2: 406
- [18] Yang Y, Mandehgar M, Grischkowsky D. Opt. Express, 2012, 20: 26208
- [19] 许景周、张希成著.太赫兹科学与技术与应用.北京大学出版社, 2007. 223—226
- [20] Melinger J S, Yang Y, Mandehgar M, D. Grischkowsky. Opt. Express, 2012, 20: 6788
- [21] Hirata A, Takahashi H, Kukutsu N *et al.* NTT Technical Review, 2009, 7: 1