

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R SM.2352-1号报告
(07/2022)

**275-3 000 GHz频段有源
业务的技术趋势**

**SM系列
频谱管理**



国际电信联盟

前言

无线电通信部门的作用是确保所有无线电通信业务，包括卫星业务，合理、公平、有效和经济地使用无线电频谱，并开展没有频率范围限制的研究，在此基础上通过建议书。

无线电通信部门制定规章制度和政策的职能由世界和区域无线电通信大会以及无线电通信全会完成，并得到各研究组的支持。

知识产权政策（IPR）

ITU-R的知识产权政策在ITU-R第1号决议引用的“ITU-T/ITU-R/ISO/IEC共同专利政策”中做了说明。专利持有者提交专利和许可声明所需表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/zh>获得，该网址也提供了“ITU-T/ITU-R/ISO/IEC共同专利政策实施指南”以及ITU-R专利信息数据库。

ITU-R 系列报告

（也可在以下网址获得：<http://www.itu.int/publ/R-REP/zh>）

系列

标题

BO	卫星传输
BR	用于制作、存档和播放的记录：电视电影
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电测定、业余无线电以及相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定和固定业务系统之间频率共用和协调
SM	频谱管理

注：本ITU-R报告英文版已由研究组按ITU-R第1号决议规定的程序批准。

电子出版物
2025年，日内瓦

© 国际电联 2025

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段翻印本出版物的任何部分。

ITU-R SM.2352-1号报告

275-3 000 GHz频段有源业务的技术趋势

(ITU-R第237/1号课题)

(2015-2022年)

范围

本报告涉及275-3 000 GHz频段有源业务的技术趋势，旨在为筹备有源和无源业务之间以及275-3 000 GHz频段有源业务之间的共用和兼容性研究提供技术信息。

目录

页码

1	引言	3
2	太赫兹的特性、特点和典型应用	4
2.1	275 GHz以上频段的综述	4
2.2	275 GHz以上频段的特性	4
2.3	典型的有源太赫兹应用	5
3	规则信息	6
4	太赫兹无线通信	7
4.1	太赫兹通信系统的可能用例	7
4.2	太赫兹发射机和接收机技术	13
5	感知与成像	18
5.1	太赫兹生成方法	18
5.2	太赫兹摄像机	20
5.3	光谱学	22
5.4	无损测试	23
5.5	太赫兹雷达应用	25
6	无线电接入网中的集成感知和通信 (ISAC)	28
7	国际标准组织内部的太赫兹相关活动	31
8	总结	31
9	参考资料	31

缩写词和首字母缩略语

ATR	衰减全反射
BER	比特差错率
BNA	甲基对硝基苯胺
BWO	回波振荡器
CMOS	互补金属氧化物半导体
D2D	设备到设备
DAST	三氟化二乙氨基硫
DFG	差频产生
EVM	误差矢量幅度
FEL	自由电子激光器
FM-CW	调频连续波
FTIR	傅里叶变换红外光谱学
GaAs	砷化镓
HBT	异质结双极晶体管
HEMT	高电子迁移率场效晶体管
IMPATT	碰撞电离雪崩渡越时间
InP	磷化铟
ISAC	集成传感和通信
ISAR	逆合成孔径雷达
LFMCW	线性调频连续波
LoS	视距
LT-GaAs	低温生长砷化镓
MMIC	单片微波集成电路
NDT	无损测试
NEP	噪声等效功率
NFC	近场通信
NLoS	非视距
QAM	正交调幅
QCL	量子级联激光器
RTD	共振隧穿二极管
SAR	合成孔径雷达
TDS	时域频谱学

TNNNET	隧道注入渡越时间
THz	太赫兹
UTC-PD	单行载流子光电二极管
V2V	车辆到车辆
WLAN	无线局域网

相关的ITU-R建议书和报告

ITU-R P.676建议书 – 大气气体中的衰减和相关效应

ITU-R P.838建议书 – 预测方法中使用的雨天衰减的具体模型

ITU-R P.840建议书 – 云雾引起的衰减

ITU-R F.2107号报告 – 工作在57-134 GHz频段的固定无线系统的特性和应用

ITU-R F.2416号报告 – 工作在275-450 GHz频段的固定业务的技术与操作特性和应用

ITU-R M.2417号报告 – 工作在275-450 GHz频段的陆地移动业务应用的技术与操作特性

ITU-R SM.2450号报告 – 275-450 GHz频率范围内陆地移动、固定和无源业务之间的共用和兼容性研究

1 引言

275 GHz以上频段未划分给具体业务，但《无线电规则》（RR）确定将它用于无源业务、陆地移动和固定业务应用。目前正根据第118号决议（2012年，马拉喀什）研究3 000 GHz以上频率的频谱监管问题。2012年世界无线电通信大会（WRC-12）修订了《无线电规则》第5.565款，确定主管部门将它用于射电天文业务、卫星地球探测业务（无源）和空间研究业务（无源）等无源业务应用。然而，无源业务对275-1 000 GHz频率范围的使用并不排除有源业务对这一范围的使用。

WRC-19批准增加《无线电规则》第5.564A款，它确定275-296 GHz、306-313 GHz、318-333 GHz和356-450 GHz频段由主管部门用于实施陆地移动和固定业务应用，这些应用不需要特定条件来保护卫星地球探测业务（无源）应用，并指明，只有根据第731号决议（WRC-19，修订版）确定了确保保护卫星地球探测业务（无源）应用的具体条件时，296-306 GHz、313-318 GHz和333-356 GHz频段才可供固定和陆地移动业务应用使用。

于2013年起草和批准的ITU-R第237/1号课题“工作在275-1 000 GHz频率范围内的有源业务的技术和操作特性”，鼓励主管部门研究275-1 000 GHz频段有源业务的技术和操作特性。除这两种特性外，还有望开展有源和无源业务以及有源业务之间的共用研究，并根据ITU-R新的第237/1号课题考虑到这些特性。

鉴于275 GHz以上频率技术近来取得的进展，在275 GHz以上频率运行的综合装置和电路使我们能够实现光谱学、成像、无损测试和太赫兹摄像机等复杂应用。虽然这些高频具有使用不能在微波和毫米波频率范围内实现超宽带的优势，但这些优势尚未用于开发超高速无线通信系统和其他有源系统。

除了太赫兹技术的进步外，IEEE 802确定由IEEE 802.15.3d任务组在2017年完成IEEE 802.15.3d-2017标准。IEEE 802.15常设委员会太赫兹现在负责监测和讨论用于太赫兹通信的IEEE 802.15标准的未来机遇。

本报告概要介绍了经研究的275 GHz以上频率范围内有源系统的技术趋势，并试图为筹备共用和兼容性研究提供技术和规则信息。本报告讨论了太赫兹无线通信、感知和成像领域的技术。

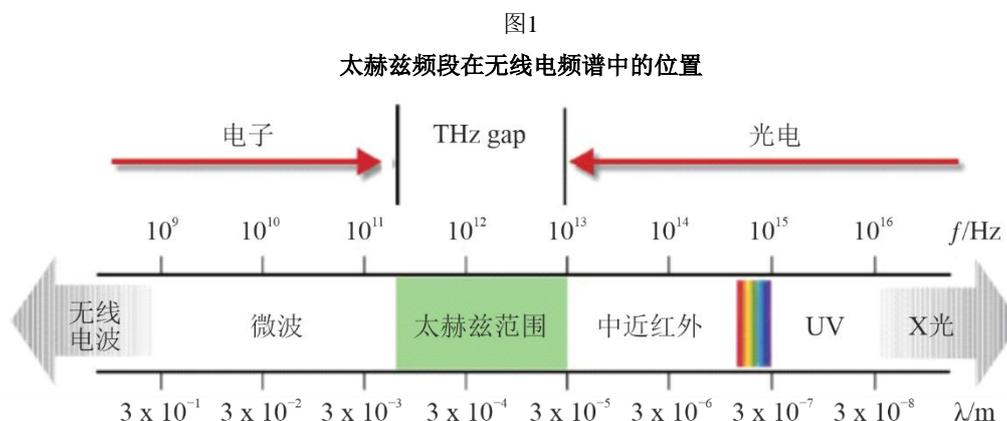
2 太赫兹的特性、特点和典型应用

太赫兹无线应用的研发工作以传统无线应用为基础，经历了微波、毫米波到太赫兹波的过程；同时还部分体现出对激光无线应用的考虑。微波和激光应用不会被太赫兹取代，但太赫兹应用具有多数微波和激光应用不具备的独特优势。

2.1 275 GHz以上频段的综述

275 GHz以上频段是太赫兹频段的主要部分。太赫兹波，亦称亚毫米波辐射，通常是指0.1太赫兹-10太赫兹之间频段和0.03 mm-3 mm相应波长的频段。

电子频谱中的太赫兹频段位置见图1。



SM.2352-1报告

2.2 275 GHz以上频段的特性

由于其独特属性，275 GHz以上频段与其他无线电频段相比具有许多特点。主要特点如下：

(1) 高介电常数

275 GHz以上频段的无线电信号对许多介电材料和非极性液体具有良好的渗透性，能够进行不透明材料或物体的成像，还可用于安全检查或质量控制中的无损试验。

此外，其波长超过悬空的灰尘粒子，而且在灰尘或烟雾中的传输损耗极低，所以可用于沙漠救火场或风尘环境等烟雾环境的成像。

(2) 水中快速衰减

275 GHz以上的无线电信号遇水衰减严重，然而这一特性可为医疗界所用。由于肿瘤组织的含水量与正常组织细胞差异巨大，可通过组织水含量分析癌组织。

(3) 安全

太赫兹的电子能量仅为微电压，大大低于多数化学键的能量。这就是为什么它不会引起电离反应，并且对生物抽样探测和人体检查至关重要。此外，水在此频段具有很强的吸收效应。由于此频段的无线电信号无法穿透人体，对人安全，因而可将它用于皮肤病的医检。

(4) 频谱分辨率

太赫兹频段包括物理和化学等丰富的频谱信息。很多分子，尤其是有机分子，在此频段具有强大的扩散和吸收特性。通过对此频段材料的频谱特性进行研究，可以了解材料的结构特性，确定其构成，分析其物理和化学特性。

(5) 高空间分辨率

275 GHz以上频段比微波频段具有更好的空间分辨率。从理论上讲，由于波长较短，其成像分辨率也高于微波。

(6) 短波长和良好的指向性

与微波相比，较高的频率可被用作在一时间单位内承载更多信息的通信载体。凭借较短的波长和良好的指向性，它极有望被用于某些无线通信应用情境。

2.3 典型的有源太赫兹应用

对太赫兹波所做的进一步研究更多体现出其突出特性。目前该频段依然主要用于天文观测，但随着高功率太赫兹辐射源的出现，275 GHz以上频段在更多应用中表现出潜在的广泛用途。其潜在的典型用途如下：

(1) 分子检测应用

所有物质都处于运动状态，虽然物体看上去固定不动，其内部分子却在飞快运动，而且只要有运动就有辐射。电磁辐射具有自身的振动频率或称为“指纹谱”的波长。多数分子“指纹谱”处于红外和275 GHz以上频段，太赫兹固态激光器可用于检测可由红外线检测的小分子振动引起的辐射。

(2) 安检应用

由于多数炸药和毒品的分子转动能级处于太赫兹范围，因此太赫兹频段的光谱图能够对人体进行安全检测，以发现爆炸物、毒品、生物大分子和武器以及其他禁运品。与现有的X光和超声波成像技术不同，光谱学和成像不仅能够显示物体形状，并且能够对经检测的频谱信息和在用的太赫兹频谱库进行比对，以确定材料特性。此外，凭借极低的能量，该波不会对生物组织造成有害的电离化。因此，与可能对人体造成潜在伤害且其金属探头无法探测非金属材料的X光的弱点相比，太赫兹技术在安检领域具有良好的应用前景。

(3) 生物药品应用

275 GHz以上频段的无线电信号可像水或氧气一样被极化分子吸收，而且不同的分子具有不同的吸收频谱。利用这些频谱线和成像技术，可对皮肤癌和其他表面组织引起的早期损害做出诊断。太赫兹成像系统通常用于外科手术的实时癌症切除检查，此方法可实现比超声波更清晰的软组织成像。此外，太赫兹-时域频谱系统（THz-TDS）也可用于研究其生物分子振动能级或转动能级在太赫兹范围以内的有机大分子，然后向药品生产和医学研究提供指导。

(4) 无线通信领域的应用

275 GHz以上频段处于光电转换阶段，它同时具有微波和光波通信特性。首先，随着通信的快速发展，传统的微波通信难以满足高速、宽带无线通信的需求，而凭借其高数据传输速率和宽广的频谱带宽，这一频段具有未来无线通信的潜力。另一方面，光波在灰尘、墙体、塑料、布匹和其他非金属或非极化物质中的传输衰减严重。275 GHz以上频段可以极低的衰耗穿透这些物质，使它具备了在恶劣环境中的良好穿透能力。但这一频段也有自身弱点，最致命的弱点是它易于被大气中的极性分子所吸收，因此它的大气衰减较为严重，雨天尤其如此。这一特性决定了它未来主要用于星际通信、地面短距宽带移动通信和干燥雾霾天气或战场等恶劣环境。

(5) 雷达应用

太赫兹波在雷达、目标识别、精确制导和导火索等领域具有潜在的应用前景。利用太赫兹波良好的指向性和能量集中特性，可以制作出低仰角的高分辨率雷达和跟踪雷达。利用其透过材料的成像优势，可以侦测出藏于覆盖物或烟霾后面的物体。利用其穿透灰尘和烟尘的优势，可以制造出使飞机能够雾天着陆的全天候导航系统。与其他波段相比，太赫兹波属于宽带，与在用的隐身技术频段相比具有更广的频率范围，所以将太赫兹波用作辐射源的超宽带雷达能够得到隐身飞机的图形。

3 规则信息

对《无线电规则》第5.565款的修改旨在使主管部门能够在WRC-12期间将它用于射电天文业务、卫星地球探测业务（无源）和空间研究业务（无源）等无源业务应用。增加《无线电规则》第5.564A款，以便在WRC-19上确定用于操作陆地移动和固定业务应用的四个频段。《无线电规则》（2020年版）第5.564A和第5.565款如下所示。

248-3 000 GHz

划分给以下业务		
1区	2区	3区
...		
275-3 000	(未划分) 5.564A 5.565	

5.564A 对于275-450 GHz范围内频段中固定和陆地移动业务应用的操作：

275-296 GHz、306-313 GHz、318-333 GHz和356-450 GHz频段被确定由各主管部门用于实施陆地移动和固定业务应用，不需要具体条件来保护卫星地球探测业务（无源）应用。

只有在根据第731号决议（WRC-19，修订版）确定确保保护卫星地球探测业务（无源）应用的具体条件时，296-306 GHz、313-318 GHz和333-356 GHz频段才可供固定和陆地移动业务应用使用。

根据第731号决议（WRC-19，修订版）逐案确定，在275-450 GHz频率范围内使用射电天文应用的那些部分，可能需要具体条件（例如，最小间隔距离和/或规避角）来确保对陆地移动和/或固定业务应用中射电天文站点的保护。

陆地移动和固定业务应用使用上述频段并不排除275-450 GHz频段范围内任何其他无线电业务应用对之的使用，也未确立针对这些应用的优先地位。（WRC-19）

5.565 各主管部门确定将275-1 000 GHz频率范围内的以下频段用于无源业务应用：

- 射电天文业务：275-323 GHz、327-371 GHz、388-424 GHz、426-442 GHz、453-510 GHz、623-711 GHz、795-909 GHz和926-945 GHz；
- 卫星地球探测业务（无源）和空间研究业务（无源）：275-286 GHz, 296-306 GHz, 313-356 GHz, 361-365 GHz, 369-392 GHz, 397-399 GHz, 409-411 GHz, 416-434 GHz, 439-467 GHz, 477-502 GHz, 523-527 GHz, 538-581 GHz, 611-630 GHz, 634-654 GHz, 657-692 GHz, 713-718 GHz, 729-733 GHz, 750-754 GHz, 771-776 GHz, 823-846 GHz, 850-854 GHz, 857-862 GHz, 866-882 GHz, 905-928 GHz, 951-956 GHz, 968-973 GHz 和 985-990 GHz.

无源业务对275-1 000 GHz范围的使用不排除有源业务对该范围的使用。敦促希望将275-1 000 GHz范围内的频率用于有源业务应用的主管部门采取一切切实可行的措施，在上述275-1 000 GHz频率范围内的频率划分表确定之前，保护这些无源业务免受有害干扰。

有源和无源业务均可使用1 000-3 000 GHz范围的所有频率。（WRC-12）

4 太赫兹无线通信

目前就275 GHz以上频段的超宽带无线通信系统开展了一系列研究活动。部分研究针对与40-Gbit/s和100-Gbit/s以太网驳接的超高速无线通信系统。

由于采用太赫兹技术的通信链路的高传输能力和大传播损耗，这些链路可以用作最后一英里的接入链路。随着近年来太赫兹频率范围内半导体技术和先进天线技术的发展，太赫兹无线通信在一些传输距离更长（如几英里）的应用场景中也作为光纤替代品得到部署。研发机构演示了采用275 GHz以上频率的多项试点。

4.1 太赫兹通信系统的可能用例

在研究太赫兹通信的用例时，应考虑到以下具体问题：

- 超宽频段带宽的使用。
- 天线和装置小型化的可能性。
- 高指向性和大自由空间传播损耗（波长小于60 GHz频段的1/5，虽然自由空间传播损耗达25倍甚至更高，但它得到高增益天线特性的补偿）。
- 振荡器、功率放大器和波速控制天线等制造技术的开发。

4.1.1 芯片间以及设备内通信

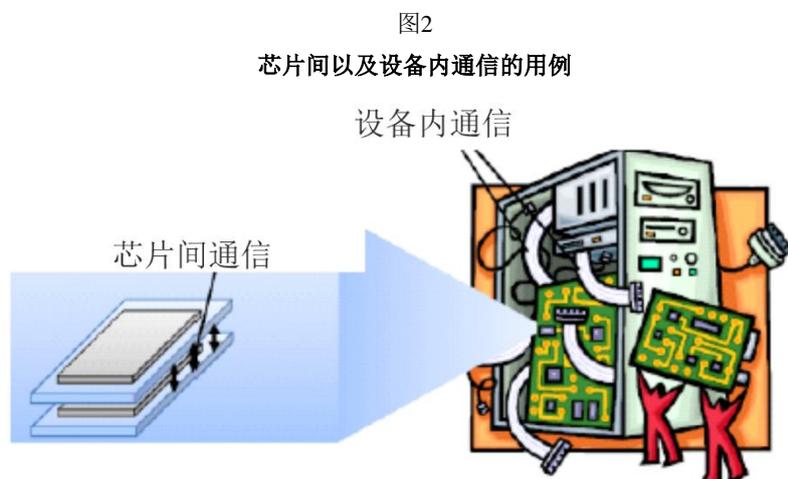
图2显示了芯片间以及设备内通信的用例。无线连接的部件和电路版渴望具有消除布线和使底层和装置小型化的效应。

表1显示了这一用例的典型要求。根据总结，在同一房间内部署IC和/或铺设IC部署底层时，通信距离在几毫米至几十厘米之间。

就传输速度而言，已确定USB 3.1使用10 Gbit/s的速率，而至于PCIExpress 4.0，已在4 GB/s = 32 Gbit/s（双向）将数据链路层的传输速率标准化，此外还在绑定达64道时将它提升至4 GB/s × 64 = 256 GB/s（2 Tbit/s）。

虽然并不总需要向超过Tbit/s速率的通信提供支持，但在利用太赫兹的芯片间和设备内通信中，将需要至少几十Gbit/s的超高速传输。

至于传播环境，必须研究将LoS和NLoS通信作为罩（即一种伴有强大反射波的金属外罩）内邻近模型或很近模型进行研究。必须考虑到很近排列的装置之间的多路径以及通过太赫兹波穿透底层而实现的装置外罩内壁多路径效应。



SM.2352-2报告

表1
典型要求

通信距离	几毫米（芯片间）至几厘米（设备内）
数据速率	几十Gbit/s
传播环境	外罩内的很近距离和邻近模型（LoS/NLoS）
要求的BER	10^{-9}

4.1.2 通过很近距离通信实现内容与云的同步化

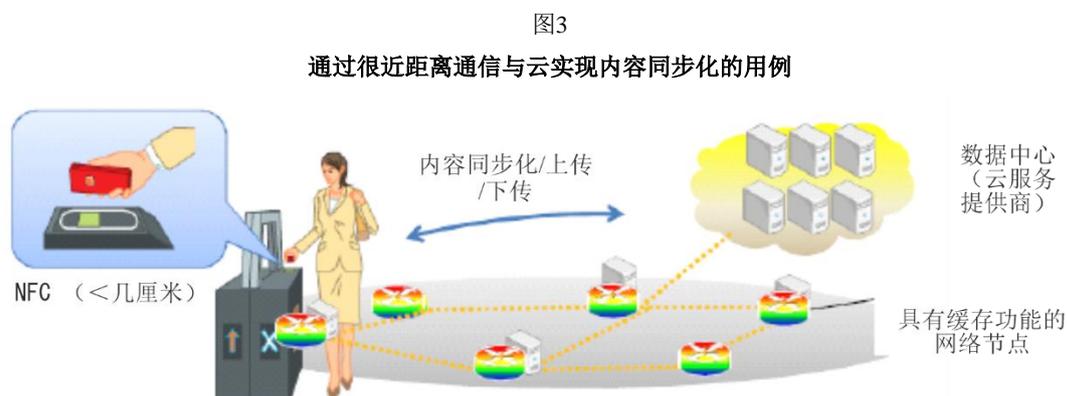
图3显示了通过很近距离通信实现内容与云同步化的用例。近来，采用云的服务以及智能电话和云之间的合作服务都在迅速发展。

云存储服务是云服务之一，可在用户不知晓这一同步过程的情况下，通过网络在用户智能电话上存储图片和视频截图。然而，采用3G的分组通信和智能电话在用户不知情的情况下进行内容同步化所用的LTE，导致了未曾预料的电池电耗的增加。

这一用户案例假设，除了火车站自动检票口的IC计费功能外，用户还可拥有配备太赫兹通信功能的智能电话。在前往办公室和学习路上经过火车站检票口时，通过太赫兹通信同时实现的内容同步化将压缩智能电话的电池耗电量。

表2显示了这些用户案例的典型需求。虽然通信距离小于几厘米，为使实际数据量或内容在大约1秒钟的极短时间内同步化，速率应尽可能快。为此，除通信速率外，还有必要开发认证和关联系统，以缩短通信链路的建立时间。此外，即使超过100 Gbit/s的很近距离通信可行，仍有必要研究这些用例中配备了这些功能的智能电话，能否以其存储的读写速度跟上如此高速的传输。举例而言，目前世界公布的最快固态硬盘（SSD）的读写速率约为500 Mbytes/s（4 Gbit/s）。

另据假设，传播环境将是仅适用于LoS的装置间邻近模型。需要查明邻近装置间的多路径反射是否会影响数据传送。



SM.2352-3报告

表2
典型要求

通信距离	长达几厘米（邻近）
数据速率	4 Gbit/s – 几十 Gbit/s
传播环境	装置间邻近模型（LoS）
要求的BER	10^{-12}

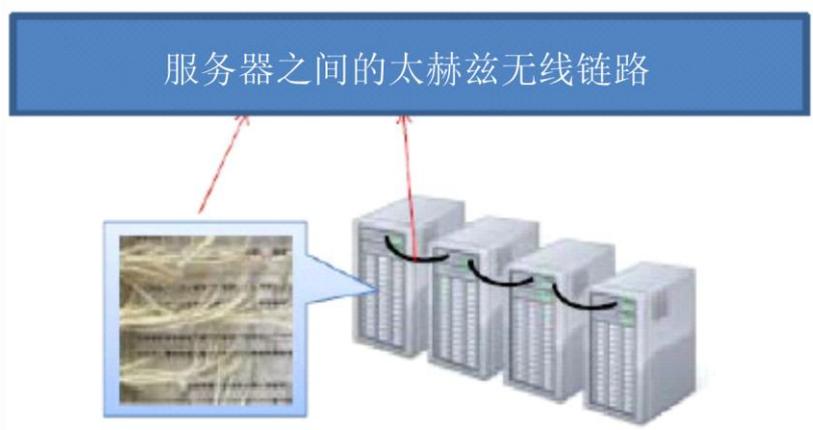
4.1.3 数据中心内服务器之间的无线链路

图4显示了数据中心内服务器之间太赫兹通信的用例。近来，利用云的服务快速发展，使数据中心的建设提速。总之，数据中心拥有配备了包括存储和多交换机的不同服务器的服务器机架，其间最好采用无线布线。

表3显示了这一案例的典型要求。可以假设服务器机架内纵向排列的服务器之间连接的通信距离为几厘米，而假设的机架的连接间距为100米。

至于传播环境，有必要同时考虑LoS和NLoS，因为可以假设，办公室模型的建筑材料采用了较低渗透性（高反射性）的建筑材料，如果设想服务器机架放置在靠近墙面的位置并用太赫兹通信链路取代背板电缆连接的特殊情况，可在背板之间采用两径模型。

图4
数据中心内服务器之间的无线链路



SM.2352-4报告

表3
典型要求

通信距离	几厘米（邻近）– 100米
数据速率	几十 Gbit/s – 几百 Gbit/s
传播环境	办公室模式/双波模式（LoS/NLoS）
要求的BER	10^{-12}

4.1.4 无线回传/前传

回传链路是基站和更集中化网源之间的连接，而前传链路则是基站无线设备控制器和远程无线电头（无线电单元）之间的前传链路。小信源的大量部署、合作多点传输（CoMP）和/或云无线电接入网（C-RAN）采用的进一步进展，可能提高前传和回传所需的数据速率。在无法获得光纤链路的情况下，利用无线网络实现这类链路具有吸引力。

在需要数十个Gbit/s的情况下，可将太赫兹频率范围视为具有吸引力的解决方案。在[1]描述的演示中，在1公里的链路距离上实现了24 Gbit/s的数据速率。

表4
典型要求

通信距离	100米至300米
数据速率	高达100 Gbit/s
传播环境	室外
要求的BER	未提供

4.1.5 太赫兹无线局域网（太赫兹WLAN）

图5展示了太赫兹无线局域网（WLAN）的案例。随着无线通信技术的发展，WLAN在人类生活当中发挥着越来越重要的作用，免除了线路对人们的束缚。如今，同互联网和移动通信网络一样，WLAN成为了信息传输的重要手段，并广泛用于机场、办公室、餐馆和家庭等。太赫兹频率为1-4个数量级，高于微波，且其速率可达10 Gbit/s。考虑到太赫兹WLAN的高速、宽带、结构紧凑、小巧、低辐射损耗和强大抗干扰能力，可将它用于未来高质量视频电话、视频会议、真实3D游戏等商业和军事用途。

图5

太赫兹WLAN的用例



SM.2352-5报告

表5

典型要求

通信距离	数十米
数据速率	数个Mbit/s至数十个Mbit/s
传播环境	办公室、机场、餐馆
要求的BER	$\leq 1 \times 10^{-6}$

4.1.6 太赫兹固定无线接入

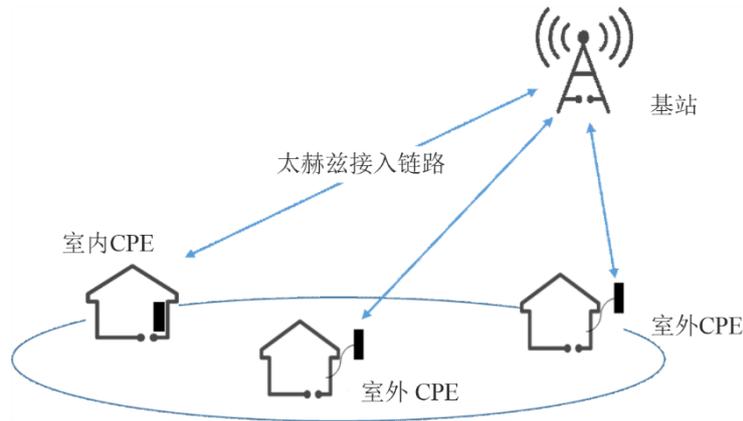
固定无线接入（FWA）在光纤链路不可用或价格昂贵的地方为个人或企业客户提供稳定和可靠的宽带接入业务。得益于其快速部署、成本低廉等优势，已在全球广泛商用。近年来，由于家庭宽带业务和带宽需求高的应用对传输数据速率（即几百或更高 Gbit/s）的需求与日俱增，太赫兹频段被视为一种有吸引力的解决方案。

图6显示了太赫兹固定无线接入的用例。多个用户通过一种称为CPE（即客户端设备）的专用设备同时连接到一个基站。通信距离可能从几十米到几千米不等。在某些情况下，为了减少建筑材料的穿透损耗，CPE安装在室外。

表6列出了这一用例下的典型要求。就传播环境而言，将同时检查LoS和从室外到室内（O2I）的模型。

图6

太赫兹固定无线接入的用例



SM.2352-6报告

表6

典型要求

通信距离	50米至1 000米
数据速率	高至Tbit/s
传播环境	室外、从室外到室内
要求的BER	10^{-5}

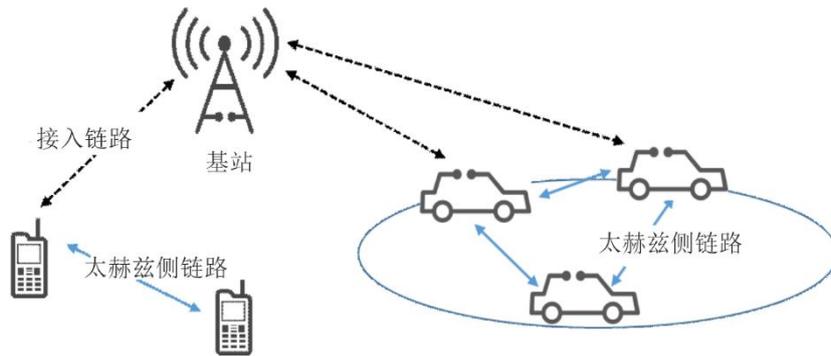
4.1.7 太赫兹侧链路通信

图7显示了太赫兹无线侧链路通信的一个用例。侧链路是一种辅助性对等通信链路，它复用无线电接入链路的关键特征，是无线电接入网的一个有机组成部分。它使移动设备能够在短距离或中距离上直接与附近的设备进行通信。因此，基站的数据流量被卸载，而这些移动设备之间的交互延迟也被减少。设备到设备（D2D）和车辆到车辆（V2V）通信是两种具有代表性的侧链路通信。

最近，全息交互、自动或辅助驾驶等新的无线应用已经出现，对通信链路的带宽和传输延迟提出了进一步的要求。因此，最好在太赫兹频率范围内使用侧链路通信。

表7列出了这一用例下的典型要求。至于传播环境，有必要同时考虑室外和室内两种情况。

图7
太赫兹侧链路通信的用例



SM.2352-7报告

表7
典型要求

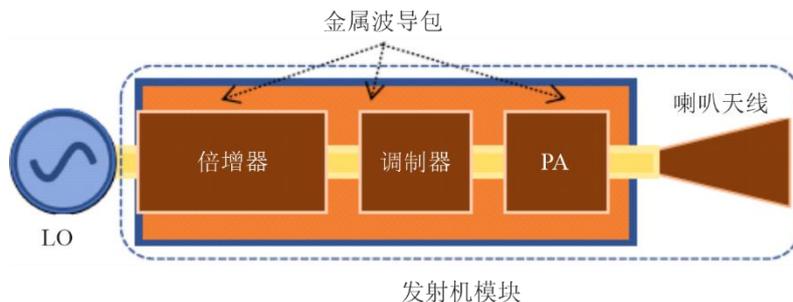
通信距离	几米至几十米
数据速率	几十Gbit/s至高达Tbit/s
传播环境	室外/室内
要求的BER	未提供

4.2 太赫兹发射机和接收机技术

4.2.1 利用MMIC的300 GHz发射机和接收机模块

图8显示了发射机模块的总体结构框图。在金属波导包中安装了喇叭天线、功率放大器、调制器和倍增器。倍增器对本地振荡器生成的75 GHz载波进行倍增，并将20 GHz信号提供给调制器。为对输出模块进行评估，通过安装评估用接收机模块对评估系统进行配置。接收机模块包括一个标准的喇叭天线（24 dBi），而波导模块则配备了肖特基势垒二极管。图9显示了功率放大器输出终端的20 Gbit/s ASK信号（300 GHz）经测量频谱。如图10所示，调制器输出频谱观测到中央频率为300 GHz ±20 GHz的调制信号。

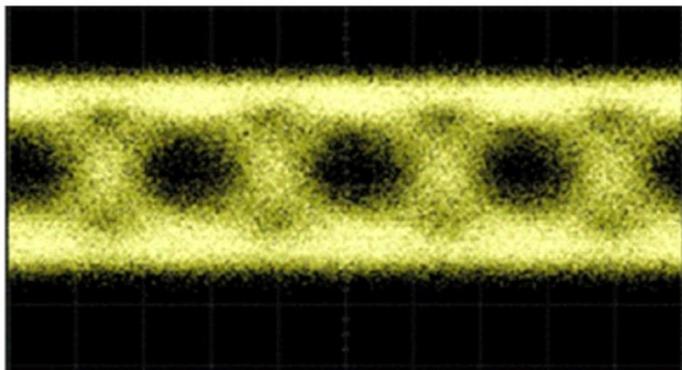
图8
发射机模块的框图



SM.2352-8报告

图9

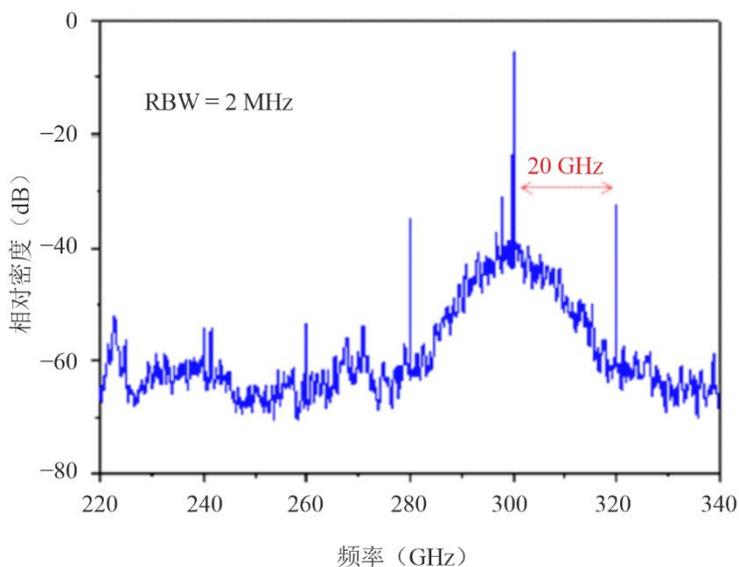
发射机模块20 Gbit/s信号的眼图



SM.2352-9报告

图10

功率放大器输出频谱



SM.2352-10报告

[1]报告了采用MMIC技术的另一种方法，并展示工作在240 GHz分谐波正交发射机，还包括发射机特性。虽然这一解决方案的载波频率低于275 GHz，该信息对集成发射机和接收机特性做了某些提示，而这些特性有望出现在较低的太赫兹频率范围。

[2]介绍了能够在20米距离上在237.5 GHz频段提供100 Gbit/s数据速率的无线通信系统。虽然接收机一侧采用了与[1]所述相同的技术，发射机则采用了单行载流子光电二极管的光电方式，随后再通过射束聚焦天线发射输出。

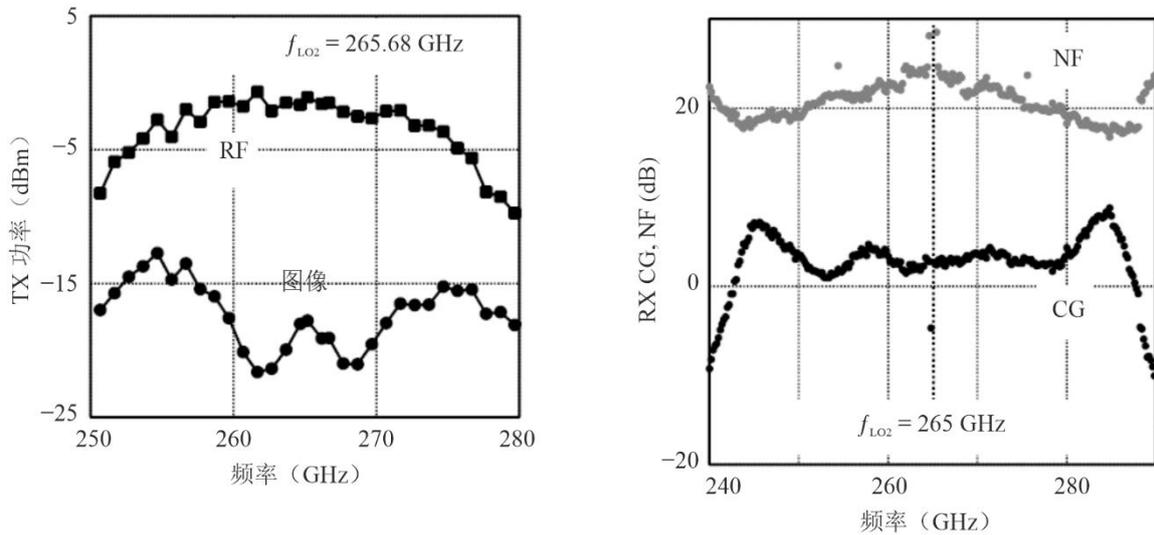
4.2.2 300 GHz频段CMOS集成发射机和接收机[3]

由于CMOS器件的最大振荡频率限制在300 GHz左右，因此制造工作在300 GHz以上频段的CMOS放大器可能比较困难。不含CMOS放大器的集成电路架构建议用于300 GHz集成发射机和接收机，采用40-nm CMOS工艺进行设计、制造和实验评估。如图12(a)所示，图11显示了CMOS单芯片发射机输出功率的频率特性，如图12(b)所示，图11显示了CMOS单芯片接收机的噪声系数和转换增益。在250-280 GHz频率范围内发射机输出功率超过20 GHz的3-dB

带宽通过CMOS集成电路实现。没有低噪声放大器的接收机小于28 dB的噪声系数在240-290 GHz频率范围内实现。发射机和接收机由频率转换电路组成，例如，混频器、倍增器和三倍器以及正交调制器。数据速率为80 Gbit/s的16-QAM信号的频谱和EVM（误差矢量幅度）小于12% rms的星座分别如图13(a)和(b)所示。发射机的输出功率和接收机的噪声系数可以通过分别连接由GaAs（砷化镓）和InP（磷化铟）等III-VI化合物半导体器件制成的高功率和低噪声放大器来改善。

图11

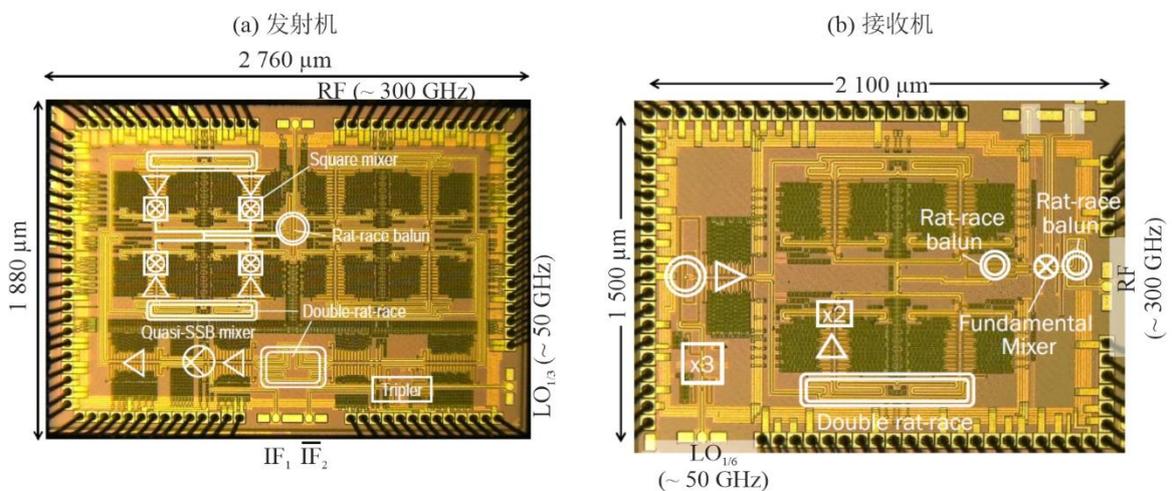
CMOS发射机和接收机的输出功率、噪声系数和转换增益



SM.2352-11报告

图12

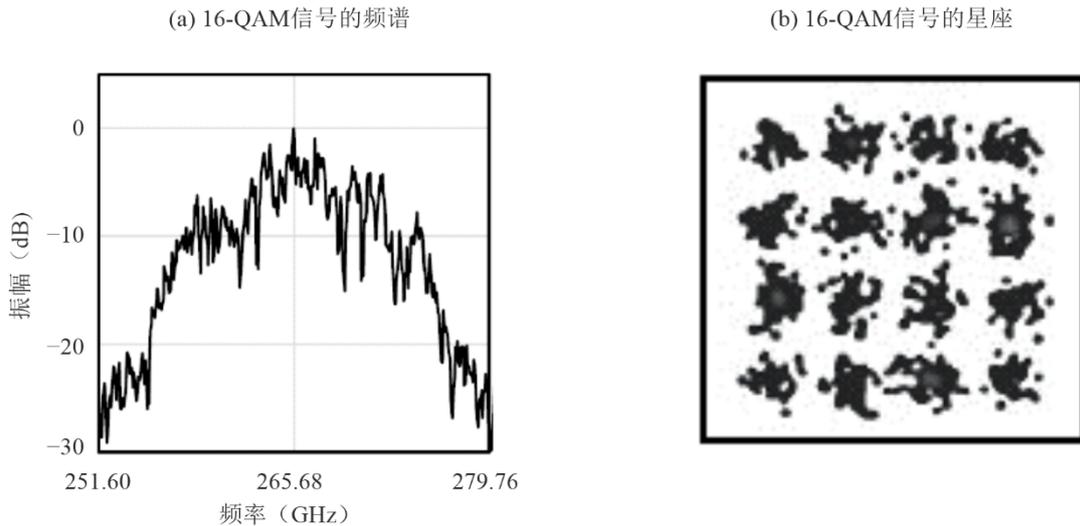
CMOS发射机和接收机芯片的照片



SM.2352-12报告

图13

CMOS发射机和接收机芯片的性能



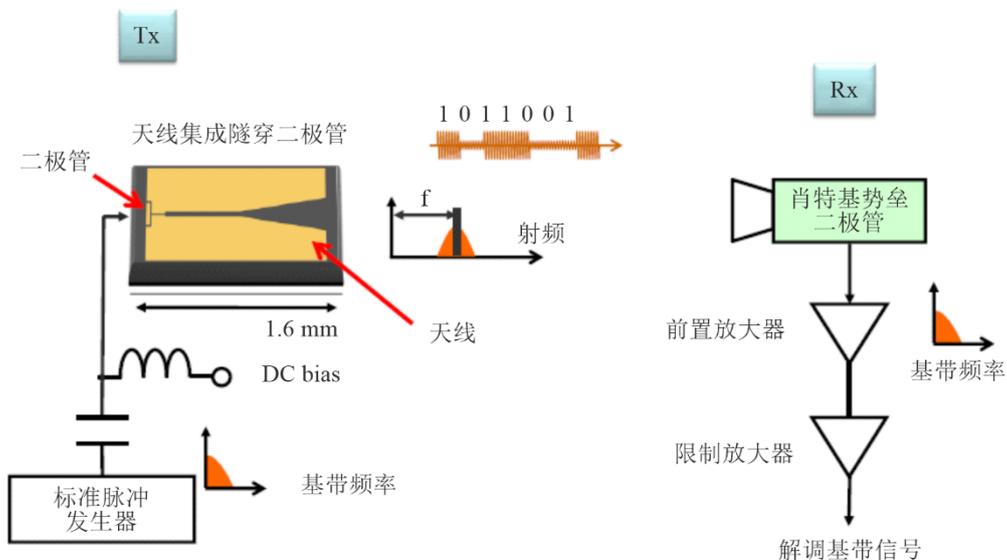
SM.2352-13报告

4.2.3 使用RTD的300 GHz发射机和接收机

振荡器即所谓共振隧穿二极管（RTD），在适当的DC直流偏置电压上震荡。通过改变偏置电压，300-GHz载波信号则可根据偏置电压的幅度进行ON和OFF调制。如图14所示，我们采用了直接检波接收机。最高比特率为1.5 Gbit/s，而利用二极管技术成功对非压缩HDTV信号进行了传送。该图还展示作为高灵敏度检波器运行的RTD。还演示了为发射机采用频率倍增器的625 GHz无差错2.5 Gbit/s传输。

图14

利用二极管技术的无线链路的框图



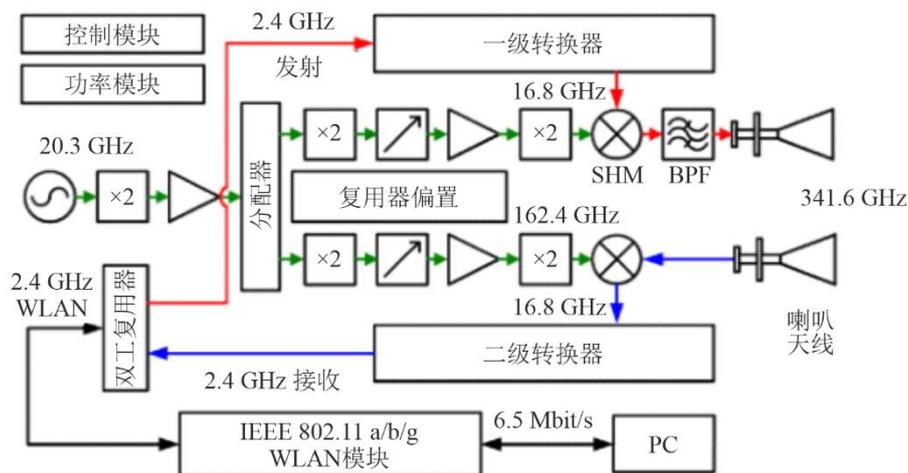
SM.2352-14报告

4.2.4 基于IEEE 802.11的0.34-太赫兹WLAN

图15显示了0.34-太赫兹WLAN原理图，该网络是根据固态半导体电子技术的0.34-太赫兹无线通信集成发射机和接收机端以及基于IEEE 802.11的WLAN装置建成的。0.34-太赫兹WLAN的数据速率在50米可达6.536 Mbit/s，其BER低于 10^{-6} 。MAC层和部分物理层是通过工作在2.4 GHz速率达150 Mbit/s的商用IEEE 802.11无线模块构成的。基于IEEE 802.11的2.4 GHz载波可利用混合器移至16.8 GHz。0.34-太赫兹WLAN的接收机端接收16.8 GHz载波信号，并将它传送至0.34 太赫兹，随后由天线将0.34 太赫兹信号发出。如果0.34-太赫兹接收机端接收到信号，它将把信号转换成2.4 GHz，并将它发送至基于IEEE 802.11的无线装置。

图15

0.34-太赫兹 WLAN节点的原理图

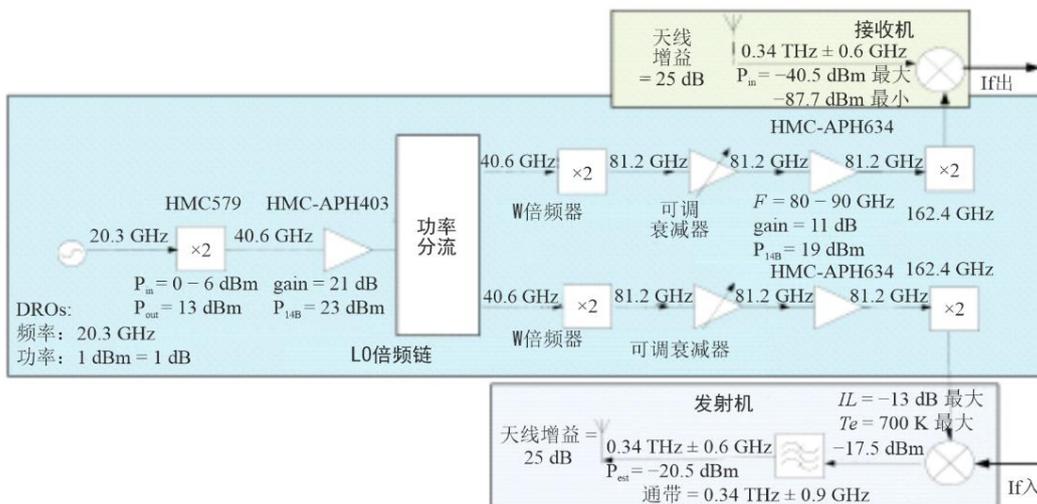


SM.2352-15报告

图16显示了0.34-太赫兹集成发射机和接收机前端的结构，其中包括0.34-太赫兹空腔滤波器、0.34-太赫兹谐波混合器、0.17-太赫兹双频链式和馈电偏置链路。0.34-太赫兹谐波混合器是集成发射机和接收机前端最重要的模块；其工作原理是基于反并联肖特基二极管非线性电流-电压（I-V）效应。具有8谐波结构的0.17-太赫兹双频率链向0.34-太赫兹谐波混合器提供振荡信号，该混合器是由两个Q频段频率倍增器、Q频段放大器、Q频段功率分配器、两个W频段频率倍增器、W频段可调衰减器、W频段放大器、两个G频段频率倍增器等构成。它还包括三阶双频复用电路和二阶驱动放大器。

图16

0.34-太赫兹 WLAN集成发射机和接收机端



SM.2352-16报告

5 感知与成像

太赫兹波具有一定程度的物质渗透性和良好的空间分辨率，还具有试剂频谱指纹、单链和双链DNA区分、水和冰的吸收差异以及半导体杂质敏感度等其他电磁频段不具备的独有特性；此外，太赫兹波对人体安全。根据这些事实，有望生成广泛的感知和成像利用。

5.1 太赫兹生成方法

表8归纳了太赫兹生成方法及其技术之间的关系。

表8

太赫兹生成方法及其技术之间的关系

生成方法	生成技术	材料	功能
超短脉冲光激励	光电导天线	LT-GaAs	太赫兹-TDS 室内温度操作
非线性光学方法	参数 DFG	GaAs、GaP、GaSe、ZGP、 PPLN、BD-GaAs、OP-GaAs	可变波长 室内温度操作
光混频	光电导体 UTC-PD	LT-GaAs InP/InGaAs	室内温度操作
激光	QCL	GaAs/AlGaAs、 InGaAs-AlInAs/InP	窄线宽 振动陀螺仪温度操作
固态电子	Gunn、IMPATT、 RTD 化合物半导体	GaAs、InP、Si AlAs/GaInAs/AlAs HBT、HEMT、mHEMT、 pHENT	固定波长 室内温度操作
电子管	BWO、振动陀螺仪		可变波长 室内温度操作

(1) 超短脉冲光激励

这是目前最通用的太赫兹脉冲生成法。通过光激励非线性晶体（NLC）、光电导天线（PCA）、半导体和超导体等，在大约一个毫微微秒期间利用超短脉冲激光，可在半导体中实现亚皮秒光电导电流调制，并可利用采用非共振和非线性介质的二次非线性极化（光整流）。此方法广泛用于太赫兹时域光谱学（太赫兹-TDS）。

与采用常规热光源的傅里叶变换远红外光谱仪相比，太赫兹-TDS具有极高的信噪比（ S/N ），因而被用于太赫兹光谱学和成像等。由于超短脉冲激光技术近期的发展，虽然因为光电导天线以及半导体和非线性晶体的结构分别选择框架、晶体构成和激励激光波长，通过采用生成放大器生成作为激发光的高强度脉冲光，可产生处理高电场强度的太赫兹脉冲。

(2) 非线性光学

这种生成方法被归入参数生成和差频生成法（DFG）。参数生成法涉及通过LiNbO₃等非线性晶体内部的声子极化进行波长转换。它主要具有室内温度的可调谐波长和操作，以及可将台式光源缩小到手掌大小，并使激励激光小型化。最近取得的超过1 kW的峰值强度的太赫兹脉冲，可与采用自由电子的激光（FEL）的数值相媲美。

此外，差频生成法是采用非线性晶体二次非线性光效应的差频生产法。近年来发布了有关DAST和BNA等有机晶体的生成方法，就生成强度而言，公布了采用腔内DFG的mW输出。

(3) 光混频

通过将两个波长的激光注入光电导装置或光电二极管，并可通过采用基于光混频的光电转换生成光差频。就光电二极管而言，由于单行载流子光电二极管拥有高速和高输出特性，可以生成超过1太赫兹的太赫兹光。

(4) 激光

量子级联激光器（QCL）具有包括纳米级厚度的不同能量势垒高度的半导体材料分层结构，并通过子带间输送实现激光振荡。虽然从原理上讲，其线宽极窄，而实际上它仅限于低温操作（通过脉冲驱动的最大工作温度为200 K），而1太赫兹以上频率的输出功率较大。

(5) 固态电子学

它们以往是作为微波和毫米波装置开发的。耿氏二极管采用具有不用有效质量的导带的谷间过渡，而碰撞电离雪崩渡越时间二极管（IMPATT）和隧道注入渡越时间（TNNETT）二极管，均为可在电子移动位置创建结构性高磁场区域的渡越时间二极管。

RTD是由配有半导体薄膜的双势垒结构构成的，并可用自身出现的隧穿现象实现采用隧穿现象的微分负阻，从而获得1太赫兹以上的基本振荡（虽然输出很小）。

作为用于振荡器、放大器甚至单片微波集成电路（MMIC）的实用高频半导体装置，由采用化合物半导体的异质结双极晶体管（HBT）和高电子迁移率场效应晶体管（HEMT）构成。虽然具有高电子迁移率等材料特性的InP类型半导体可望加快运行速度，也有通过采用可以提速的赝调制掺杂异质结场效应晶体管（pHEMT）和基改性高电子迁移率晶体管（mHEMT）等技术，以超过数百GHz运行的装置的报告。

(6) 电子管

太赫兹是通过低速波电路和电子的相互作用由回波振荡器、在电子经过金属衍射光栅时出现的史密斯-帕赛尔效应的史密斯-帕赛尔辐射，以及涉及因相对论效应产生的电子质量变化的回旋谐振脉塞作用的振动陀螺仪生成的。其输出通常很大，外壳尺寸也很大。

5.2 太赫兹摄像机

以下是基于辐射热计型非制冷红外阵列传感器技术的太赫兹二维阵列传感器的趋势。

图17显示了配备有二维红外阵列传感器，在注入3.1太赫兹频率QCL时像素达320 x 240，即像素间距为23.5 μm 。这一案例中的像素结构具有附加的太赫兹吸收层，通过调整匹配377 Ω 真空阻抗的金属薄膜薄层电阻，可将约3太赫兹的灵敏度提高一位数（图18(a)）。此外，图18(b)显示的窄带太赫兹阵列传感器，是为了将某些波长的灵敏度再提高2-4倍而研发的。

图19显示了宽带和窄带太赫兹的阵列传感器本身的噪声等效功率（NEP）的波长依赖性。从观察宽带太赫兹阵列传感器的特性可以看出，在从3 μm 到略低于200 μm 波长之间，它大致显示了频值的NEP特性，但NEP从200 μm 以上开始恶化。图20和表9配备有两类阵列传感器之一的手掌大小太赫兹摄像机的外形和规格。将高电阻硅作为太赫兹镜头材料，可在硅表面形成非反射涂层的聚对二甲苯薄膜。此外，还在太赫兹镜头前附加了红外阻挡滤光片（允许传送波长超过约30 μm 的金属网滤光片）。可通过USB 2.0接口利用计算机驱动该摄像机，也可以为计算机录制数字图像数据。

图17

(a) 宽带太赫兹阵列传感器；(b) 窄带太赫兹阵列传感器

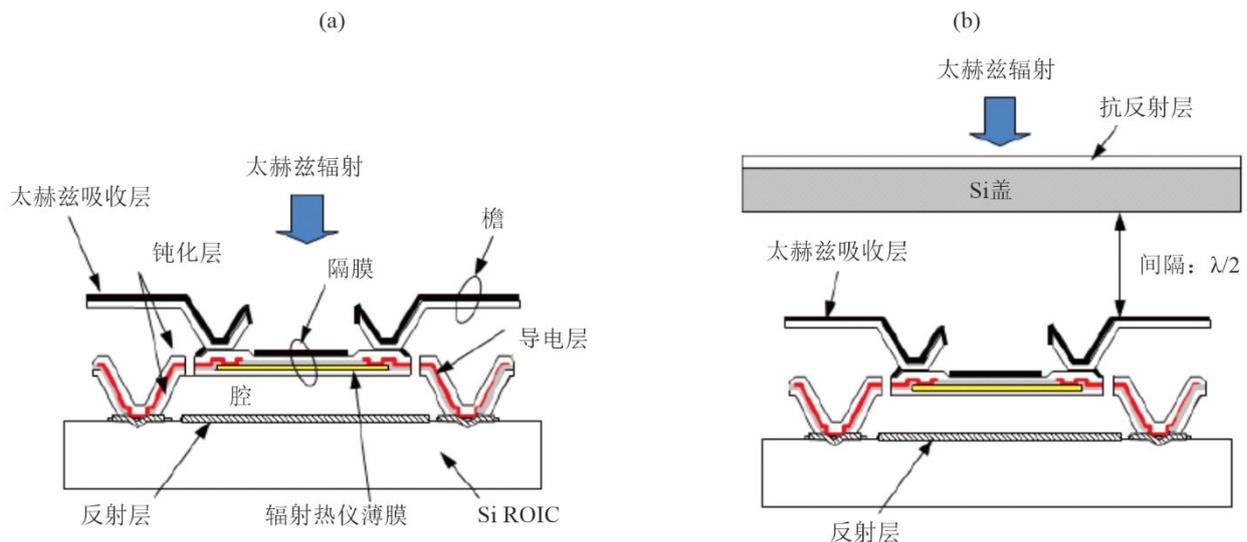
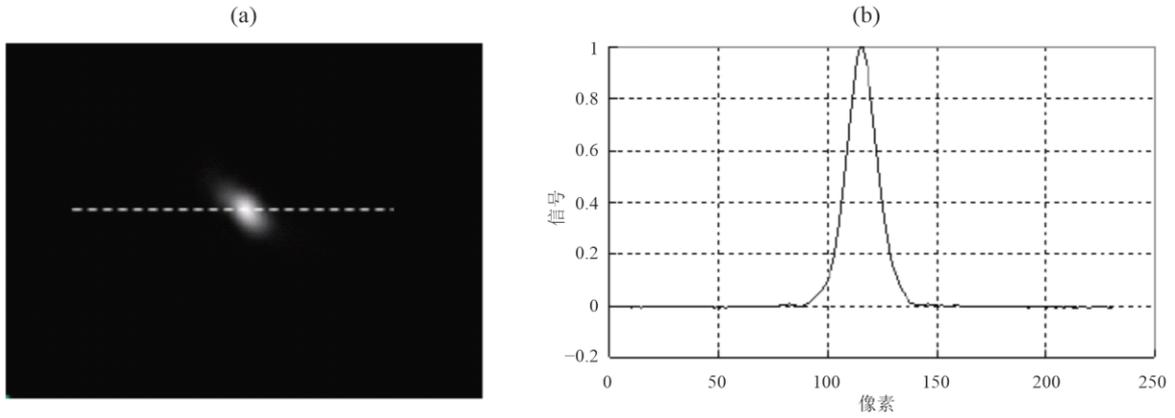


图18

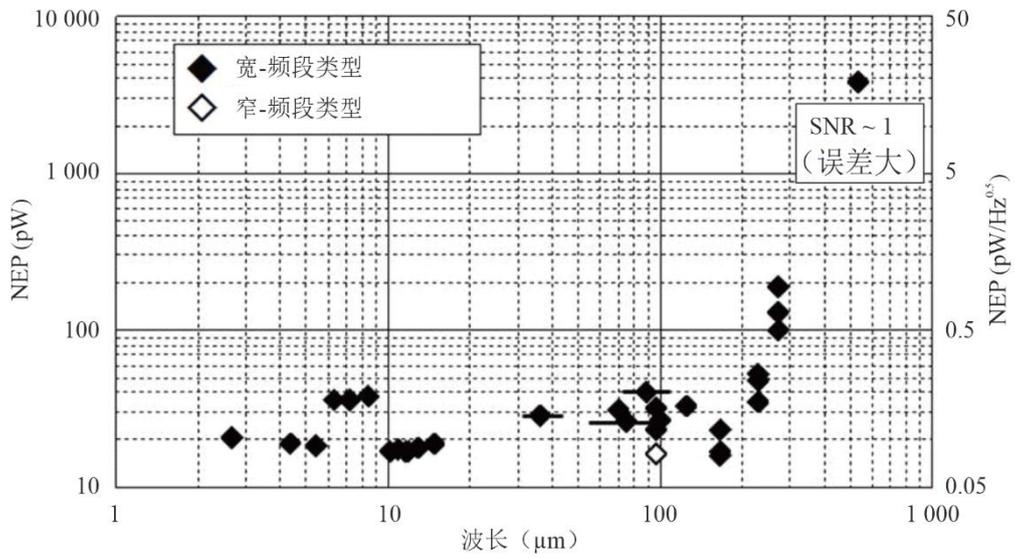
像素数量达 320×240 和像素间隔 $23.5 \mu\text{m}$ 的太赫兹阵列传感器的波束模式



SM.2352-18报告

图19

太赫兹阵列传感器的NEP波长依赖性



SM.2352-19报告

图20
太赫兹摄像机外形



SM.2352-20报告

表9
太赫兹摄像机规格

方法	辐射热计类型
阵列格式	像素数量：320 × 240 像素间隔：23.5 μm
视野	大约 15° × 11° (配备28毫米透镜时)
帧率	30 Hz
输出	数字图像数据：USB 2.0 同步信号：BNC
成像功能锁定	同步信号：15 Hz、7.5 Hz、3.75 Hz、1.875 Hz (TTL输出：+5V)
信号处理功能	帧累积 空间滤光镜
重量	约550 g (不包括镜头和滤光镜)

5.3 光谱学

光谱学系统可被归为常规傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 和波长扫描光谱系统以及太赫兹时域光谱系统 (太赫兹-TDS)。作为常规红外技术的衍生Martin-Puplet系统，是FTIR的例证。波长扫描光谱系统利用回波管直接改变太赫兹波的波长和采用两种可变波长激光的差频法。然而，也有一些与可变范围和波长准确性相关的问题。

5.3.1 太赫兹-时域光谱学 (TDS)

过去十年当中开发了被称为太赫兹-时域光谱学的测量太赫兹区域的强大新工具。单周期太赫兹辐射脉冲的电波形，是通过具有近红外光谱 (NIR) 激光脉冲的门控监测生成和测量的。通常，单周期太赫兹辐射脉冲包括典型的100 GHz和10太赫兹之间极为广泛的频谱范围。这一方法易发流行于材料诊断工作。

5.3.2 傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱仪

很多材料都在275 GHz以上频段拥有所谓指纹频谱。的确，1 000 GHz以上频率范围的光谱仪自上世纪60年代就开始使用，并且已研发出了部分商用产品。该系统完全覆盖中红外范围的频段。在中红外频段，频谱依赖于分子内部的表现方式，并且为几乎所有标准的化学品建立了频谱库。这样，化学家就可以商用系统为通用工具，确认未知材料。在远红外区域或太赫兹频段，指纹频谱取决于分子间的表现形式、声子吸收、氢键或类似分子条件。同中红外不同的是，这里没有商用频谱库。

5.3.3 材料分析

固态和液态特性分析是采用太赫兹-TDS进行的。例如太赫兹频段旋光测定法被用于评估材料的双折射特性。利用这类评估功能，装置一上市就具有聚合物光学异构体分析等新材料开发的分析功能。另一方面，虽然太赫兹波易受水吸收，但它利用太赫兹频率的衰减全反射光谱法 (ATR法)，能够对含水的抽样进行测量，而这以往被认为难以实行。

由于利用这一方法可以在无需穿透水的情况下获得抽样特性，这也使利用ATR方法在培养液中侦测细胞成为可能，并有望成为太赫兹用于生物技术的有效方法。

5.4 无损测试

5.4.1 行业产品应用

对于行业产品和材料进行太赫兹成像的需求依然根深蒂固。这是因为只有太赫兹频段的无线电波和X光等的辐射可借可见光中看透不透明物体。X光等电离辐射的处理伴有风险和限制，而太赫兹频段的无线电波则具有量子般的低能量且非电离化，而通常X光在探测碳等轻元素方面才会有问题。在太赫兹频段的无线电波当中，在与原则上具有长波长和低成像分辨率 (空间分辨率) 的微波相比，在毫米或更小量级实现空间分辨率的太赫兹波的毫米波，更为适合成像应用。

在工业产品当中，发射太赫兹波的非金属材料充斥日常生活。部分最为典型的这类产品以塑料、乙烯和纸为原料，其他则以陶瓷和橡胶为原料，它们具有不同功能，通常具有高附加值。例如，一些医药成分利用了陶瓷的耐热性和橡胶的弹性。这些产品被广泛用于能源和医疗领域，并成为义务检测的必须。缺陷的规格通常至少约为1–10 μm ，但需要高S/N比和速度。

太赫兹CT技术有望成为利用X光所无法实现的无损测试的太赫兹成像技术。从光谱信息派生的太赫兹波可监测缺陷并提供缺陷类型的信息，因为其为分析增加新的价值而成为引人瞩目的技术。需要检测的缺陷包括外来粒子以及薄膜的不均匀性和涂层缺陷等。

所需的精确深度通常为几个 μm ，但在半导体基板等的检查中，就有需要薄膜厚度的电子特性小于若干100 nm的情况。虽然人们认为难以利用太赫兹波测量这种薄膜，但由于近期的技术发展，其可行性开始显现。

5.4.2 生物和医疗应用

目前，如果将研究应用包括在内，临床检验应用覆盖了从生活方式疾病到癌症标志物等广泛的范围。在感测体内靶蛋白等的基本原理当中，许多采用抗原-抗体反应等有机体识别机制模式。

然而，一个人要想辨别这种认识的存在/缺失，需要更高一级的处理能力。例如，在利用被称为酶免疫检测方法的过敏源的检测方法中，要将与过敏源具体结合的捕获抗体固定到基板，在与样品进行反应后，利用监测抗体或监测标记检测出这一过敏源的存在/缺失。这样多级反应可用于通过颜色或荧光显示检测结果。这种标志物只在通过与基板的极小反应就可有效产生色彩，在化学发光测量时，可实现微微克级检测灵敏度。然而，多级检查也存在需要无数试剂和冗长检查时间以及因多级处理而增加误差因素等问题。

在这种背景下，德国的研究小组于2000年报告了利用太赫兹波进行无标记检测的可能性。这些研究人员通过实验证明，太赫兹频段折射率指数和单链及双链DNA透射率存在差异。随后，美国的研究小组建议通过太赫兹-TDS时域波形方法，检测抗生物素蛋白和生物素结合。这意味着，无需使用标记物即可从太赫兹频段折射率和生物聚合物的吸光度的变化检测出结核的存在/缺失。日本利用包括量子级联激光和太赫兹摄像机构成的成像测量系统，将一排小分子化合物粘在膜过滤器上，并在图像格式中成功检测到与它们具体结合的蛋白质，从而确认能够以快速、方便和无标记的方式检测出生物物质。

另一方面，还存在一个作为重要技术开发主题的监测灵敏度问题。临床检查所需的灵敏度处于纳克到皮克的范围内，无标记检测对监测灵敏度要求最高，作为需要如此小灵敏度的检查应用的实例，可以提高对于血液中的自身抗体的预测诊断。

通常由体内的免疫反应抵御外部细菌和病毒的侵袭。然而发生自身免疫疾病时，参与体内免疫的物质向身体发起攻击。以1型糖尿病为例，针对三类胰蛋白的自身抗体已被发现，而且已知70-90%的患者具有一个这类自身抗体。此外，现已对这三种自身抗体及其发病率之间的关系进行了研究，并明确了其中的关系。因此，通过初步检查掌握体内是否存在这些自身抗体，预测其发作时间，并将它们用于预防工作。

希望将这些检查用于健康检查，并且有必要开发方便、快速和便宜的检查技术。在将它们用于身体检查时，最好能够通过一次检查预测多种疾病，而不仅仅预测上述的1型糖尿病。换言之，为了通过固定到单一芯片的各类疾病的自身抗体与抽取血液中发现的少量自身抗体发生反应，需要进行标记检查并发现皮克级生物物质的技术。

根据《富士经济新闻》所做的调查，在临床检查当中，包括基于抗原抗体反应的常规免疫血清检查，有望于2008财年占居1 572亿日元的国内市场，到2013财年，该市场将达到1 680亿日元，相当于测试药物市场的40%以上，并占据最高比例。随着这一市场的出现，无标记和高精度检查技术可望进入这些市场，并推动市场扩容。

另一方面，可假设不同环境都有无标记和微量物质检查的需要，其溢出效应巨大。它们包括检查危险气体、细菌武器和炸药等安全领域；对可能引发新型流感大流行关切的传染性病毒检查；以及环境中的微量元素、农产品中的残留农药和牲畜中的残留抗生素。

因此，必须致力于早期开发作为基础的无标记物检查技术、与根据这一技术选择检查物质相关的研究和提高监测灵敏度的研发工作。提高太赫兹波监测灵敏度的技术之一，是一种利用金属网作为传感器的方法，因此产生了能够进行纳克/毫米级蛋白质检测的技术。

通过将无标记检测微量物质技术与成像技术相结合，使用范围将得到进一步扩展，尤其是将能够全面检查具体将小分子阵列和糖链阵列结合的蛋白质，并成为可挺进药物探索领域的技术。此外利用太赫兹波技术的无标记物检测，将明确迄今为止因为没有标记而一直受到忽略的蛋白质的存在，并有望成为一个生命科学研究领域的强大筛选技术。

5.4.3 基于合成多波段LFMCW成像系统的NDT系统

太赫兹NDT系统也使用FMCW信号。合成多波段LFMCW成像系统已经设计完成。为了进一步扩展系统带宽和增强距离分辨率，工作在不同频段的成像系统被拼接和合成。该系统采用“时分复用”的方法来完成多信道的频率扫描，然后拼接多信道的中频数据，以完成合成带宽。设计并实现了共用孔径的准光学调焦系统。多信道的观察点是一致的。最后，通过三维成像实验验证了110-500 GHz合成系统的有效性。因此，太赫兹成像逐渐成为无损测试的新型补充手段。

5.5 太赫兹雷达应用

与微波相比，太赫兹波具有更窄的脉冲宽度、更小的天线尺寸、更窄的波束宽度和更好的方向性，这使得太赫兹雷达比微波雷达能够检测更小的目标并实现更精确的定位。此外，太赫兹雷达具有穿透材料成像的优势，可以探测隐藏在覆盖物或烟雾中的目标。

5.5.1 雷达主动成像

太赫兹雷达主动成像主要通过SAR/ISAR方法来实现。

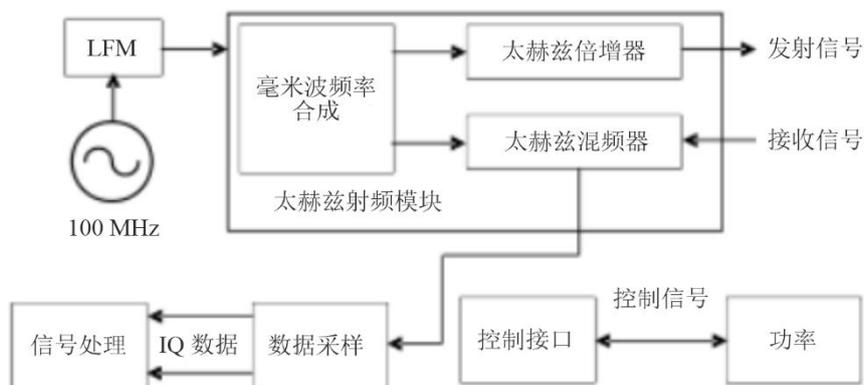
合成孔径雷达（SAR）成像是一种不受被探测目标光学孔径限制的成像技术。根据雷达是否移动，成像可分为SAR成像和逆合成孔径雷达（ISAR）成像。太赫兹SAR和ISAR雷达利用超宽带宽、超窄脉冲宽度和太赫兹波更好的方向性，可实现相比传统微波雷达更高的成像分辨率。

根据产生太赫兹波的方法，太赫兹成像雷达可分为电子的和光学的两种。由于光学雷达的实施难度，基于电子学方法的更多太赫兹成像雷达被研制出来。本节主要介绍电子太赫兹成像雷达。

太赫兹成像雷达通常包括频率合成器、倍增器、混频器、低噪声放大器（LNA）、数据采样单元和信号处理单元等。相比传统脉冲雷达，受制于太赫兹信号源当前的功率电平，大多数太赫兹成像雷达采用调频连续波（FMCW）波形。太赫兹成像雷达的典型框图如图21所示[5]。

图21

太赫兹成像雷达的典型框图



在过去的一二十年里，全世界许多研究机构和大学开发了各种太赫兹成像雷达。它们中的大多数处于实验或原型阶段，而其他一些则接近实用性。几种太赫兹成像雷达系统的主要特性如表10所示。

表10
几种太赫兹成像雷达系统的特性

	系统A [6]	系统B [6]	系统C [6]	系统D [6][7]
工作频率 (GHz)	330	670	670	300
带宽 (GHz)	6.4	28.8	28.8	44
输出功率 (mW)	10	0.5	1.2	1
调制模式	FMCW	FMCW	FMCW	FMCW
检测模式	波束扫描	波束扫描	ISAR	ISAR
工作距离 (米)	20	25	2-8	700 (人体)
分辨率 (cm)	1	1	1.3	0.37
年份	2010	2011	2013	2015

预计在未来十年，随着太赫兹设备性能的提高和系统设计的成熟，太赫兹成像雷达将取得明显进步并投入使用。

5.5.2 非接触式安全检查

太赫兹雷达可用于非接触式安全检查。太赫兹雷达具备穿透衣物、纸板等非极性材料的能力，同时保持高分辨率，可实现对隐藏危险品的高分辨率透视成像。探测距离可达20至100米[8]，可提供超出危险品攻击半径的早期预警。此外，太赫兹光子能量低，远小于人体皮肤的电离能，从而可消除人们对辐射损伤的焦虑。

5.5.3 穿行式扫描系统

对具有高吞吐量和检测性能的行式扫描系统进行了研究，如图22所示，它不仅检测到金属和非金属威胁，还可以避免乘客在机场安检处排长队。图22(a)显示了穿行式扫描系统的示意图，它由两个面板组成，可同时观察人的两侧。图22(b)显示了使用高信噪比FM-CW雷达的集成发射机和接收机的框图[9]。使用FW-CW雷达的此类扫描系统的分辨率取决于载波频率的带宽。根据《无线电规则》，为作为主要业务的无线电定位业务提供8 GHz以上连续带宽的频段如下所示：

- 8-GHz带宽；92-94 GHz、94-94.1 GHz、94.1-95 GHz和95-100 GHz；
- 12.5-GHz带宽；136-141 GHz和141-148.5 GHz；
- 10-GHz带宽；238-240 GHz、240-241 GHz和241-248 GHz。

尽管在现行规则中提供了12.5 GHz的最大连续带宽，但使用低于275 GHz的频段无法实现扫描系统所需的小于5 mm的距离分辨率。表11还总结了穿行式扫描系统的其他规范。由于工作在太赫兹频率，衣料可能会影响系统的性能。对穿行式扫描系统的输出功率和天线类型等具体参数应做仔细检查，同时考虑到275-600 GHz工作频段范围内衣料的衰减和反射特性。图23显示了穿行式扫描系统可能的工作频段范围与大气气体造成的吸收衰减之间的关

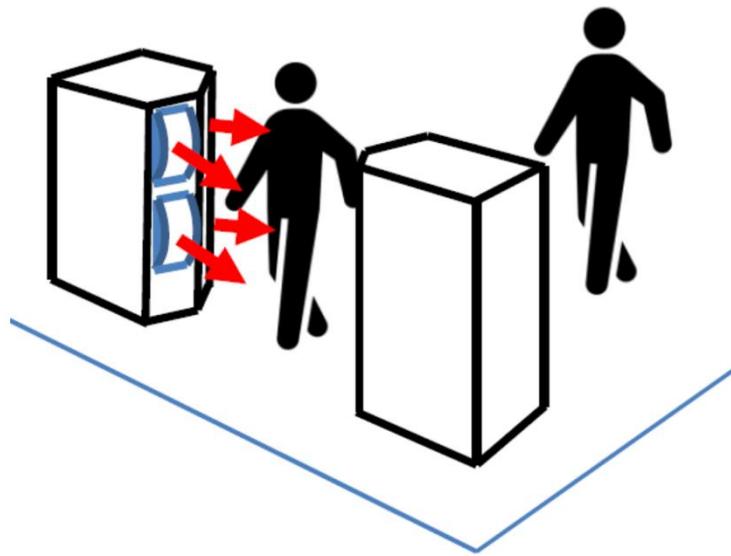
系。建议将中心频率325 GHz、380 GHz、447 GHz和555 GHz¹分别用于频段1、频段2、频段3和频段4，以避免对工作在同频和相邻频段内的无源业务应用造成有害干扰。

太赫兹范围内几种衣料的传输特性、吸收测量结果和折射率由非国际电联出版物 [10]-[15]提供。它们指明，在工作频率、材料厚度和密度以及编织图案周期性等条件下，衣料是透明的，并且随着频率的增加，几种衣料的透射率通常从透明变为不透明。在0.1-1 太赫兹频率范围内，如果这些材料的反射率大于衣料的反射率，则可以辨别衣服下是金属还是违禁材料。

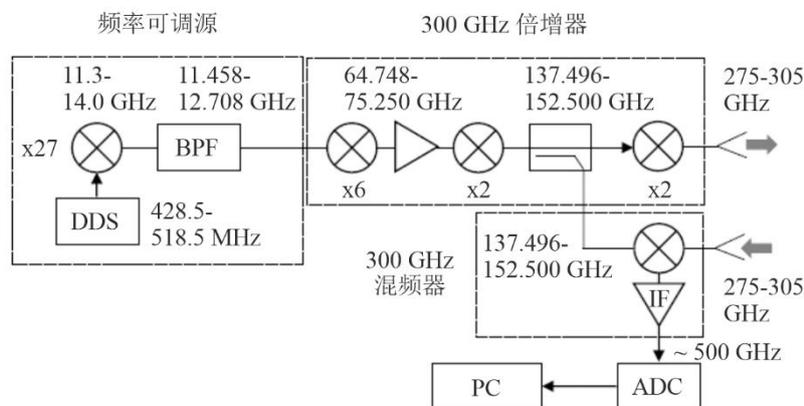
图22

使用太赫兹的穿行式扫描系统的概念

(a) 使用太赫兹的穿行式扫描系统的示意图



(b) 使用太赫兹的穿行式扫描系统的框图



SM.2352-22报告

¹ 应该注意的是，所有穿行式扫描系统建议的频率范围都重叠了确定供无源业务应用使用的频段，见《无线电规则》第5.565款。需要做进一步的分析，以确定可以采取哪些切实可行的措施来保护这些无源业务免受有害干扰。

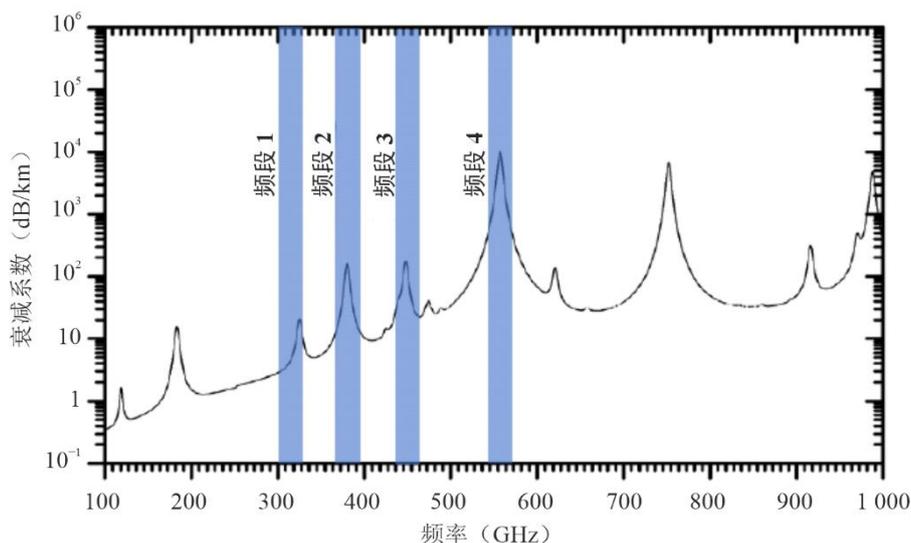
表11

穿行式扫描系统的规格

参数	值
中心频率 (GHz)	325、380、447、555
325 GHz上的输出功率 (mW)	> 10
天线方向图	高斯
天线类型	喇叭
频率带宽 (GHz)	30
距离分辨率 (mm)	5
最大检测距离 (m)	3
步行速度 (km/h)	2-4
雷达数量	8-16
可检测的隐藏材料	金属、陶瓷、易爆、可燃液体

图23

穿行式扫描系统可能的工作频率



SM.2352-23报告

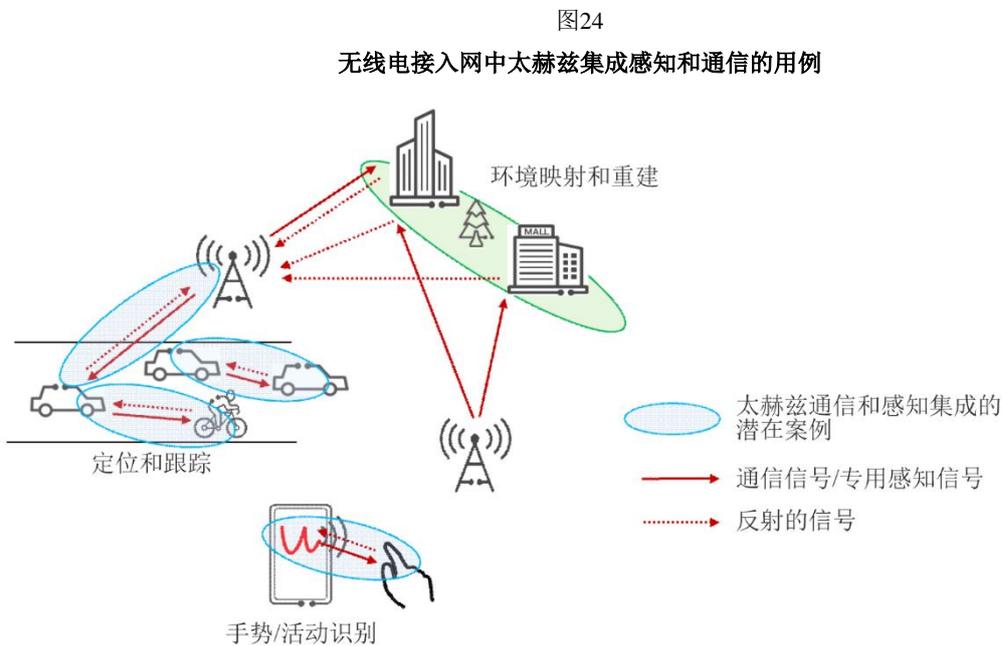
6 无线电接入网中的集成感知和通信 (ISAC)

RAN最初是为基站和用户设备之间的无线通信而设计的。随着基于位置的应用需求的快速增长，如基于终端位置的广告推送，如果系统参考信号可用于检测周围环境，则现有RAN系统具有一定的定位能力，这可以被视为将感知集成到通信系统中的一种尝试。

预计未来的RAN将更多地转向更高频段，包括有大量频谱可用的太赫兹频段。这将使RAN具有更强的传输能力以及与典型无线电定位系统相媲美的感知能力。正在研究无线电接入网中的集成感知和通信问题[16]-[19]。

图24显示了无线电接入网中集成感知和通信的一个用例，当中，适合工作在太赫兹频段的链路用蓝色圆圈标记。基站或终端设备均可从接收到的射频信号中提取有关周围环境中感兴趣对象的信息，如存在、距离、速度、形状和方位。该信息可用于诸如定位和跟踪、环境映射和重建以及手势/活动识别等业务。此外，它还可用于改善通信业务的性能。就射频信号源而言，它们可以是通信信号，也可以是专用的感知信号。

从频谱角度来看，共设计的感知和通信同时使用的系统将提高频谱利用效率。



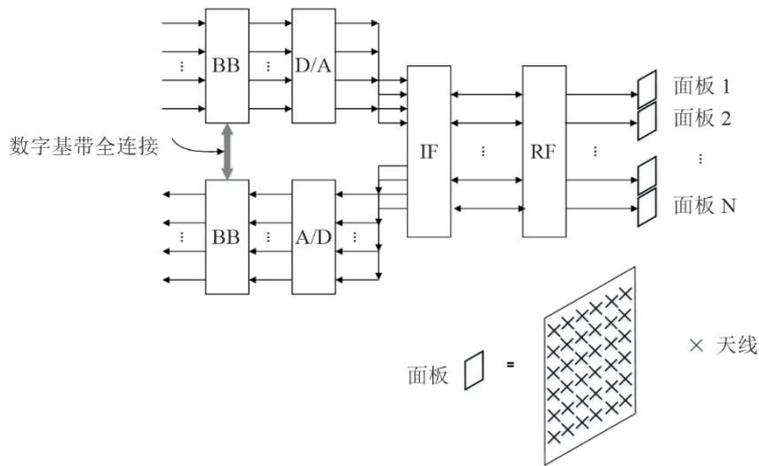
SM.2352-24报告

图25显示了太赫兹集成感知和通信系统的实施方案结构，包括天线面板、射频（RF）前端、中频（IF）电路、模拟到数字（AD）/DA采样器和基带处理单元。发射机和接收机的基带单元通过数字环回网络连接，以共同处理发射的和接收的感知信号。一个射频信道可以驱动一个或多个带有若干天线单元的天线面板。

基于这种结构，图26提供了用于太赫兹集成感知和通信系统的、带有4路发射和16路接收（4T16R）的射频前端实施方案。具体来说，它由一组发射机芯片和四组接收机芯片组成。如图26(a)所示，在每组芯片中，四个信道共用一个用于发射机或接收机的上变频器或下变频器，每个信道具有独立的移相器和增益可控的驱动放大器，然后仅用一个元件连接到天线面板上。发射的和接收的信号共用一个本地振荡器（LO）系统。

图25

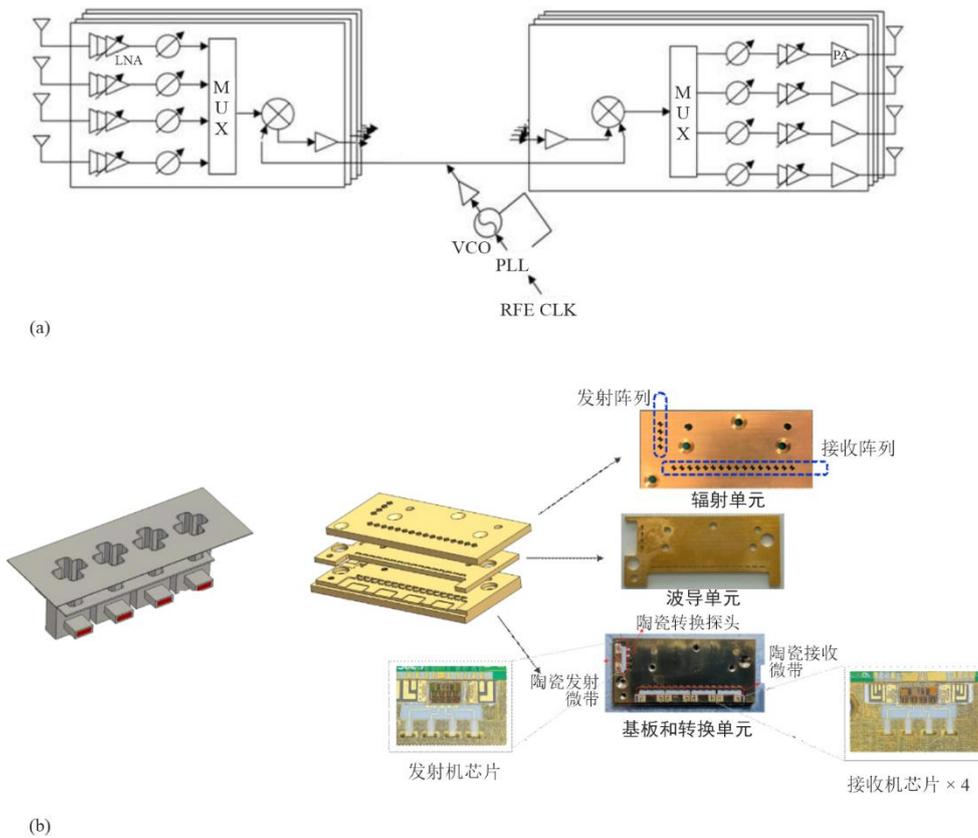
太赫兹集成感知和通信发射机与接收机的实施方案结构



SM.2352-25报告

图26

用于太赫兹集成感知和通信发射机与接收机的、带有4路发射和16路接收（4T16R）的射频前端芯片。(a) 发射机/接收机前端芯片的实施方案结构，(b) 4T16R前端模块的图片



SM.2352-26报告

根据工作频率的不同系统要求，芯片的实施方案需要在不同的半导体工艺之间做出选择。例如，SiGe晶体管的截止频率通常支持工作在300 GHz以下频段的芯片[20]，而InP晶体管因其更好的电子迁移率而用于高达600 GHz的情况[21]。此外，为了提高发射机的输出功率和接收机的灵敏度，还考虑了与III-V化合物半导体器件（如GaN和InP）的异质集成。

7 国际标准组织内部的太赫兹相关活动

IEEE 802.15于2008年成立了太赫兹兴趣组（IG 太赫兹），重点关注在275-3 000 GHz频段运行的太赫兹通信和相关网络应用。这种太赫兹通信应用包括：组件到组件、控制板到控制板、机器到机器、人到机器和人到人（室内和室外）的无线通信。太赫兹通信应用覆盖要求不一的多个类别。根据设想，太赫兹通信将总体采用有限复杂度的无线调制方法、全向和/或定向天线系统，并以10 Gbit/s的倍数在高至100 Gbit/s的范围内提供极高的数据传输速率，以适应未来的光纤容量。太赫兹无线系统可支持极短距离（几厘米或更短）至数百米的较长距离的传输。

IG 太赫兹一直专注于开放频谱问题、信道建模和技术开发监测。随着更为成熟的集成发射机和接收机技术的开发，IEEE 802.15通过在2014年成立3d任务组（它于2017年10月IEEE 802.15.3d-2017标准修正案发布时完成了工作），朝着制定第一个无线300 GHz标准迈出了一步。该修正案基于IEEE 802.15.3c标准，并为通常在高至100 Gbit/s范围内以PHY数据速率运行的IEEE 802.15.3-2016标准定义了无线交换的点到点物理层。252-321 GHz频段考虑的操作范围短至几厘米、长至几百米。IEEE 802.15.3d-2017标准的制定工作与IEEE 802.15.3e-2017标准同步进行，后者为60 GHz高速率很近距离（HRCP）通信制定了一项修正案。MAC层的大部分以及定义的调制和编码方案在两个修正案中是相同的。

潜在的关注应用包括无线数据中心、信息亭下载、无线设备内通信以及无线回传和前传。

太赫兹常设委员会对制定太赫兹频率范围进一步修正案的潜在机遇进行了评估，太赫兹常设委员会于2018年取代了太赫兹兴趣组（IG 太赫兹）。

8 总结

设备技术的进步正在使本报告讨论的太赫兹装置和系统的特性得到快速提升。具体而言，太赫兹无线通信系统可能具有以接近100 Gbit/s的数据速率进行传输的巨大潜力，IEEE 802内部目前正就这一速率进行探讨。在不久的将来将这些设备推向市场的过程中，需考虑到无源和有源服务的共用研究以及对《无线电规则》的审议。

9 参考资料

- [1] J. Antes *et al.*, High Data Rate Wireless Communication using a 240 GHz Carrier IEEE 802.15-14-0017-00-0thz, Los Angeles, January 2014; <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/14/15-14-0017-00-0thz-high-data-rate-wireless-communication-using-a-240-ghz-carrier.pdf>
- [2] S. König *et al.*, Wireless sub-THz communication system with high data rate, Nature Photonics 7, 977–981 (2013), <http://www.nature.com/nphoton/journal/vaop/ncurrent/abs/nphoton.2013.275.html>
- [3] M. Fujishima, 300-GHz-band CMOS transceiver for ultrahigh-speed terahertz communication, Proc. SPIE, Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XII (2019).
- [4] APT/ASTAP/REPT-04 – Technology trends of telecommunications above 100 GHz.

- [5] WU Fu-Wei *et al.*, A 220GHz terahertz Synthetic Aperture Radar, *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, Vol. 15, No. 3, Jun. 2017.
- [6] D.S. li *et al.*, Research Progress of THz Imaging Radar System, *Journal of Microwaves*, Vol. 31, No. 6, Dec. 2015.
- [7] H.Q. Wang *et al.*, Review of Terahertz Radar Technology, *Journal of Radars*, Vol. 7, No. 1, Feb. 2018.
- [8] X.B. Yang *et al.*, *Terahertz Band Radar*, National Defense Industry Press (China), December 2017.
- [9] C. Otani *et al.*, Development of MMW-to-THz Radar Imaging Technology and Systems, 2020 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), September 2020.
- [10] D.T. Petkie, *et al.*, "Active and passive millimeter and sub-millimeter-wave imaging," in *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5989, pp. 598918-1 – 598918-8.
- [11] A.J. Gatesman, *et al.*, "Terahertz behaviour of optical components and common materials," in *Proc. SPIE*, 2006, Vol. 6212, pp. 62120-E1 – 62120-E12.
- [12] M.C. Kemp, "Millimetre wave and terahertz technology for the detection of concealed threats: a review," in *Proc. SPIE*, 2006, Vol. 6402, pp. 64020D-1-64020D-19.
- [13] R. Appleby and H. B. Wallace, "Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region," *IEEE Trans. Antennas Propagation*, Vol. 55, No. 11, pp. 2944-2956, Nov. 2007.
- [14] R.E. Miles, X.-C. Zhang, H. Eisele, and A. Krotkus, (Editors), "Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects," in *NATO Science for Peace and Security Series – B: Physics and Biophysics*, Springer, 2007, pp. 225-240.
- [15] P.F. Goldsmith, *et al.*, "Focal plane imaging systems for millimeter wavelengths," *IEEE Trans. Microwave Theory Techniques.*, Vol. 41, No. 10, pp. 1664-1675, Oct. 1993.
- [16] C. Lima *et al.*, Convergent communication, sensing and localization in 6G systems: an overview of technologies, opportunities and challenges, *IEEE Access*, Vol. 9, June 2021.
- [17] M. Rahman *et al.*, Framework for a perceptive mobile network using joint communication and radar sensing, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 56, No. 3, June 2020.
- [18] W. Tong, P. Zhu, *et al.*, *6G: The Next Horizon: From Connected People and Things to Connected Intelligence*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [19] Oupeng Li, Jia He, Kun Zeng, Ziming Yu, Xianfeng Du, et al., "Integrated Sensing and Communication in 6G A Prototype of High Resolution THz Sensing on Portable Device," in *2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, 2021, pp. 544-549.
- [20] X. Deng, Y. Li, J. Li, C. Liu, W. Wu and Y. Xiong, "A 320-GHz 1x4 Fully Integrated Phased Array Transmitter Using 0.13 um SiGe BiCMOS Technology," *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology*, Vol. 5, No. 6, pp. 930-940, Nov. 2015.
- [21] W.R. Deal *et al.*, "A Low-Power 670-GHz InP HEMT Receiver," *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology*, Vol. 6, No. 6, pp. 862-864, Nov. 2016.
-