



无锡芯光互连技术研究院
WUXI Institute of Interconnect Technology

基于太赫兹技术的数据 中心无线互连研究

蒋成涛
无锡芯光互连技术研究院
2022.12.16



目录

1. 太赫兹技术及应用
2. 太赫兹无线通信技术
3. 数据中心无线通信技术



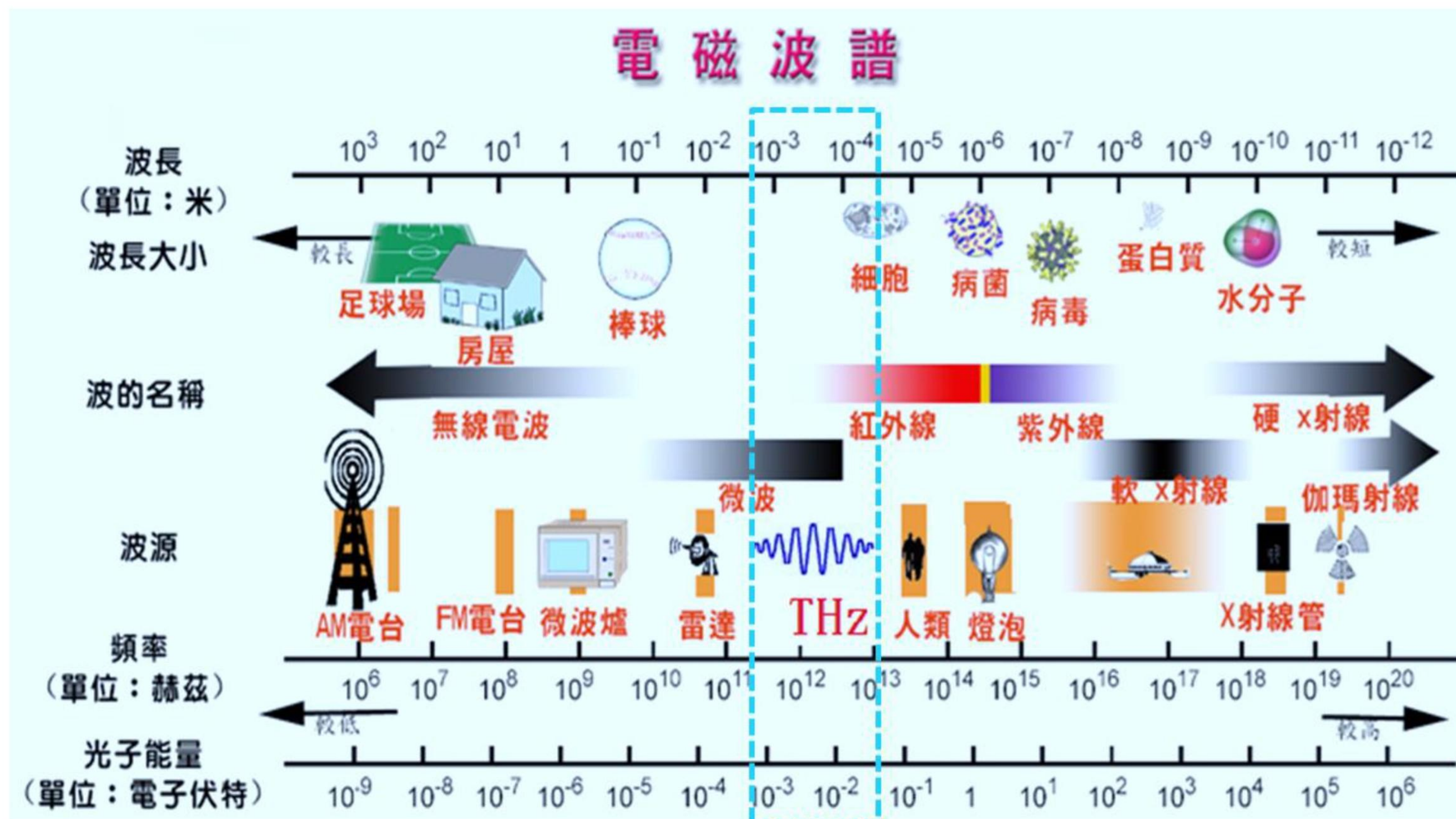
无锡芯光互连技术研究院
WUXI Institute of Interconnect Technology

1

太赫兹技术及应用

1. 太赫兹技术及应用

太赫兹（Terahertz, THz）波是指位于0.1 THz~10 THz频率范围的电磁波，在整个电磁波谱中位于微波和红外波频段之间。太赫兹既具有微波频段的穿透性和吸收性，又具有光谱分辨特性。正是由于其所在的特殊位置，太赫兹波表现出与其它波段不同的特殊光学性质，使其无论是在军用还是民用领域都具有极其广阔的应用前景。



电磁波普图



- ✓ **与微波相比**，THz波的频率高、带宽大、波束窄，可承载更高频率的调制信号，大幅提高通信速率、雷达分辨率高；
- ✓ **与红外光比**，THz特征光谱对很多大分子来说更易分辨（频率共振），能够识别不同的物质组成和含量，可很好地用于鉴别毒品和爆炸物等；
- ✓ **与可见光相比**，具有穿透性，可以轻易穿透大部分干燥、非金属、非极性材料，可用于透视成像、无损探测等；
- ✓ **与X光相比**，THz波能量低，约为X射线能量的百万分之一，1THz的能量约4.1meV，不会破坏生物组织，具有很高安全性，适合安全检查和医学成像。

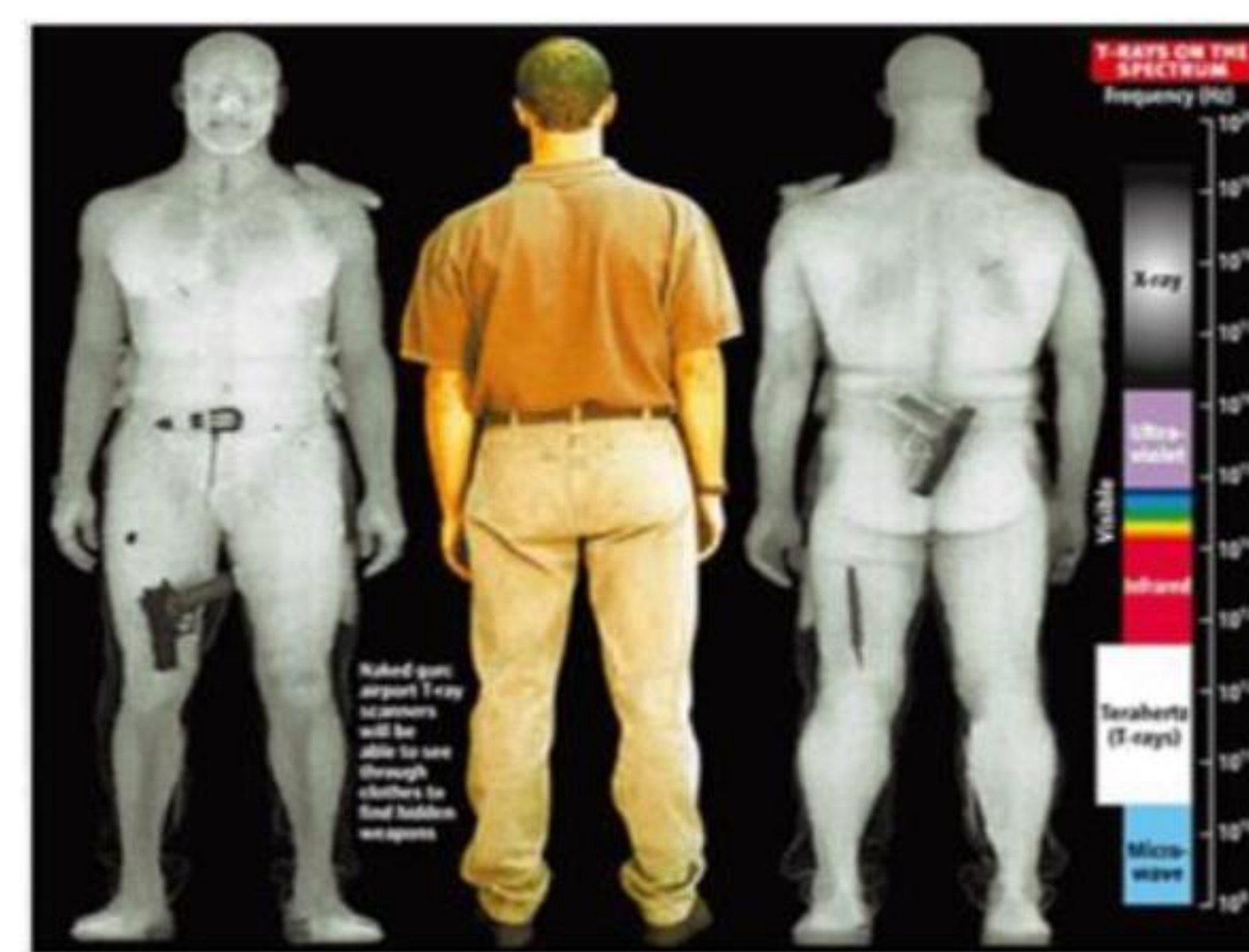
种类	穿透性	分辨率	安全性
X射线	强	高	弱
可见光	弱	高	强
红外线	弱	高	强
太赫兹	强	高	强
微波	强	低	强



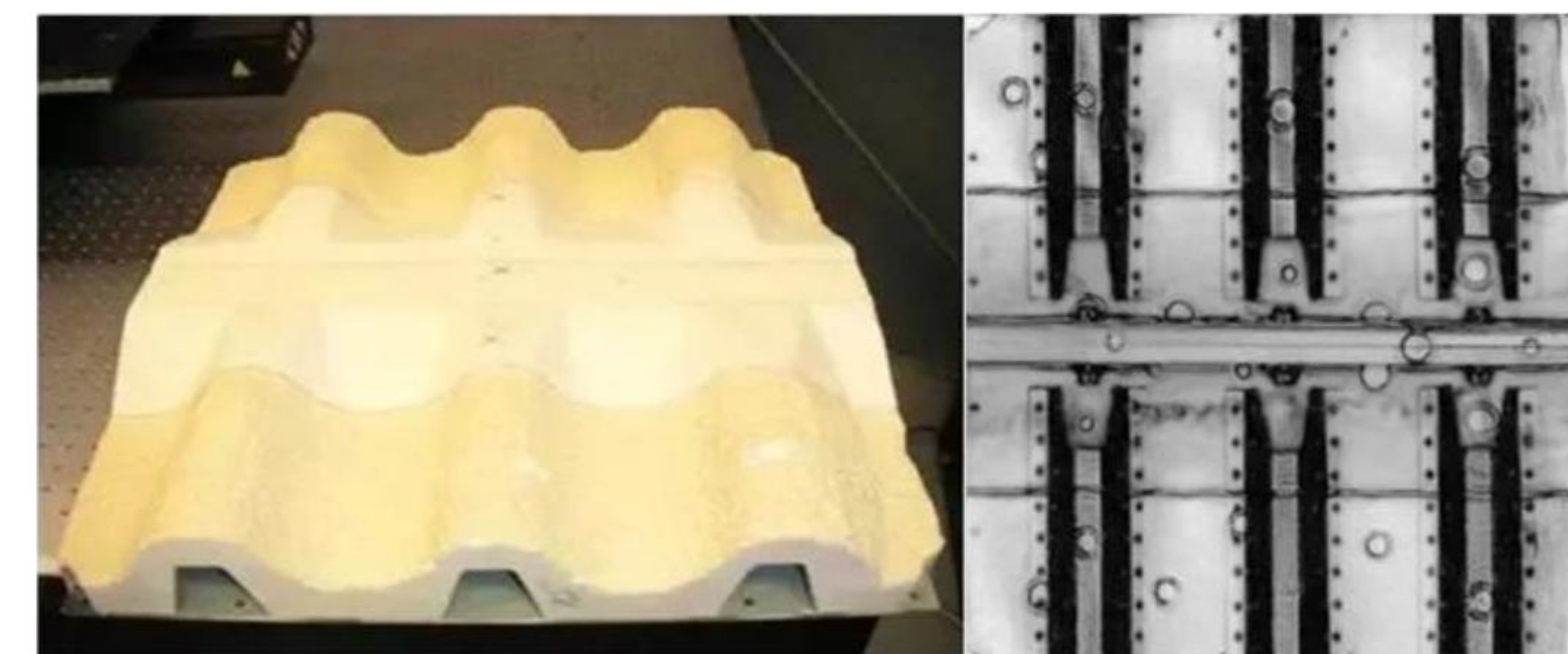
1. 太赫兹技术及应用



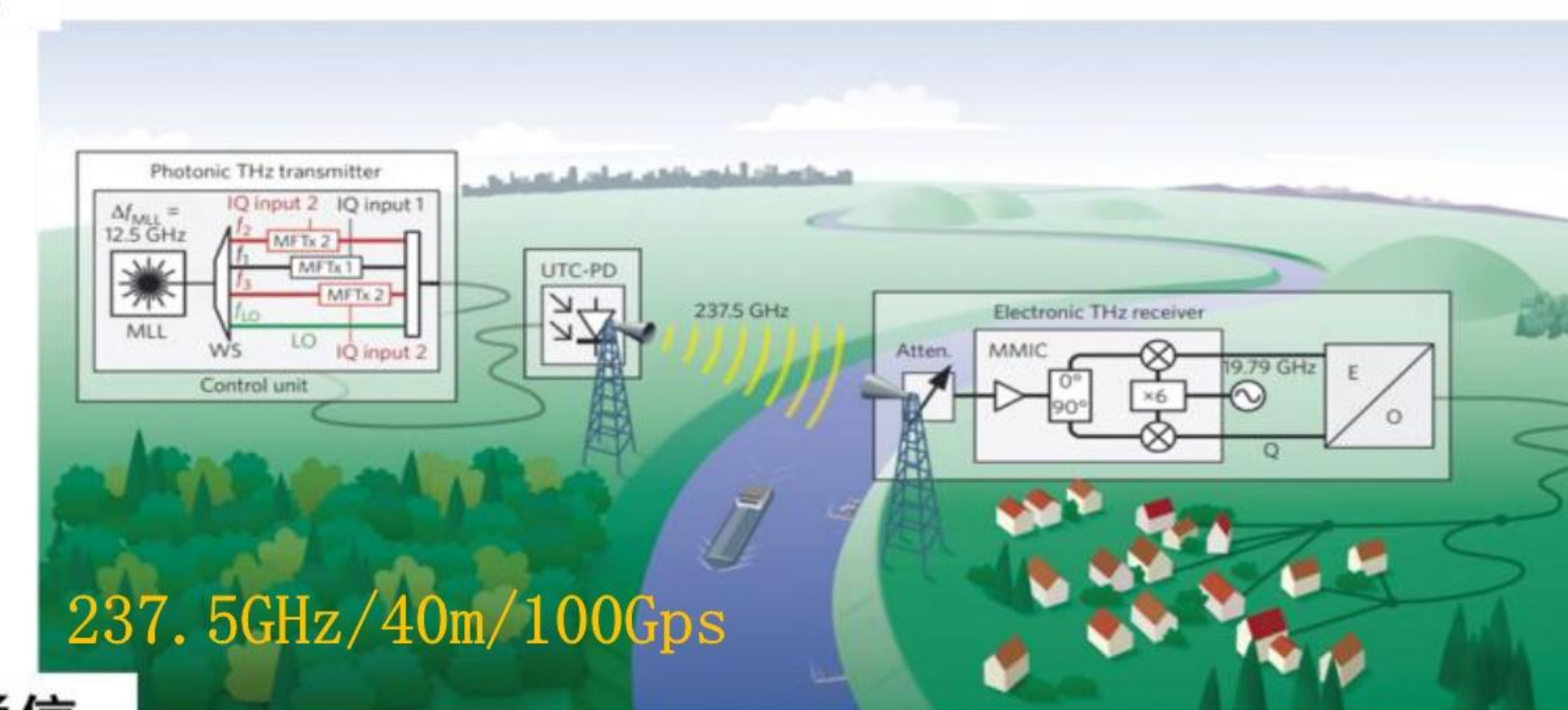
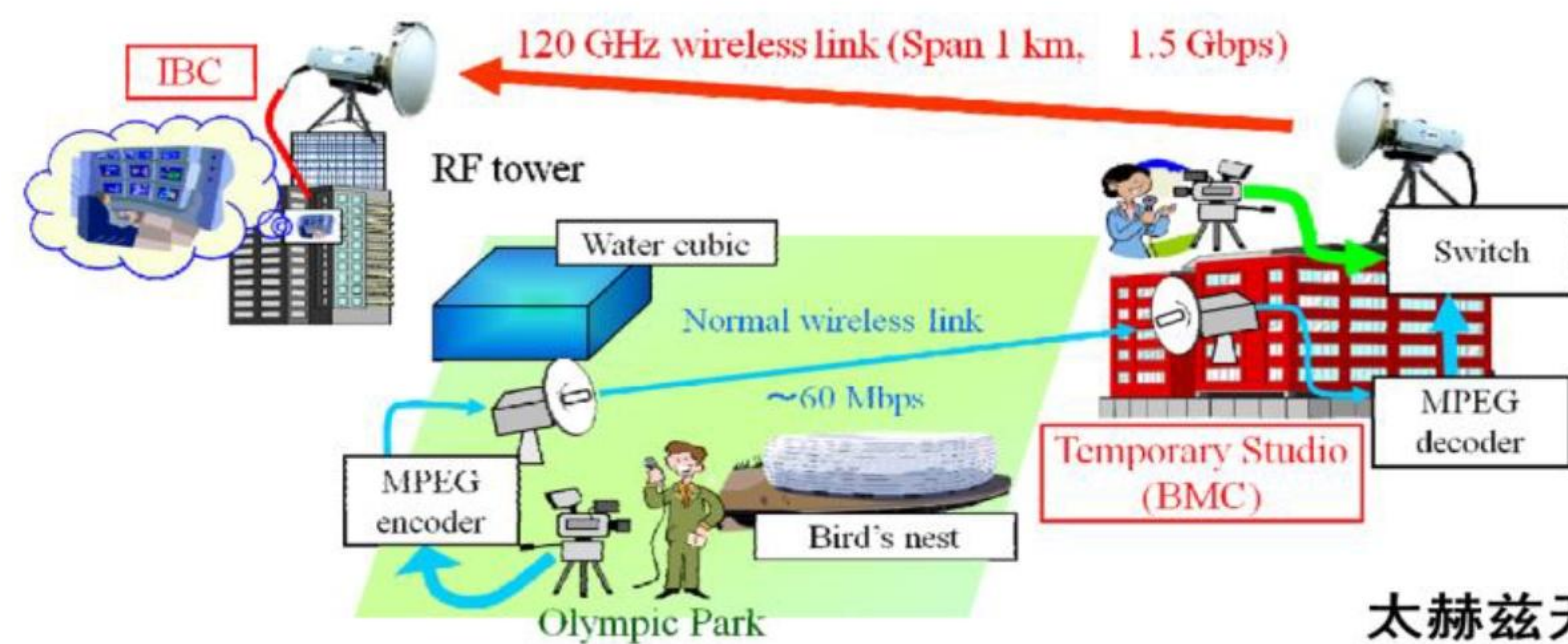
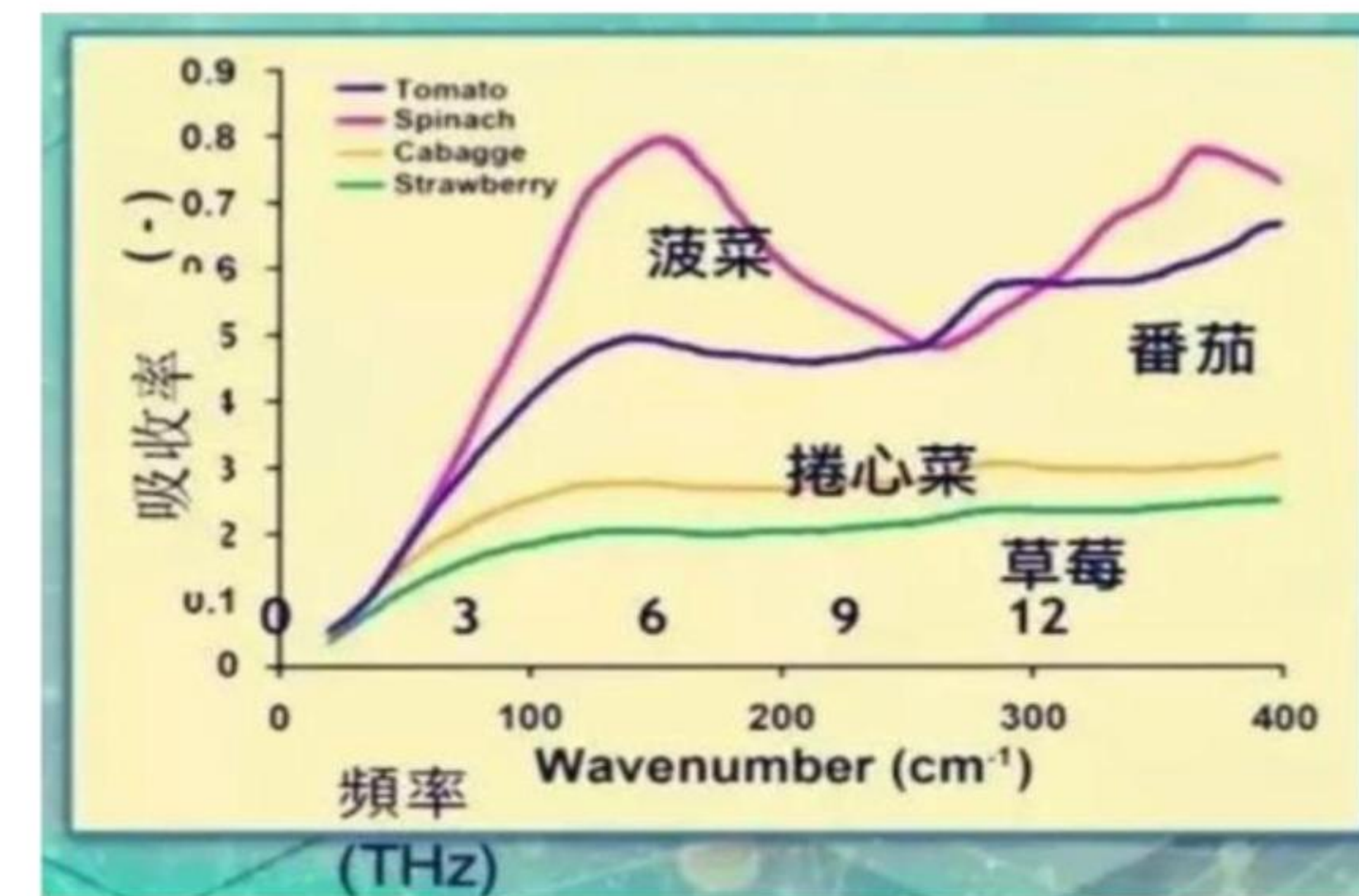
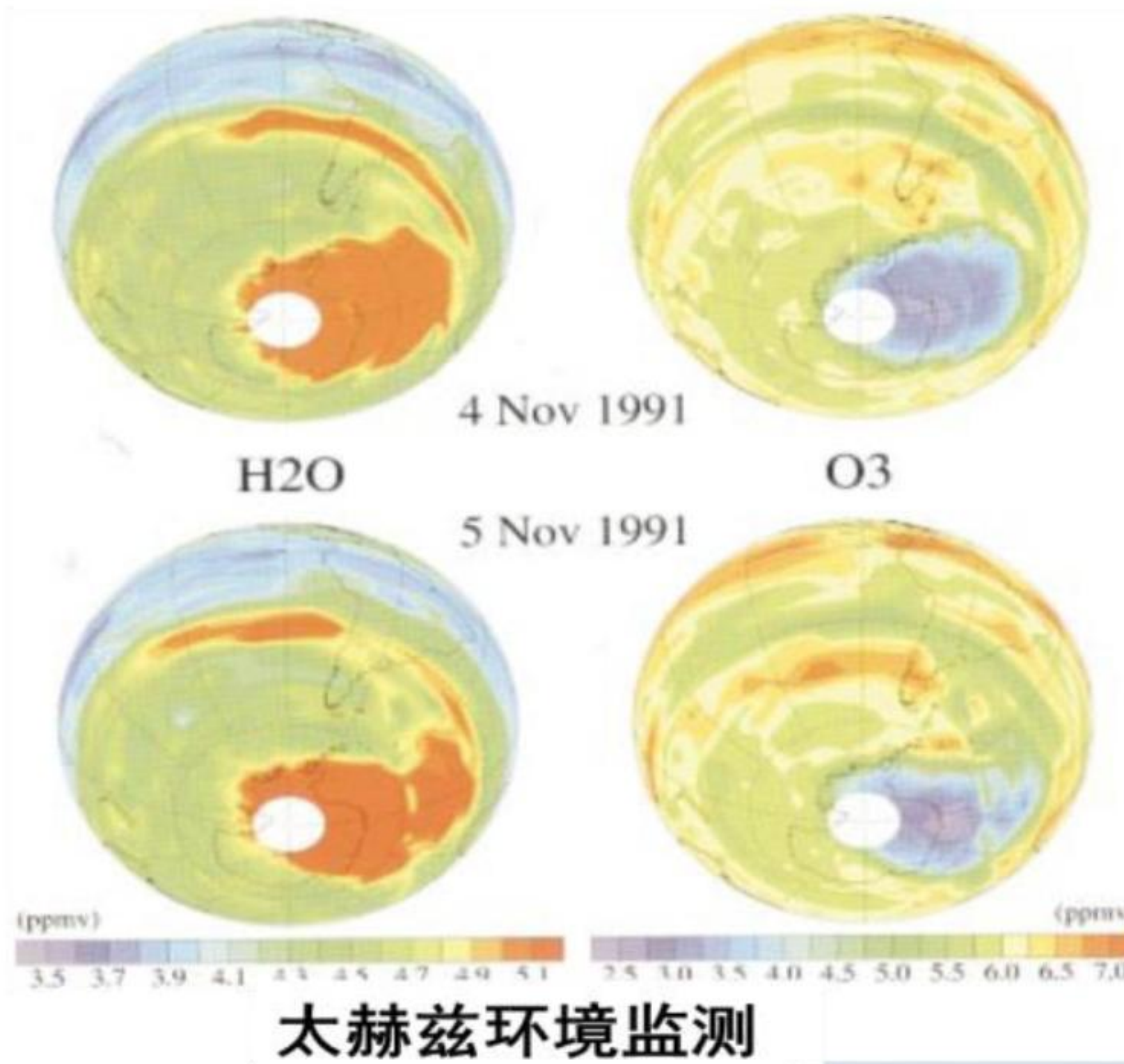
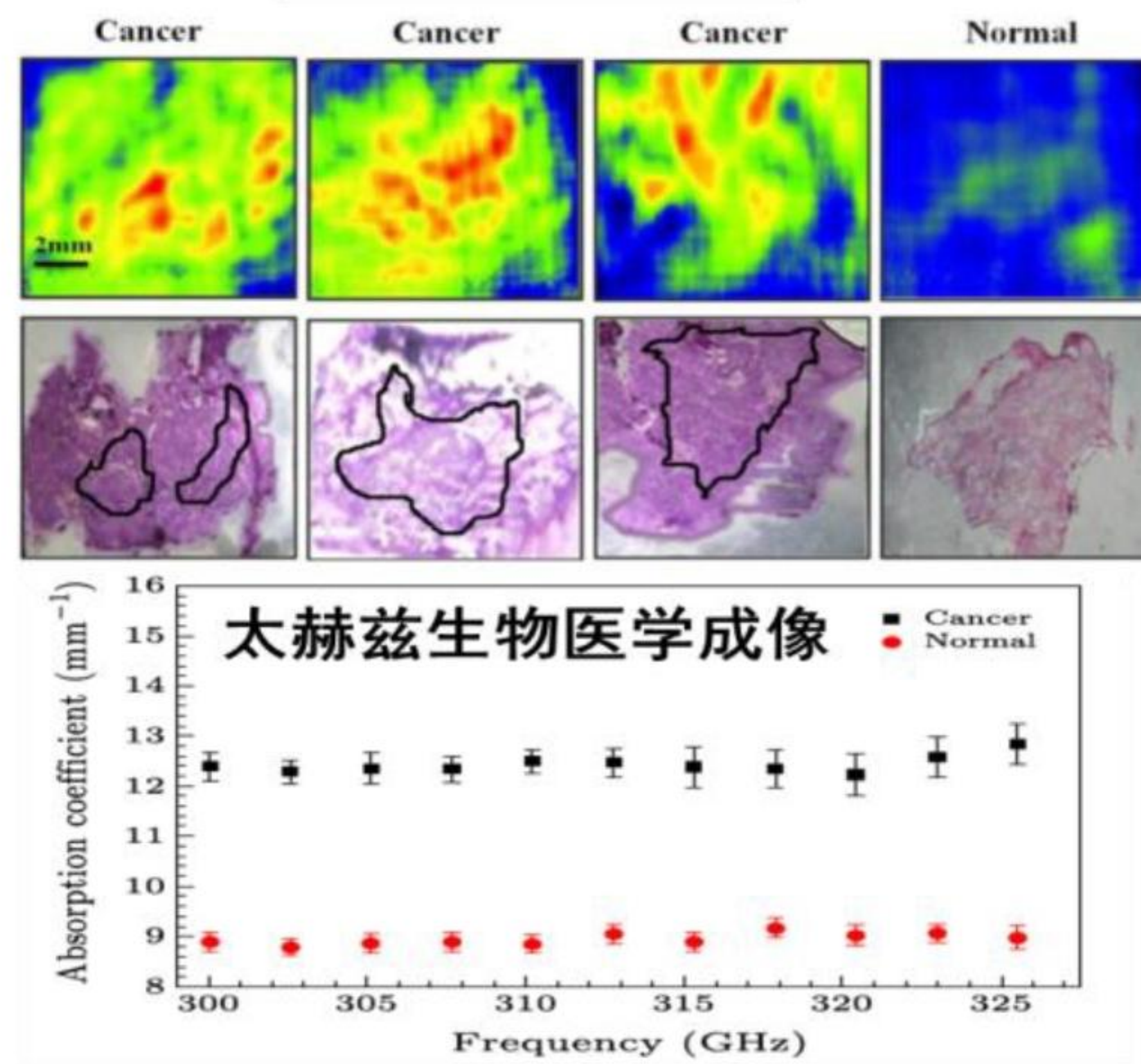
太赫兹雷达成像



太赫兹安全检查



太赫兹无损检测





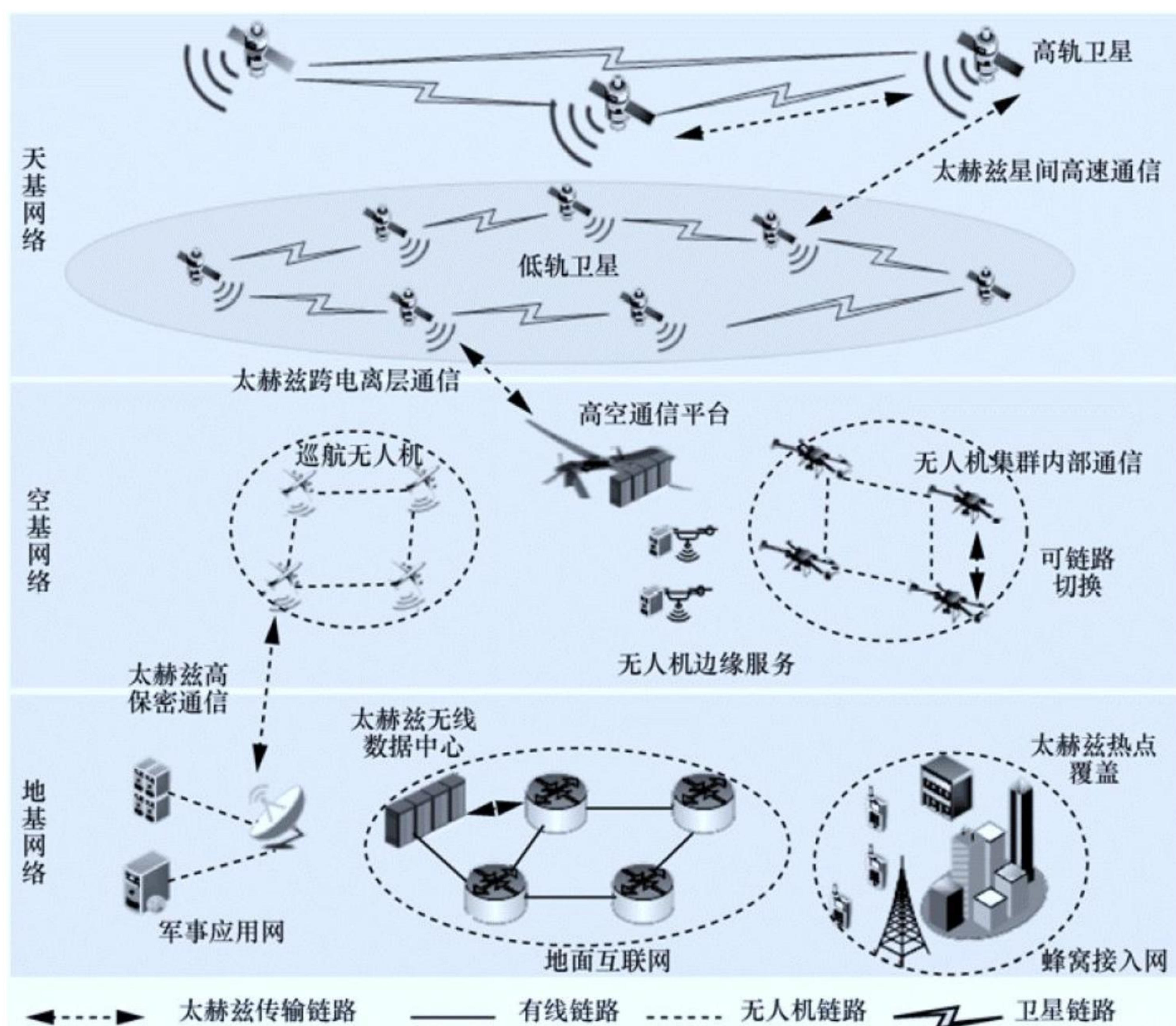
无锡芯光互连技术研究院
WUXI Institute of Interconnect Technology

2

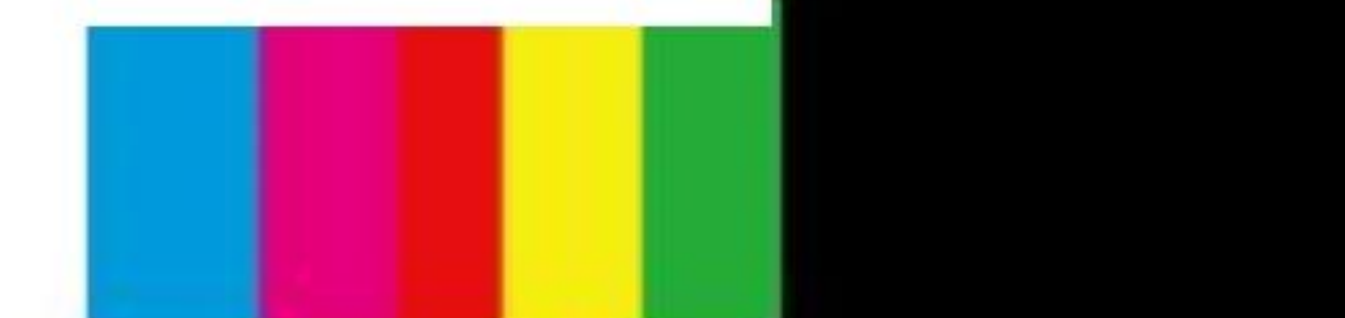
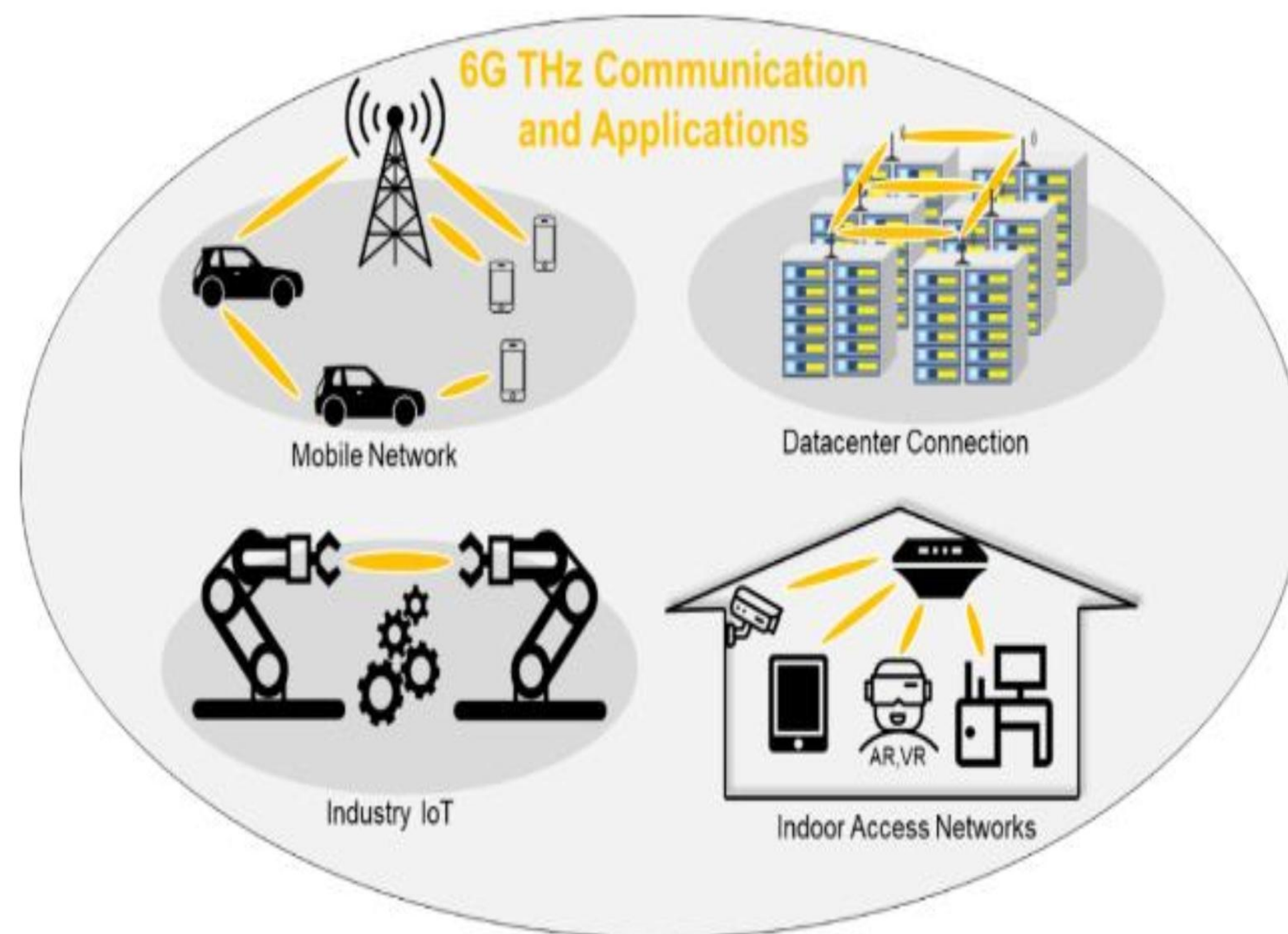
太赫兹无线通信技术

2. 太赫兹无线通信技术

THz通信是以太赫兹频段作为载波实现无线通信的技术。相比于目前的通信频带，高出3-4个数量级，可以提供丰富的频带资源。由于THz频段具有超大带宽的频段资源可供利用，支持超高的通信速率。因此，THz通信被认为是达成6G太比特每秒（Tbps）通信速率的重要技术方案，有望应用在全息通信、微小尺寸通信、超大容量数据回传、短距超高速传输等场景。

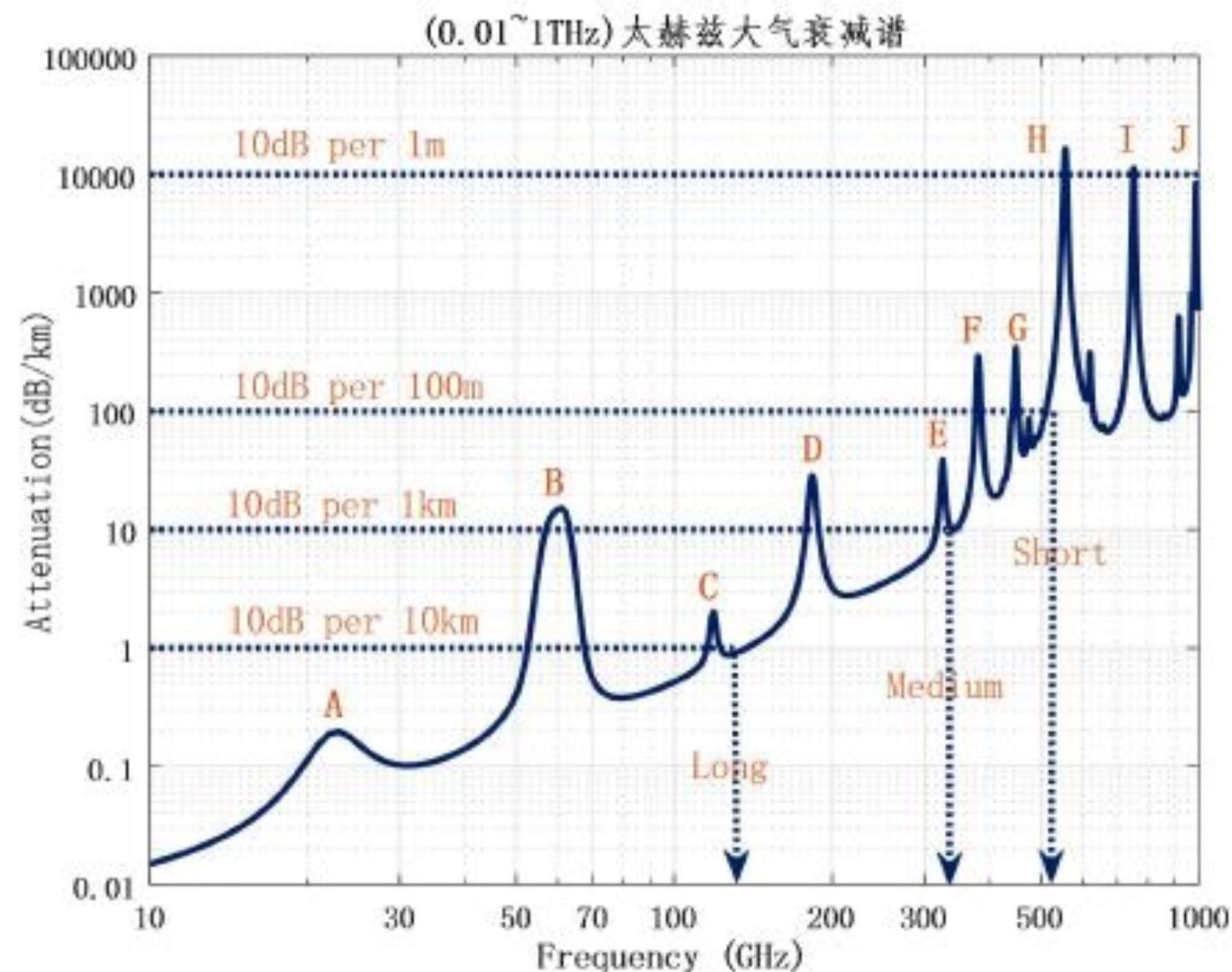
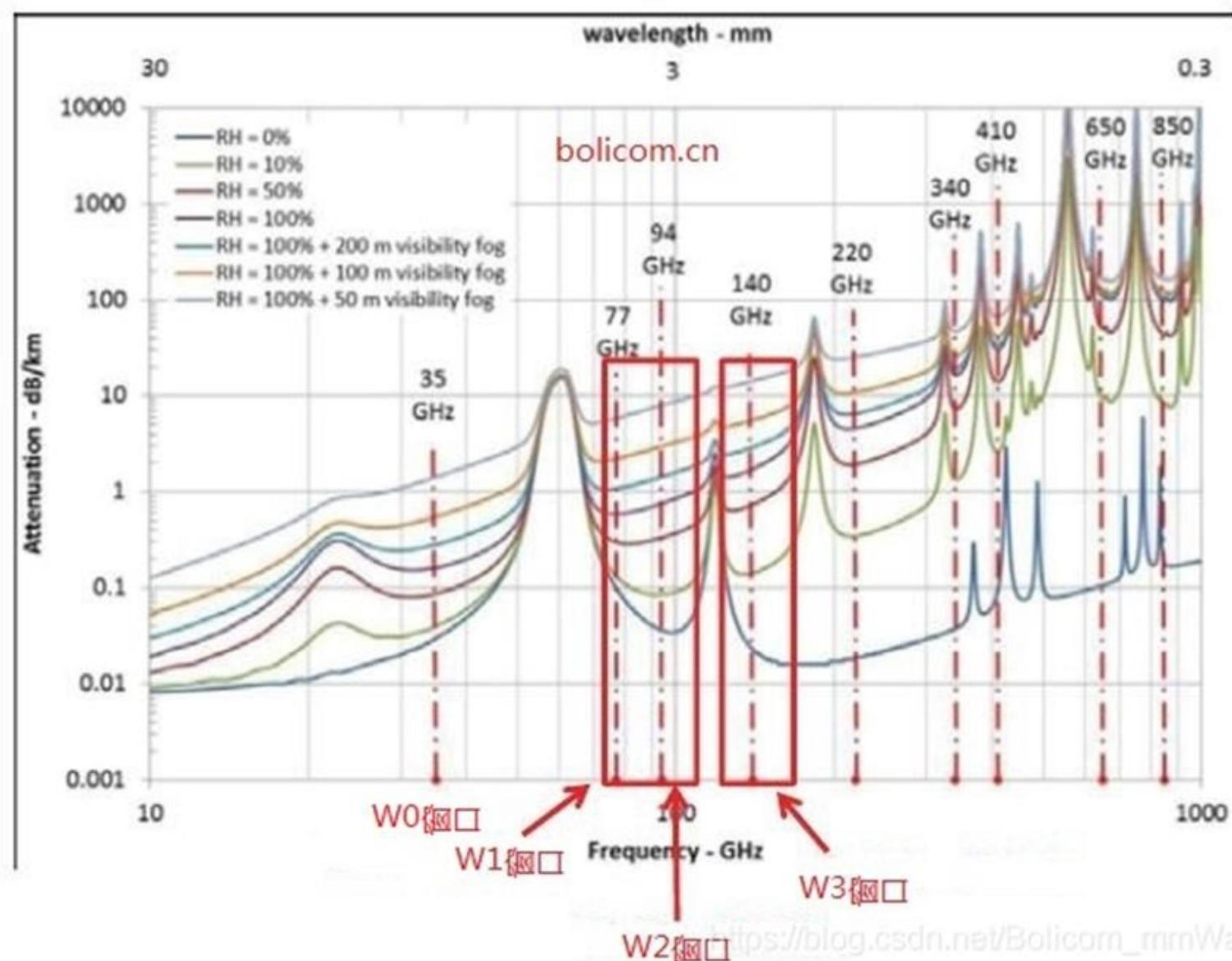


空天地一体化组网场景



2. 太赫兹无线通信技术

THz在大气中传输时存在多个吸收峰和大气窗口，其中在0.85、0.65、0.41、0.34、0.22、0.14 THz等传输窗口附近的大气衰减较低，传输损耗较小。因此，0.1 THz~0.4 THz波段可用于中远距离通信，而在0.4 THz~1 THz波段大气衰减在数十dB/km以上，只能用于近距离战术通信。在大于1 THz的太赫兹高频段，受大气衰减和调制技术的制约，目前的通信传输速率较低，距离较近。



0.01-1THz 频段电磁波大气衰减损耗

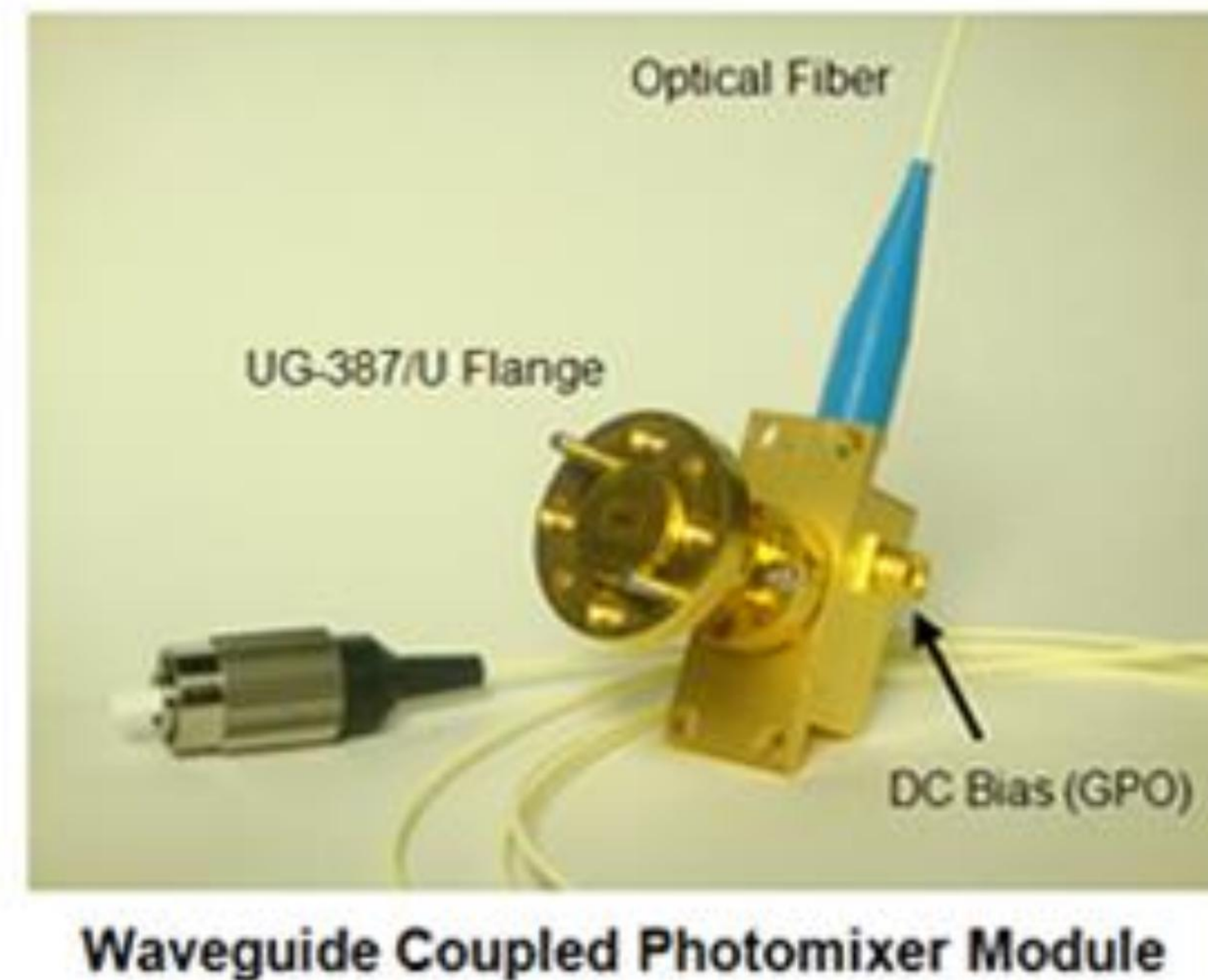
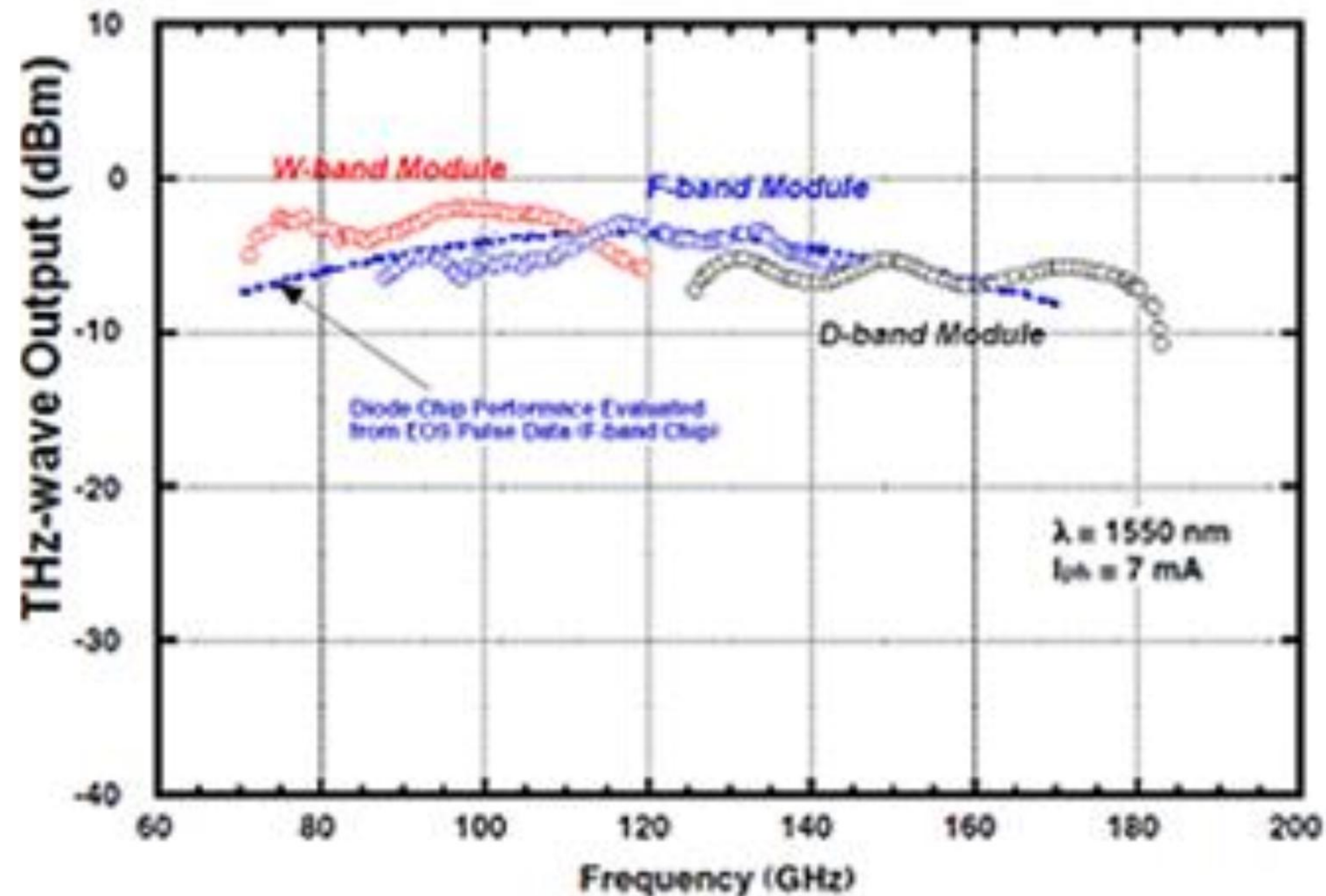


2. 太赫兹无线通信技术

太赫兹通信系统主要涉及的器件：**太赫兹发射源、接收机、倍频器、混频器、调制解调器、低噪声放大器**等。用于太赫兹通信的太赫兹源主要包括：基于光电子原理的连续太赫兹源、电子学倍频太赫兹源、真空太赫兹源和量子级联太赫兹激光器等。

1). 基于光电子原理的连续太赫兹源

基于光电子原理的连续太赫兹源，利用光电子器件采用光学外差混频方法产生太赫兹信号，并进行调制。



2. 太赫兹无线通信技术

2) 电子学倍频太赫兹源

电子学倍频太赫兹源一般包括二极管倍频源和晶体管TMIC倍频源

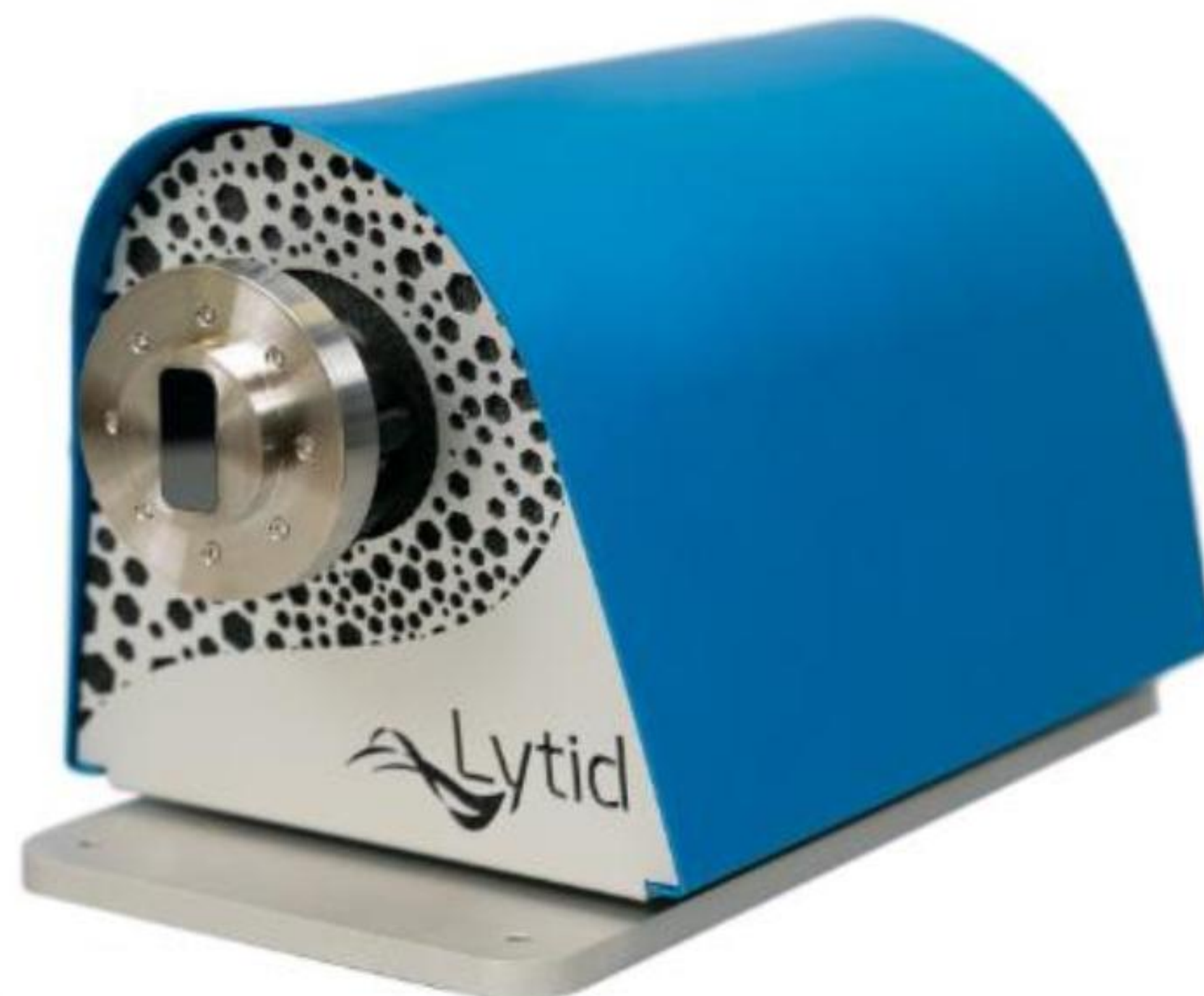


频率覆盖范围为0.1-0.36 THz，频率可调，功率输出最大值可达1 W。



3) 量子级联激光器(商用)

量子级联激光器(QCL)太赫兹频率在2-5 THz。单频点输出，功率>1mW。



4) 真空太赫兹源

真空太赫兹源主要指行波管放大器和扩展相互作用速调管放大器等，有望应用于远距离太赫兹通信系统。



频率覆盖范围为0.1-0.36 THz，频率可调，功率输出最大值可达1 W。

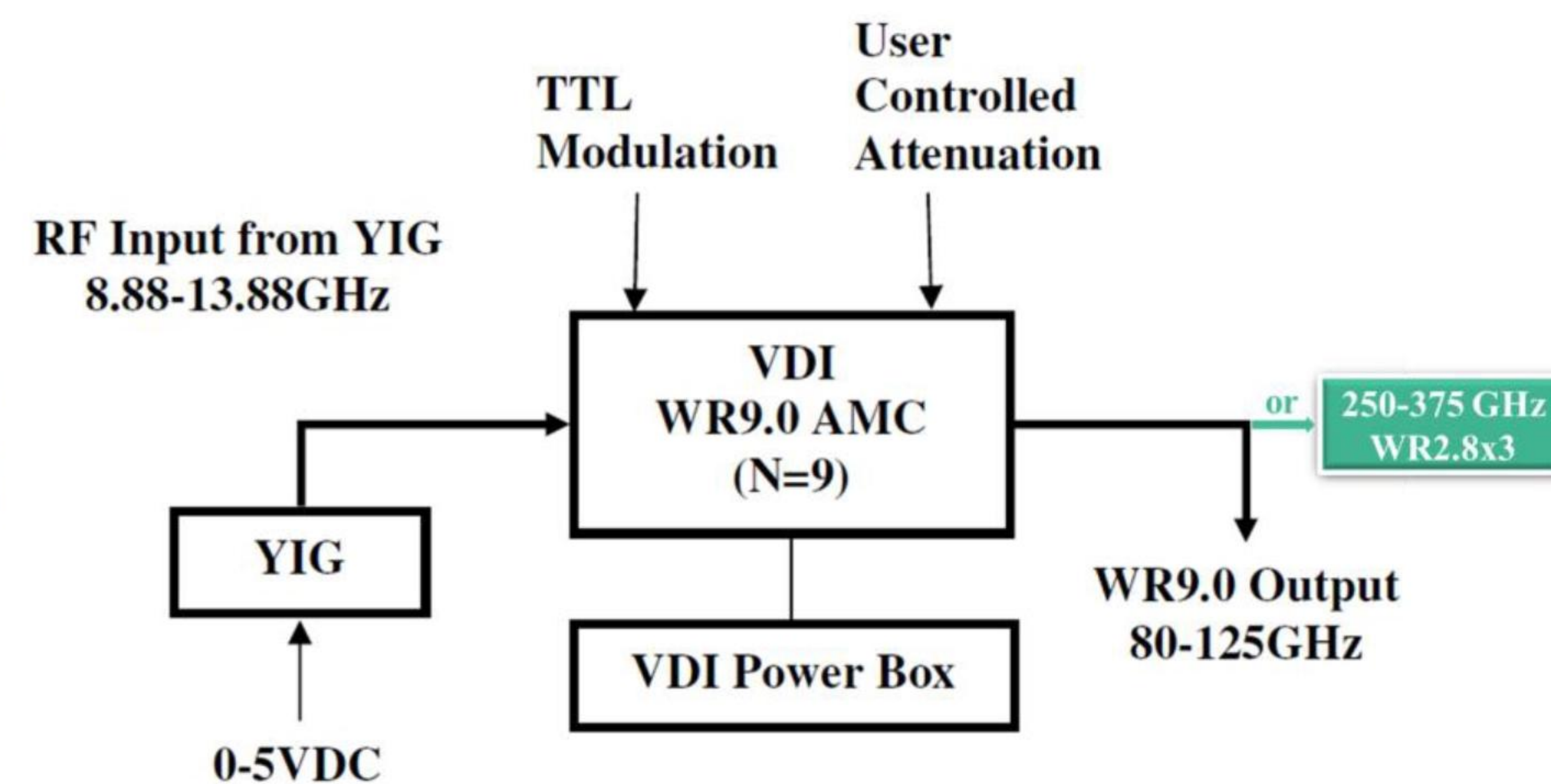
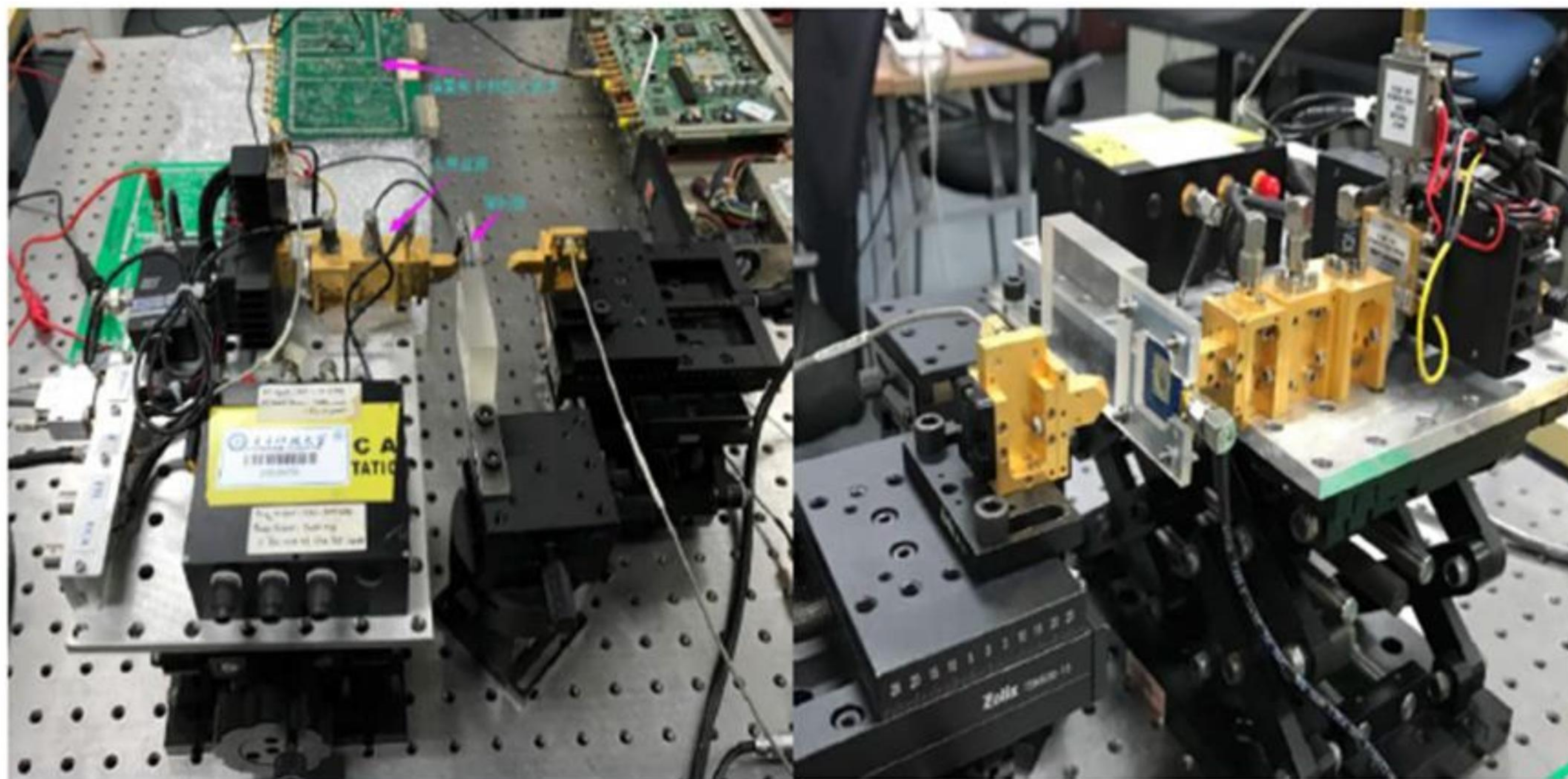


2. 太赫兹无线通信技术

太赫兹无线通信系统主要包括全电子学太赫兹通信系统、光电子太赫兹通信系统、量子级联太赫兹通信系统等，性能参数包括误码率、通信速率、传输距离、通信频段、发射功率和接收灵敏度等。

1). 全电子学太赫兹通信系统

全固态混频电子学方式的太赫兹无线通信系统，该技术是利用混频器进行信号的直接调制，高速数据信号由混频器的中频端输入，在混频器中与本振源差频后产生太赫兹频段的载波调制信号。

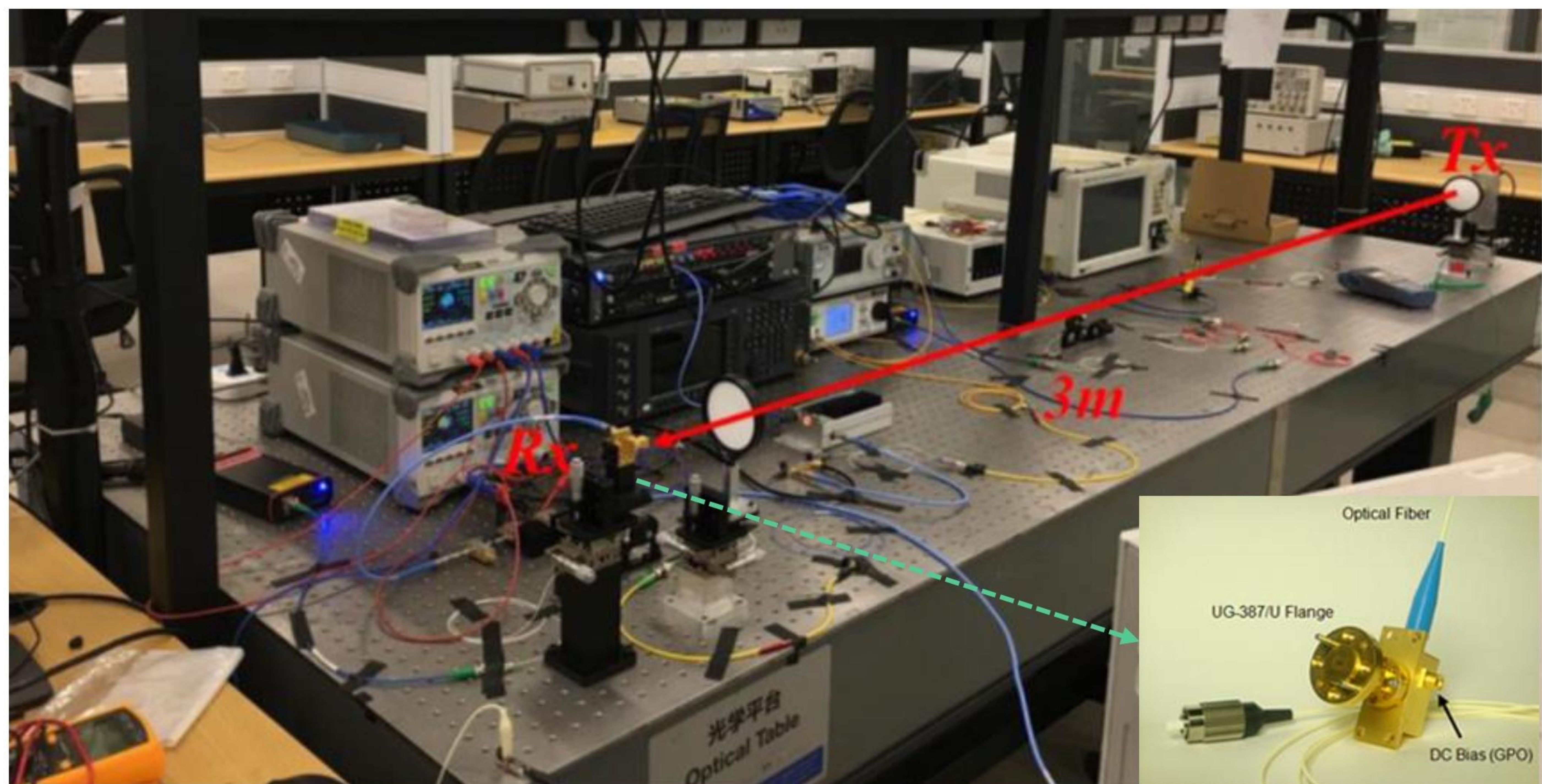


340GHz@100Mbps

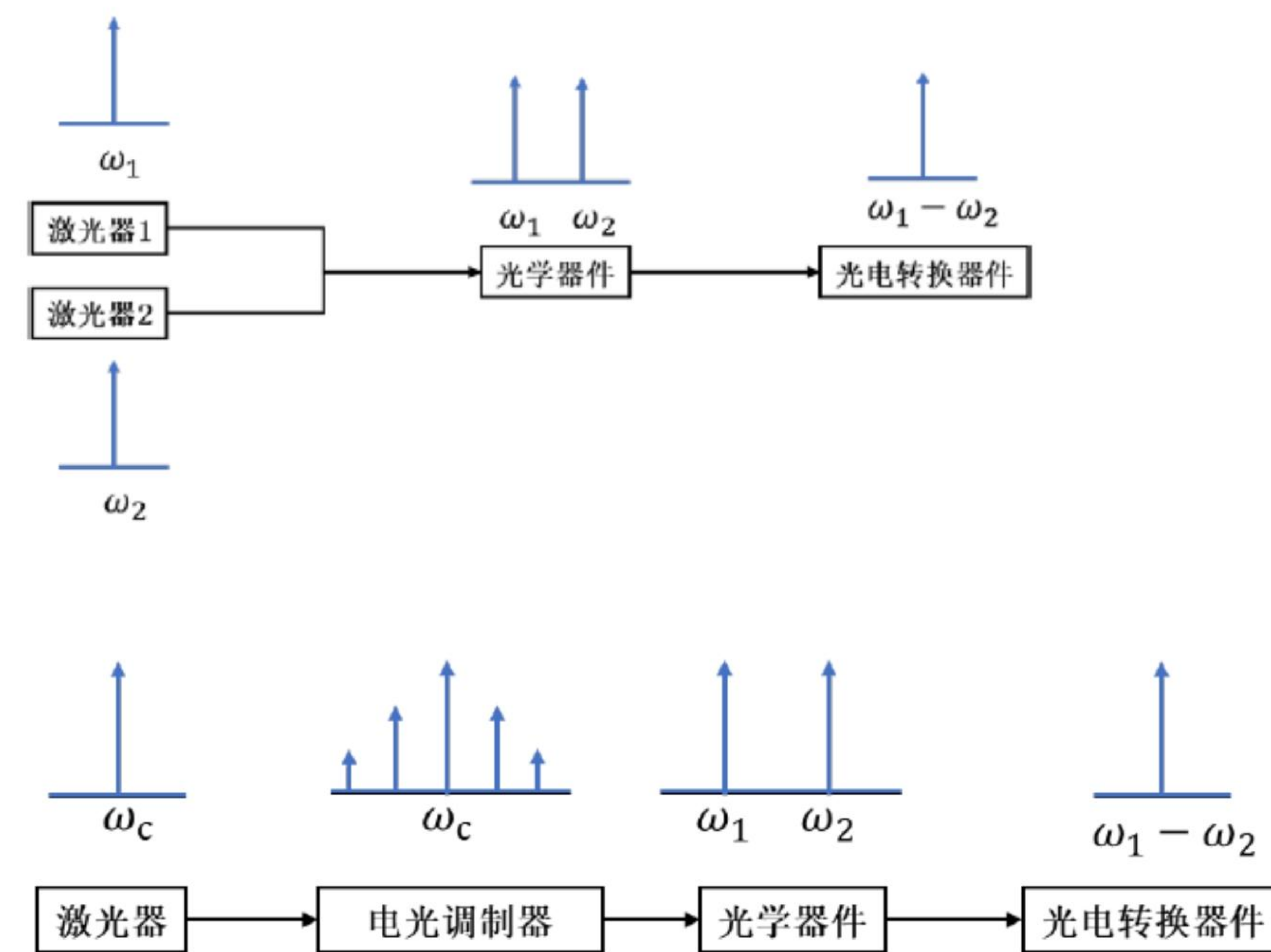


2). 光电子太赫兹通信系统

基于光子技术的太赫兹通信系统通常利用光学外差拍频或直接调制方法产生太赫兹信号进行传输。与全电子太赫兹通信系统相比，基于光子技术的太赫兹系统可以实现超宽带、超高速传输、与高速光纤网络的无缝链接，是连接无线网络与有线网络之间的“桥梁”。



300GHz@100Gbps_10m



2. 太赫兹无线通信技术

	机构名称	相关研究内容	成果应用情况
国外	日本NTT,Osaka大学	120GHz(1.5Gbps)及300GHz(120Gbps)通信系统,相关核心芯片及器件	120GHz系统在高清赛事转播方面开始商业化
	美国布朗大学	300 GHz通信系统,复用器件,信道特征	通信演示
	美国DAPAR	100Gbps射频骨干网,工作频率71-76GHz和81-86GHz,单通道25Gbps,2×2极化复用MIMO	通信演示
	德国IAF、KIT	240GHz(100Gbps)通信系统,相关核心芯片及器件	尚未应用
	法国IEMN	280GHz通信系统(1Gbps)	尚未应用
国内	电子科技大学	电子科技大学太赫兹通信系统,相关核心芯片及模块	太赫兹通信系统已应用于航天工程项目
	中国工程物理研究院电子工程研究所	140GHz(10Gbps),220GHz,340GHz(3Gbps)通信系统,0.1-1 THz核心关键组件,0.3THz以下集成电路芯片	太赫兹核心器件已提供给国内多家单位使用
	西安空间无线电技术研究所	126GHz,236GHz通信系统	面向空间通信的太赫兹通信地面实验
	浙江大学	0.3-0.4THz通信系统(单131Gbps, 2x2@1.2Tbps)	尚未应用
	中国电子科技集团公司第十三研究所	肖特基二极管,太赫兹集成电路芯片	太赫兹核心器件已提供给国内多家单位使用





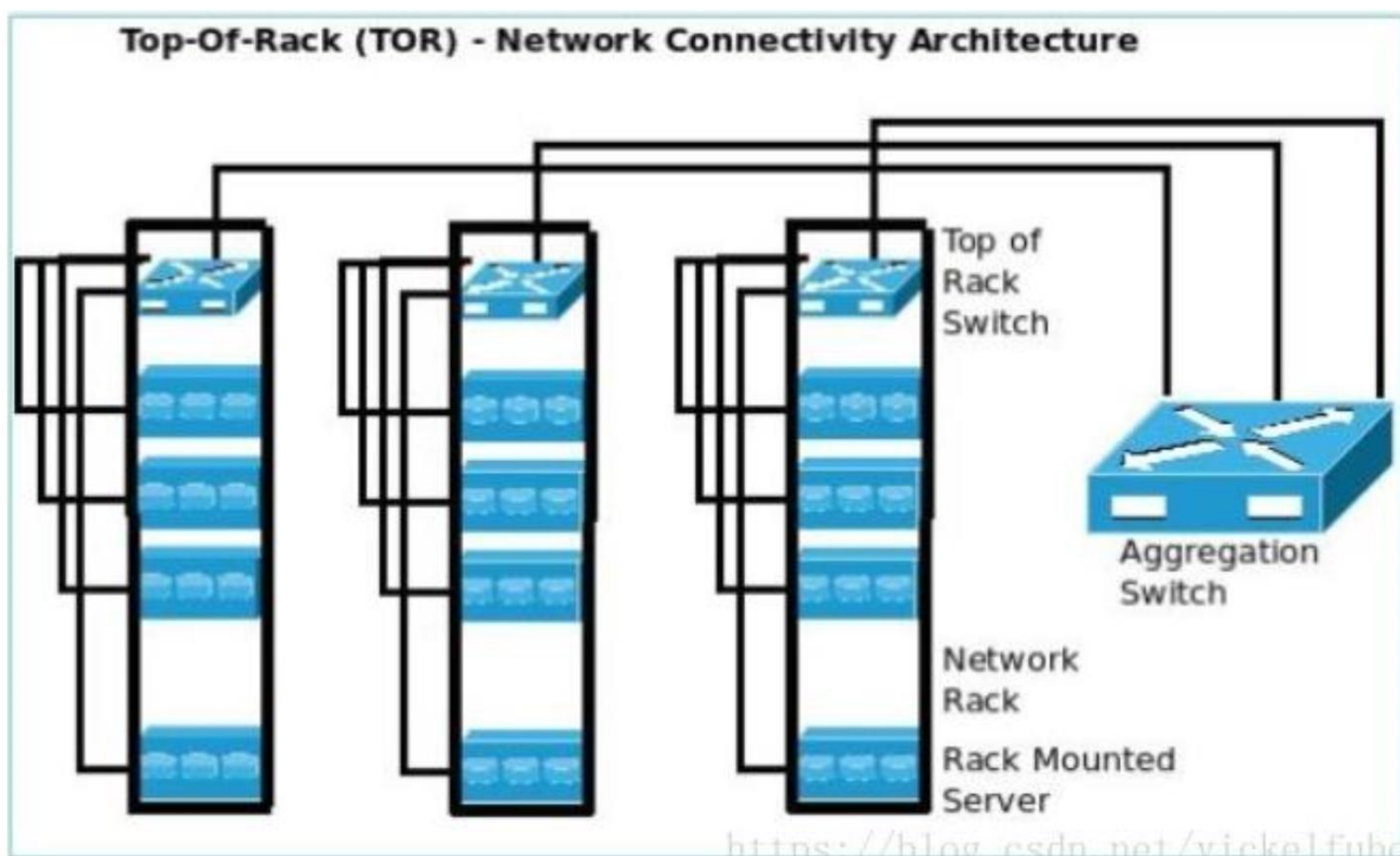
无锡芯光互连技术研究院
WUXI Institute of Interconnect Technology

3

数据中心无线通信技术

3. 数据中心无线通信技术

随着通信技术的不断发展，云服务应用的需求不断增加，对数据中心服务器/服务器群的应用需求也快速增长。传统的数据中心架构基于线缆连接，海量线缆的空间占用和维护成本较高，对于数据中心的散热和服务器性能都有一定影响。

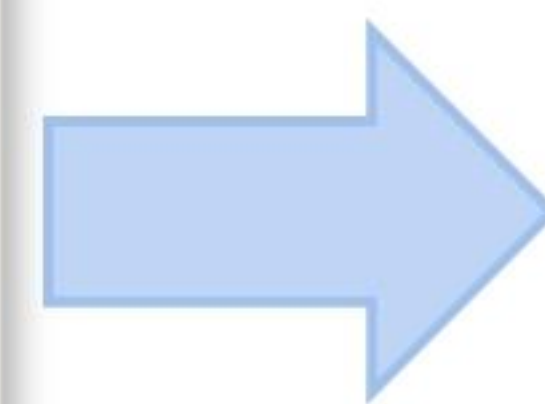


3. 数据中心无线通信技术

随着无线通信技术尤其是毫米波、太赫兹、自由空间光等技术的发展，用高速率的无线通信传输数据逐步成为现实，从而使在大规模并行计算机系统中应用高速无线通信技术成为可能。

无线通信链路具有较高的灵活性，可以在不新增布线的情况下建立链路连接，且可以动态调整网络拓扑结构。目前对于数据中心无线通信技术的研究，主要集中在60 GHz毫米波无线通信技术和自由空间光(FSO)无线光通信技术两方面。

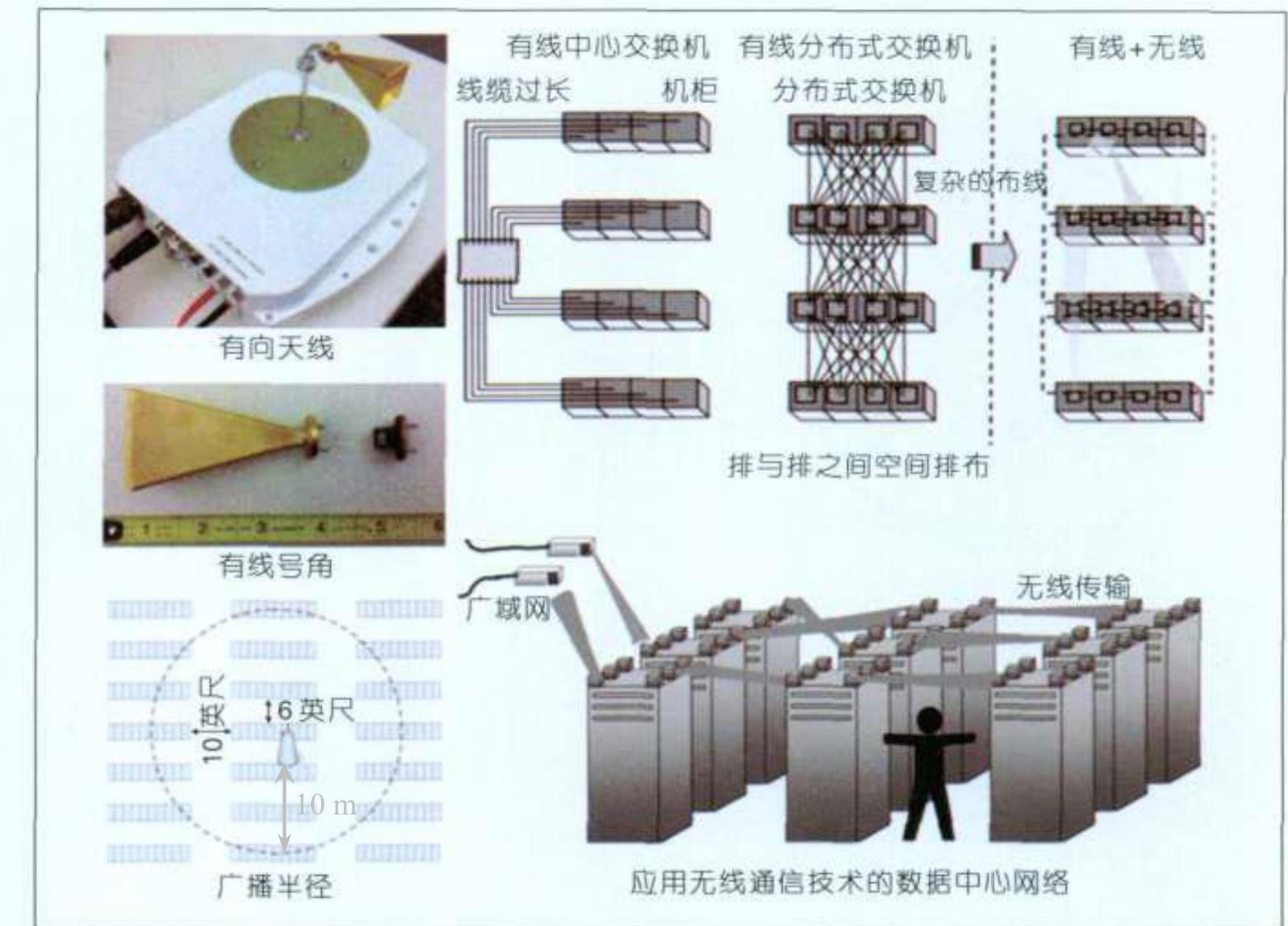
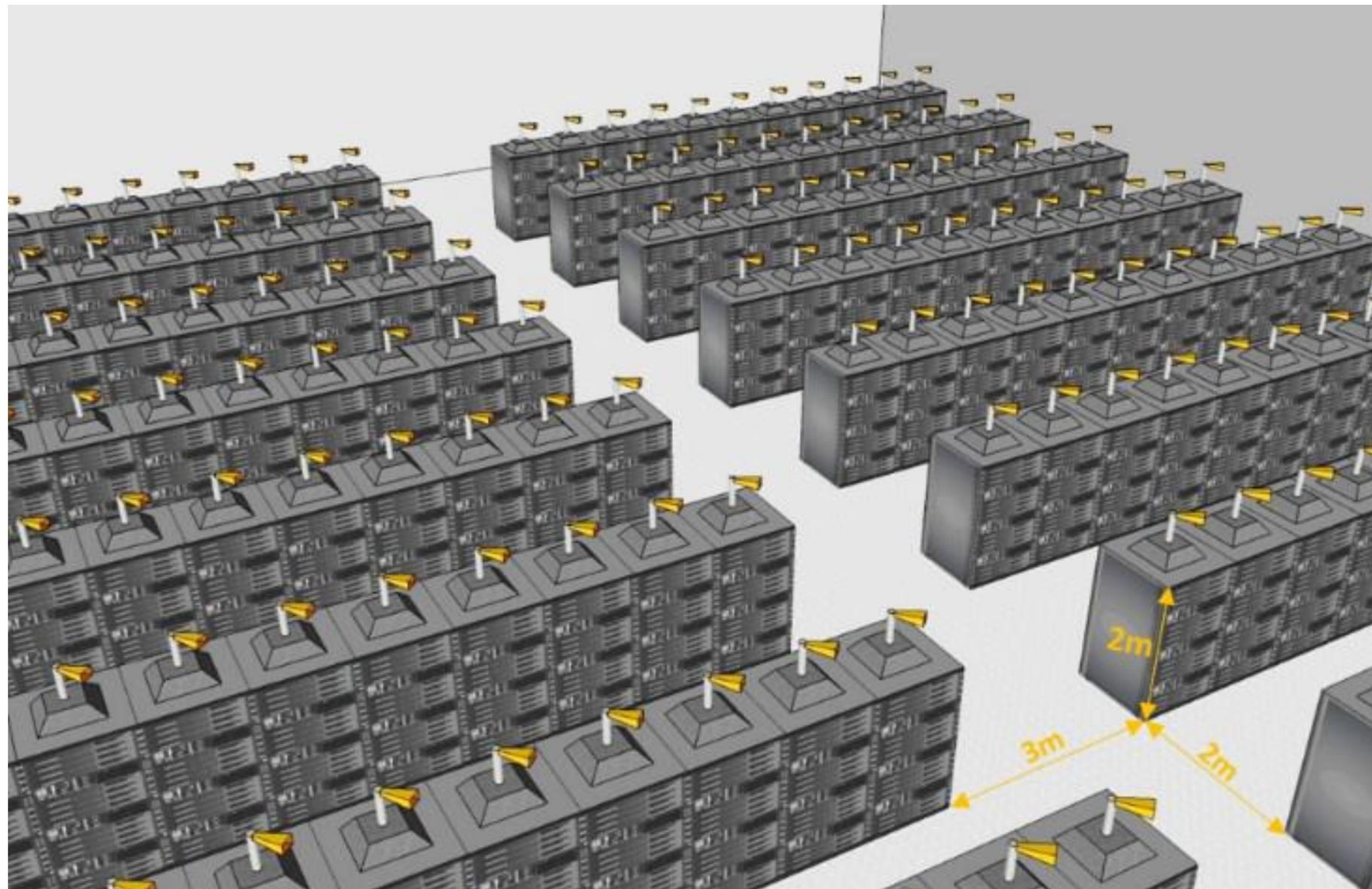
有线与无线数据中心网络对比



性能指标	无线通信	有线通信
灵活性	高	低
网络扩展性	高	低
部署时间	快	慢
冷却效率	高	低
建筑结构	简单	复杂
空间利用率	高	低
网络安全	低	高



数据中心毫米波有线/无线混合通信技术(60GHz)

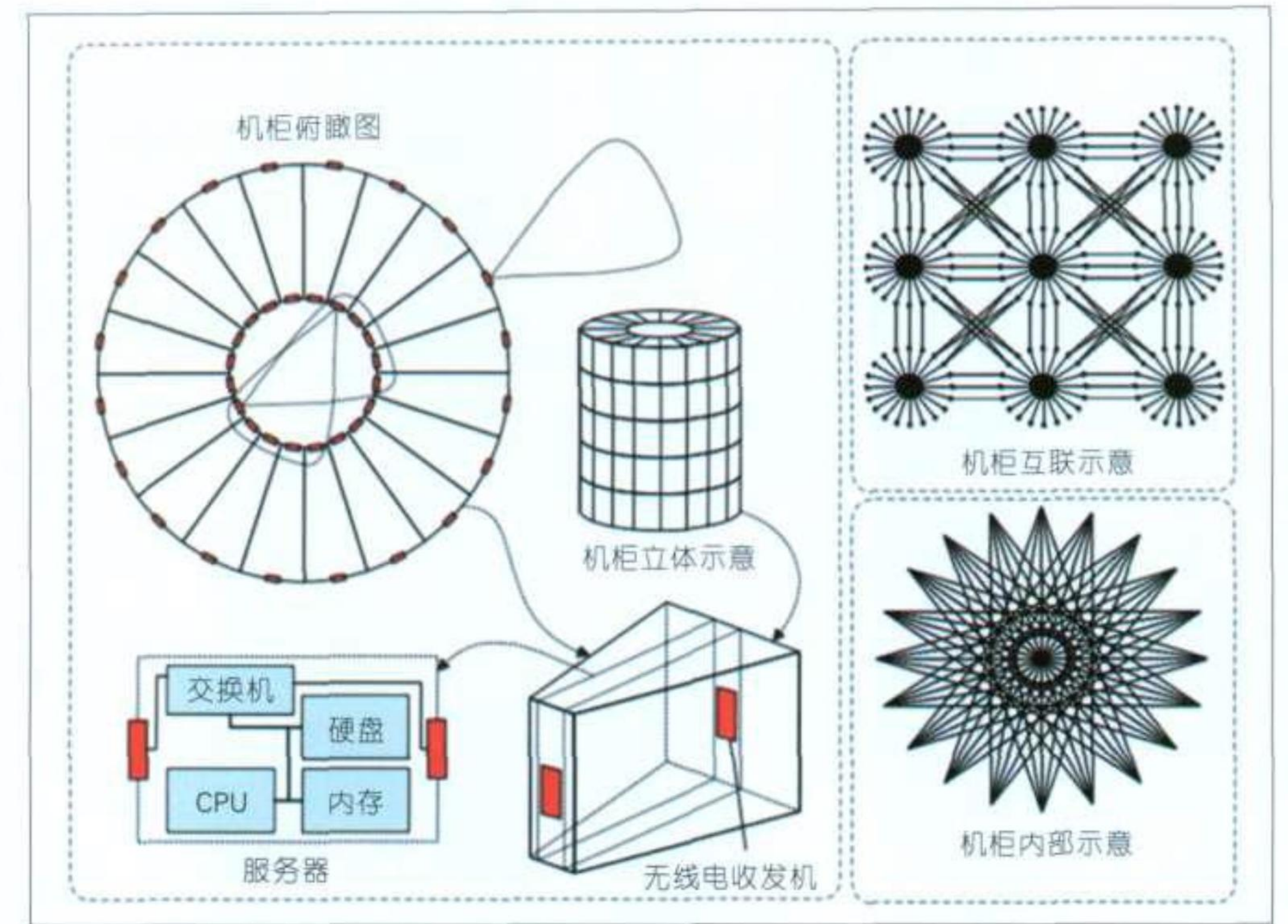
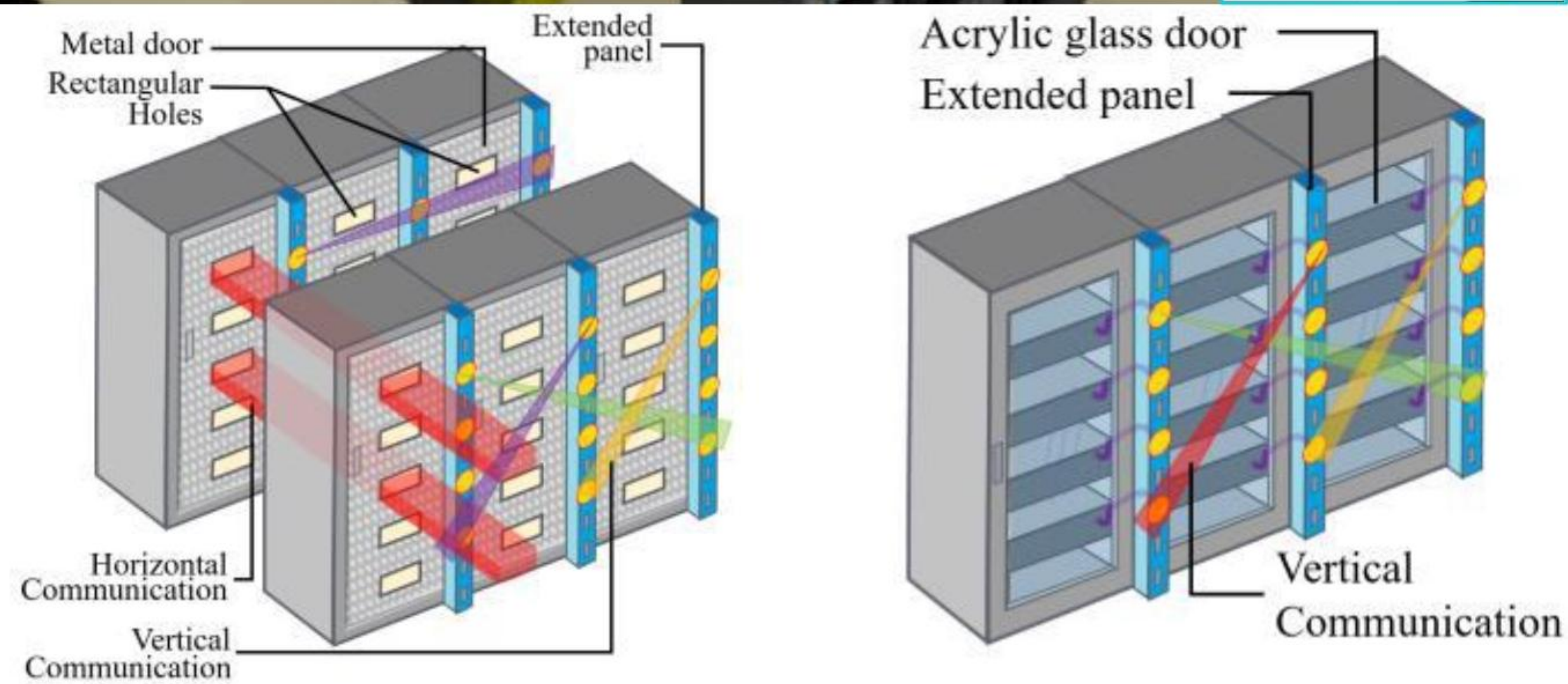
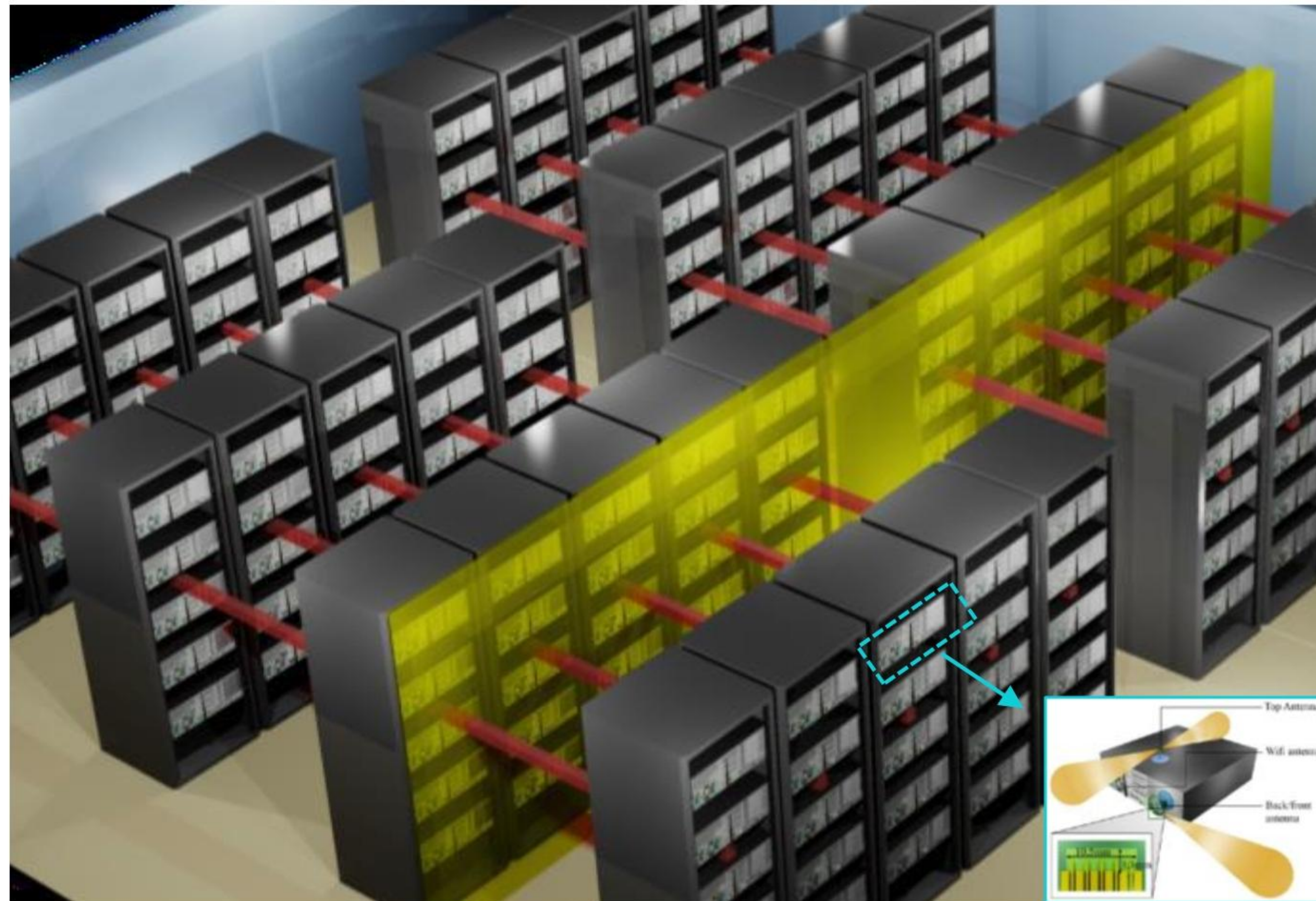


Mamun S A , Umamaheswaran S G , Chandrasekaran S S , et al.
An Energy-Efficient, Wireless Top-of-Rack to Top-of-Rack Datacenter Network Using 60GHz Links[C].
IEEE, 2017.

Katayama Y, Takano K, Kohda Y, et al. Wireless data center networking with steered-beam mmwave links[C]. 2011 IEEE wireless communications and networking conference. IEEE, 2011: 2179-2184.



数据中心毫米波全无线通信技术(60GHz)

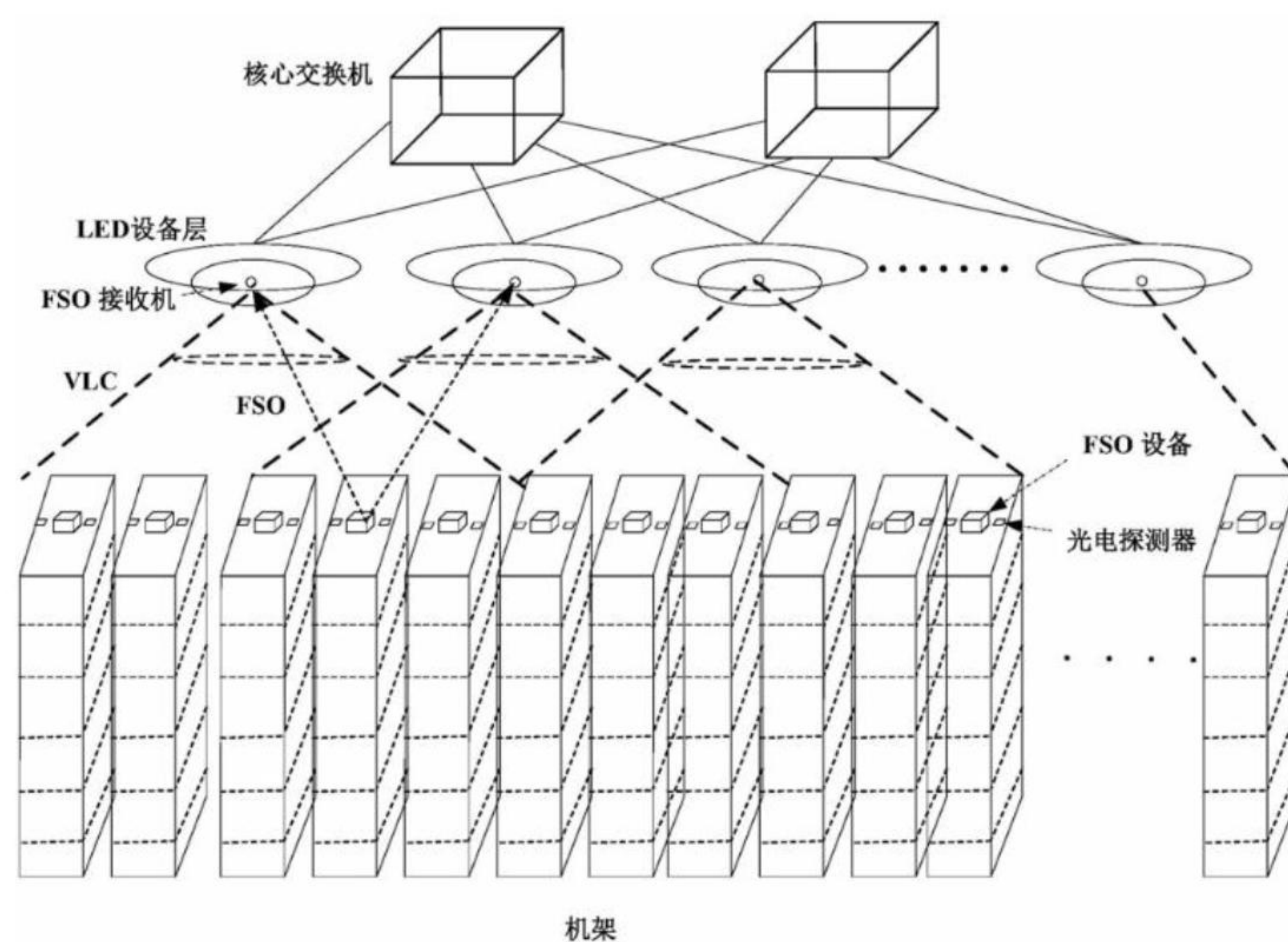
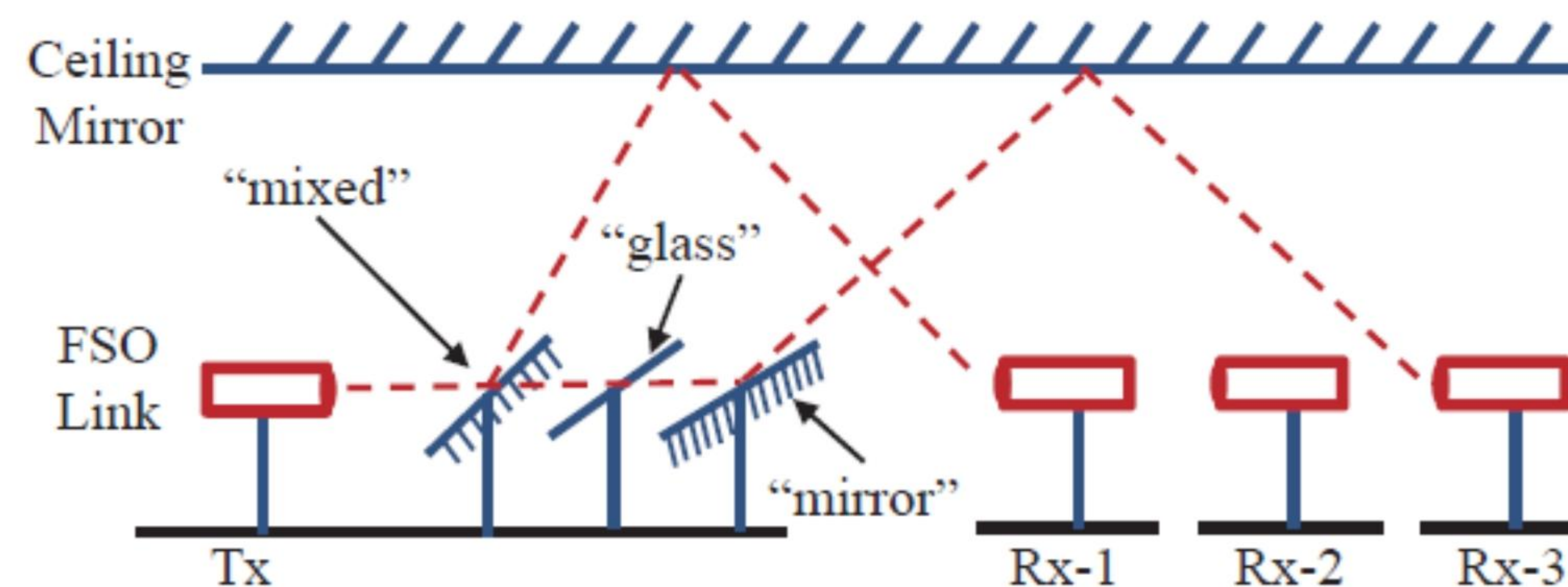
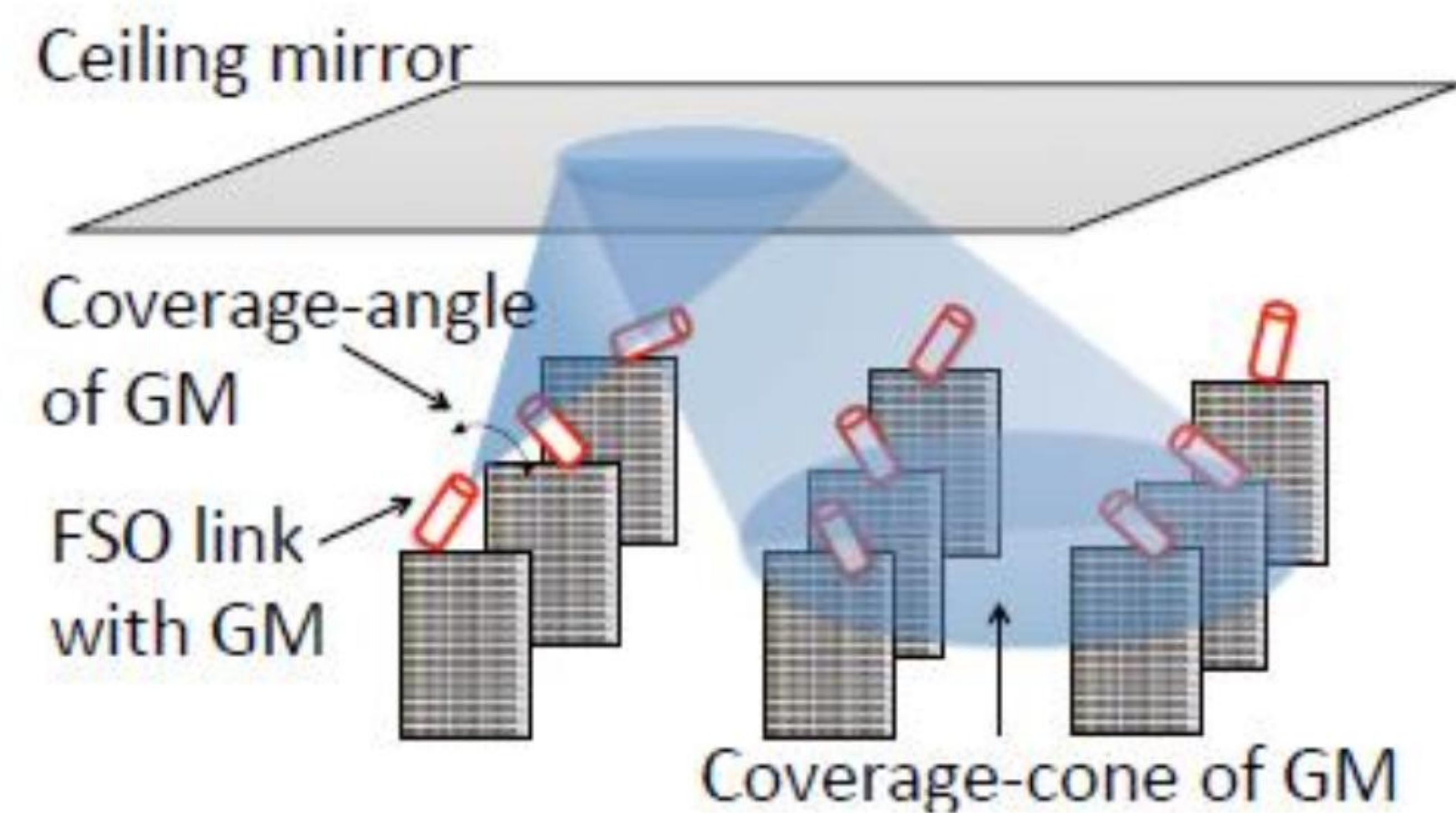


Shin J Y, Sireer E G, Weatherspoon H, et al. On the feasibility of completely wireless datacenters[C]. Proceedings of the eighth ACM/IEEE symposium on Architectures for networking and communications systems. 2012: 3-14.

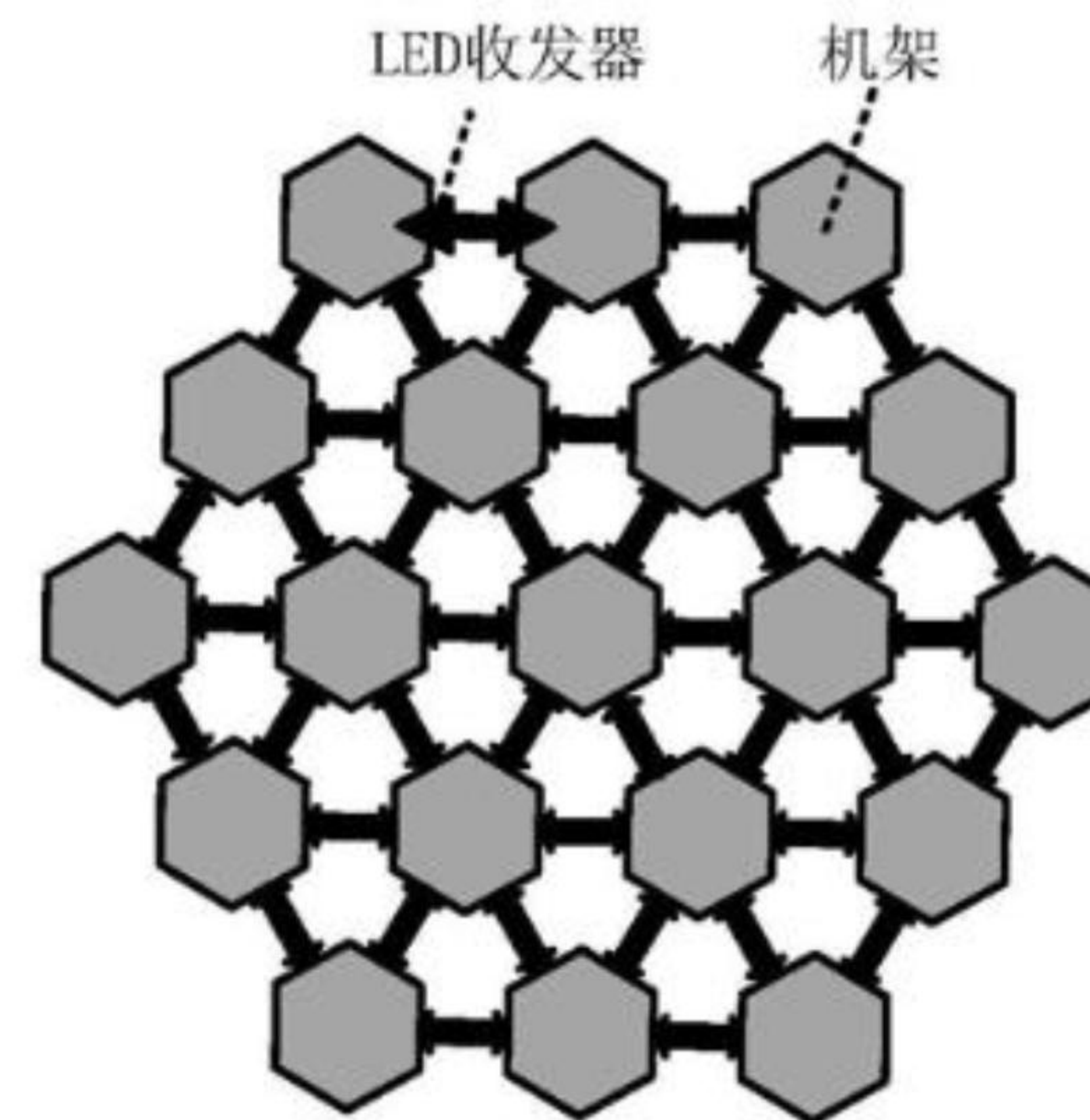
Mamun S A , Umamaheswaran S G , Ganguly A , et al. Performance Evaluation of a Power-Efficient and Robust 60GHz Wireless Server-to-Server Datacenter Network[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2018, 2(4):1174-1185.



数据中心自由空间光无线通信技术



一种数据中心无线光通信系统
(CN105790835B)

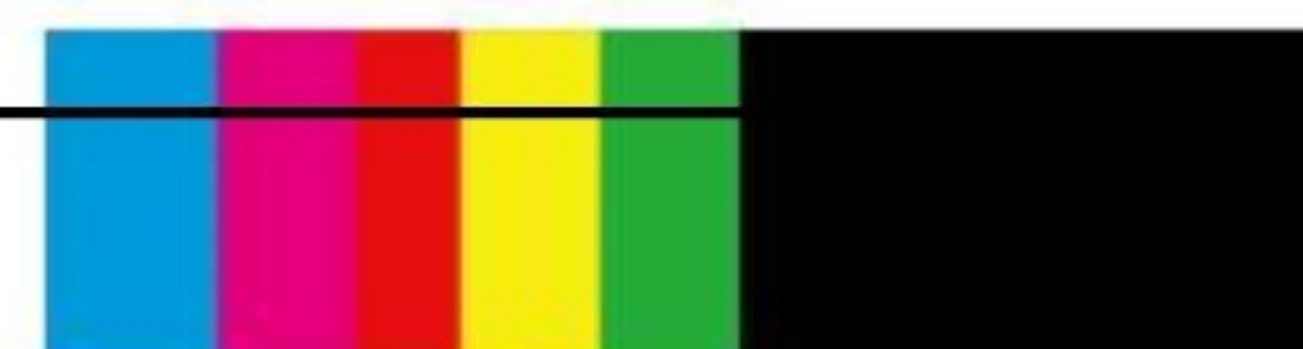


机架俯视图

一种基于可见光通信的蜂窝状结构无线数据中心网络
(CN113489537A)

数据中心无线网络研究工作

研究工作	时间	类型	无线技术	亮点	物理拓扑	问题
Flyway	2009	混合	60GHz毫米波	首次证明了在数据中心网络中使用60GHz无线技术的可行性	行列	需要机架顶端和天花板之间有一定的完全空旷空间, 在实际部署过程中难度较大
Cayley	2013	无线	60GHz毫米波	提出一种圆柱形的中空机架并将其建立成网状结构, 机架内和机架间均使用无线通信	蜂窝状	需要全部更换现有机架, 实际部署难度较大, 成本较高
S2S-WiDCN	2017	混合	60GHz毫米波	与传统的基于胖树的DCN相比, 改进了流完成时间和吞吐量, 同时大幅度降低了功耗	行列	该架构无法应用于大规模的数据中心
Comb	2019	混合	60GHz毫米波	极大地减少信号阻断的发生, 缩短路由路径, 增大网络的连通性	行列	天花板高度会限制部署规模
FireFly	2014	混合	FSO	使用天花板反射镜, 利用机架上方空间建立一条无障碍的光路	行列	依靠传统机械旋转技术动态调整收发器角度, 会造成一定传输时延, 实际部署难度较大
OWCell	2016	混合	FSO	单元内的机架排列成规则的多边形拓扑, 并完全相互连接, 具有良好的可扩展性和连接性	蜂窝状	空间利用率不高
Chaintoutis等人	2018	混合	FSO	大大降低了布线的复杂性和相关的维护问题	网状	需要全部更换现有机架, 实际部署难度较大, 成本较高
SFNet	2020	混合	FSO	扩充了有线胖树网络, V L C链路减少了平均路径长度, 提高了网络性能	行列	有限的天花板高度限制了可以放置在机架顶部的V L C收发器总数



3. 数据中心无线通信技术

利用毫米波、太赫兹和自由空间光可以分别实现Gbps、Tbps和数Tbps的传输速率，但在实际通信系统实现中，毫米波能达到的传输速率仅为7Gbps，自由空间光能达到的传输速率目前测试达到了40Gbps，而太赫兹在实验室中能达到的传输速率测试达到了130Gbps。

候选高速无线技术对比

性能指标	毫米波通信	太赫兹通信	自由空间光通信
频段	30-300GHz	0.1-10THz	>100 THz
频宽	10GHz	100GHz	>100GHz
实验速率	7Gbps	130Gbps/Tbps	40Gbps
传输距离	短-中	短	中
传输损耗	高	很高	中
噪声	热噪声	热噪声	环境光
连接性	点对点, 多点对多点	点对点, 多点对多点	点对点
接收器尺寸	小	非常小	小
传输角度	较大	大	线性传输

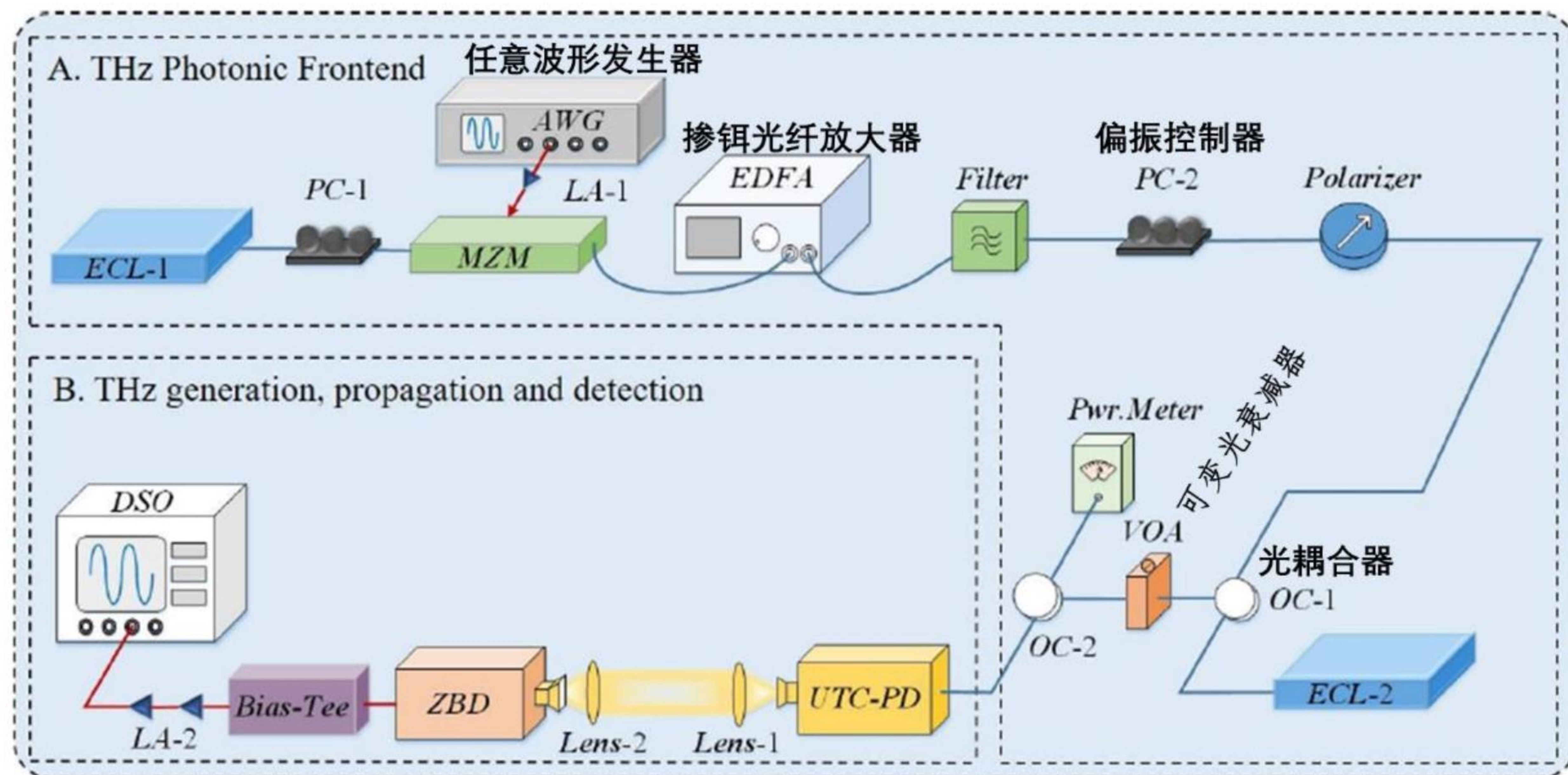
FSO传输速率与光模块有关，需要**极为精确的校准**以建立LoS链路，相对毫米波通信而言条件更为苛刻。

目前最先进的**太赫兹收发器和天线**还没有很好地商业化，但它们尺寸很小，方向性强，传输速率很大，未来的应用价值极大。



3. 数据中心无线通信技术

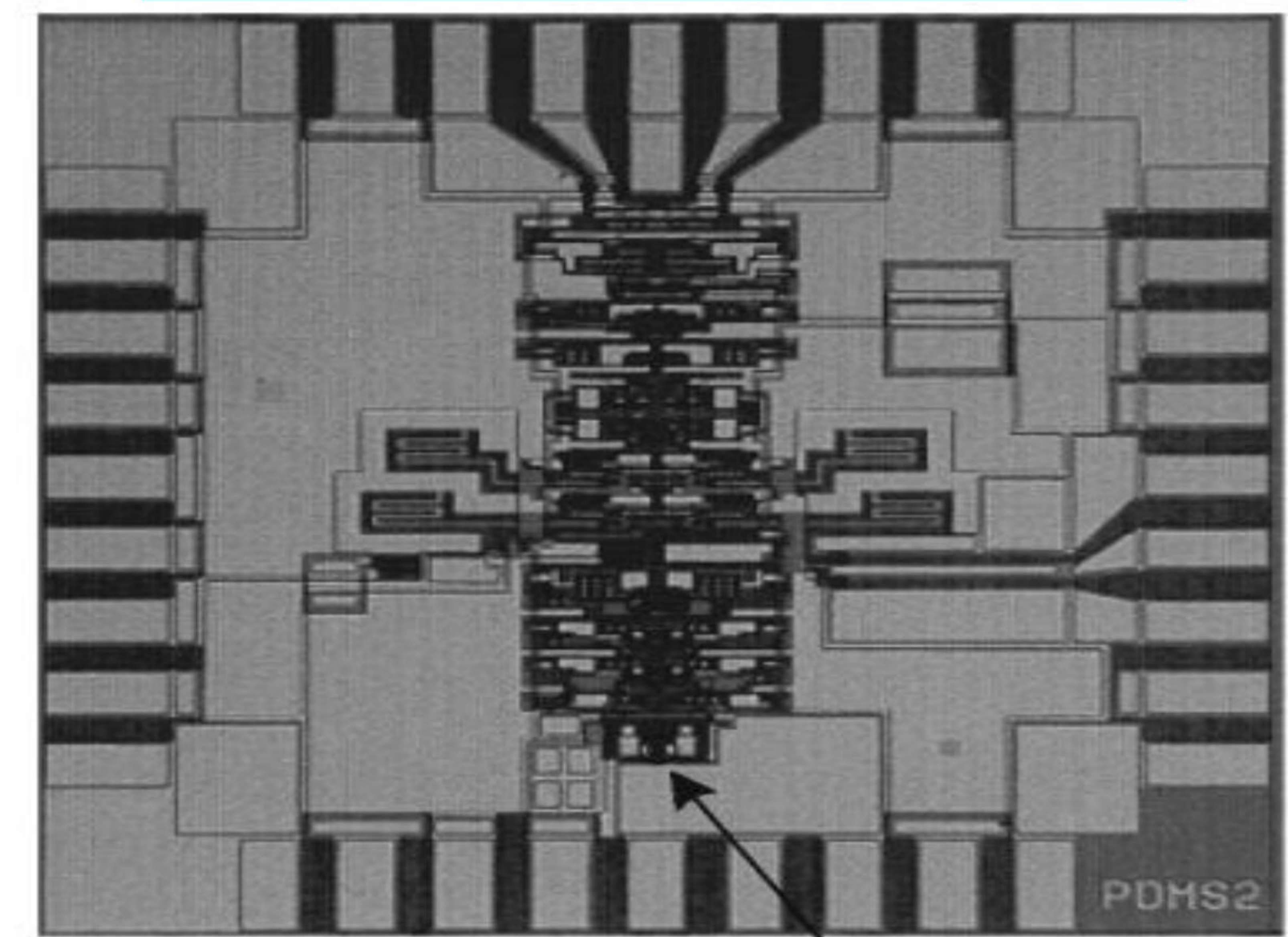
太赫兹无线通信技术以其超高速率、超高带宽、动态连接、灵活可控等特征优势，成为一种潜在的数据中心组网解决方案，可以缓解数据中心长期存在的流量拥塞热点问题，减少部署和维护光缆所花费的时间、精力和成本等。随着6G网络的启动，对太赫兹技术必定起到积极的推动作用，太赫兹相关器件（辐射源、检测器、放大器、低噪放、调制/解调器、混频器等）将会从低性能、高成本到高性能、低成本、高集成度的方向快速发展，这也使得太赫兹无线通信技术在数据中心的应用成为了可能。



目标



InP HEMT与TUC-PD光电集成芯片



UTC-PD

[612/1]

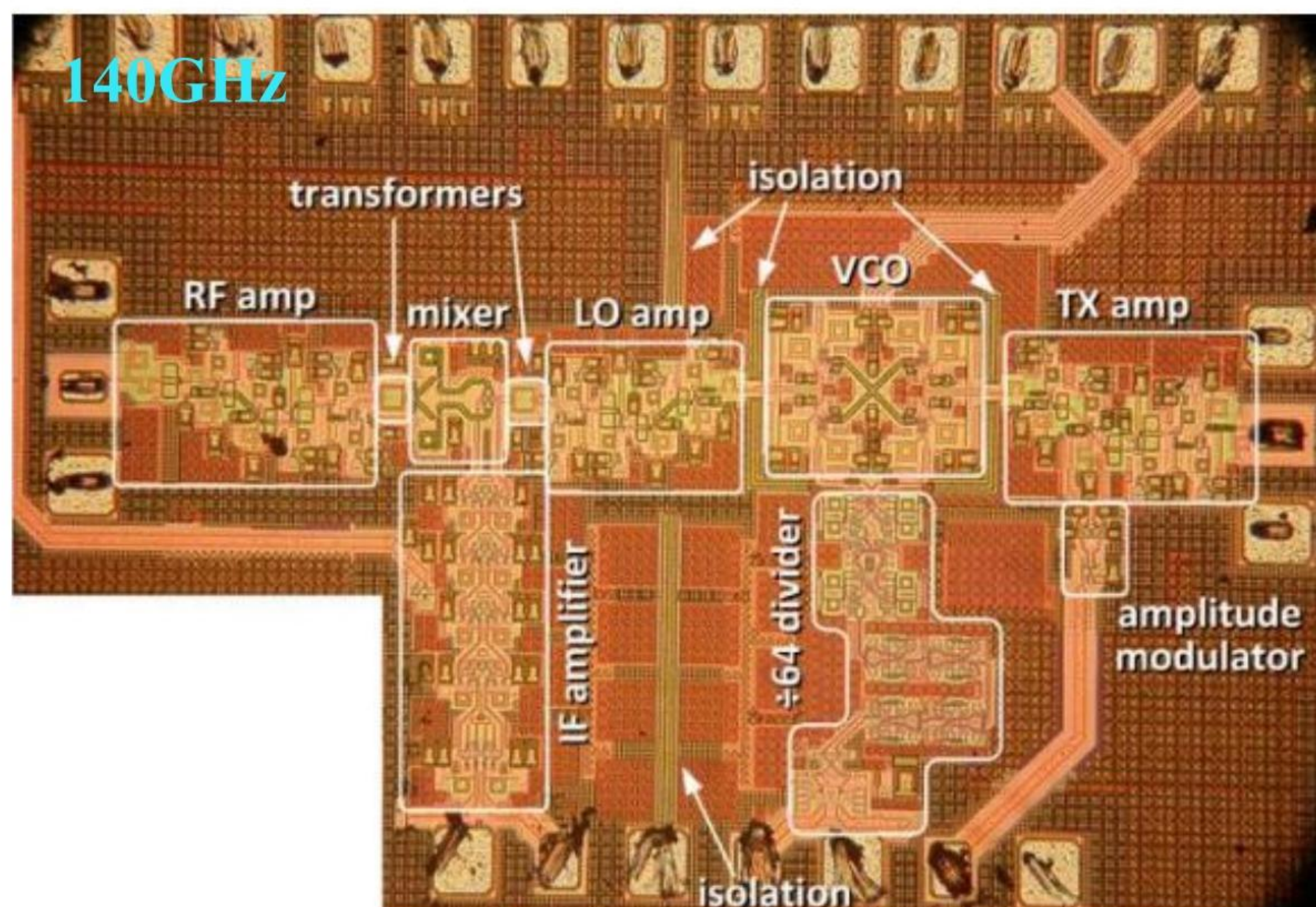
Shimizu N, Murata K, Hirano A, et al. 40Gbit/s monolithic digital OEIC composed of untravelling-carrier photodiode and InP HEMTs[J]. Electronics Letters, 2000, 36(14): 1.



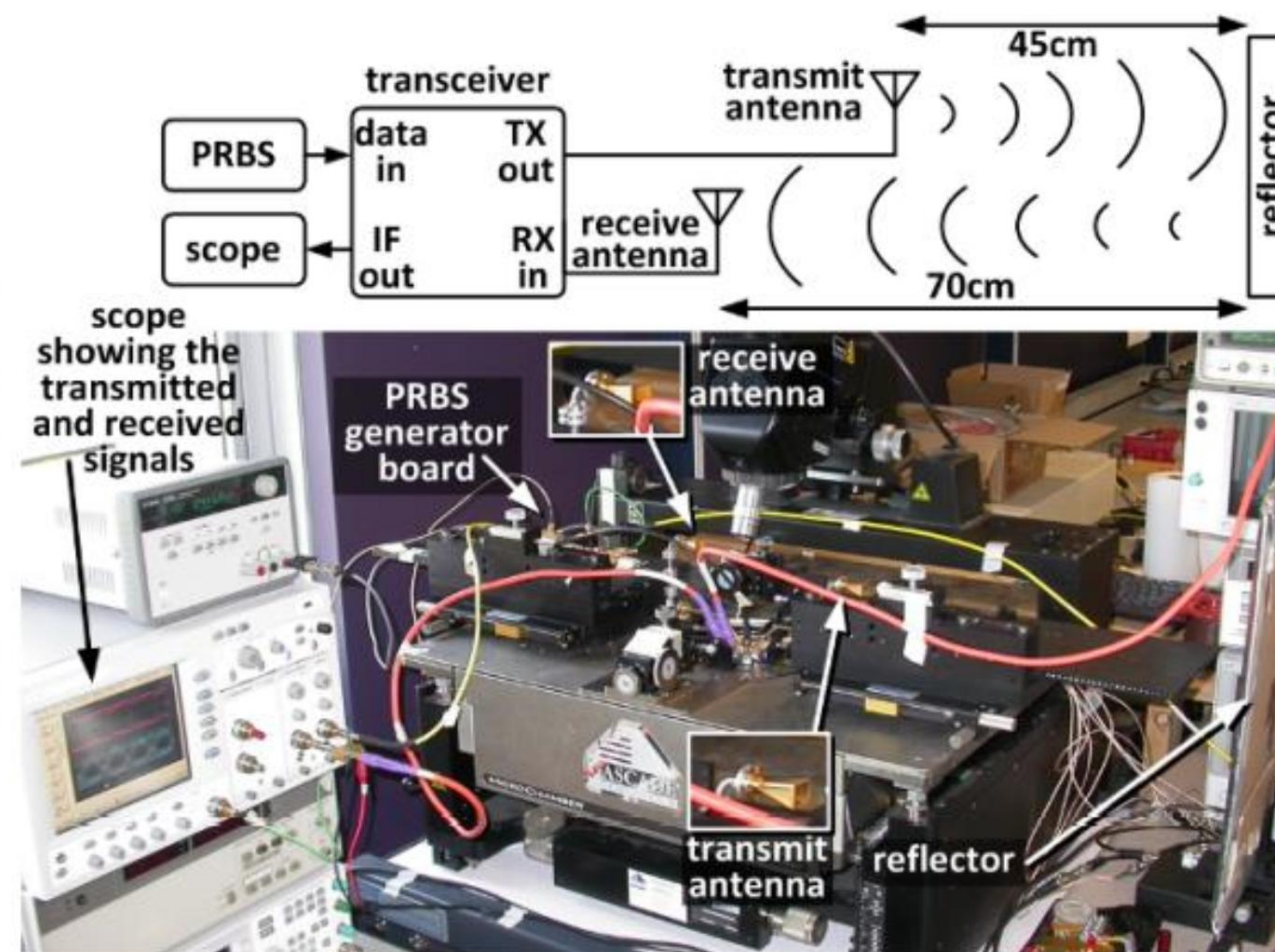
3. 数据中心无线通信技术

2008年，加拿大多伦多大学基于SiGe HBT MMIC技术的165GHz / 170GHz Transceiver和基于SiGe BiCMOS MMIC技术的0.14 THz Transceiver，在单芯片上集成了振荡器、混频器、放大器、ASK调制器和64静态分频器等组件，构成完整的射频信道，实现了数米距离内的4 Gbps无线通信。

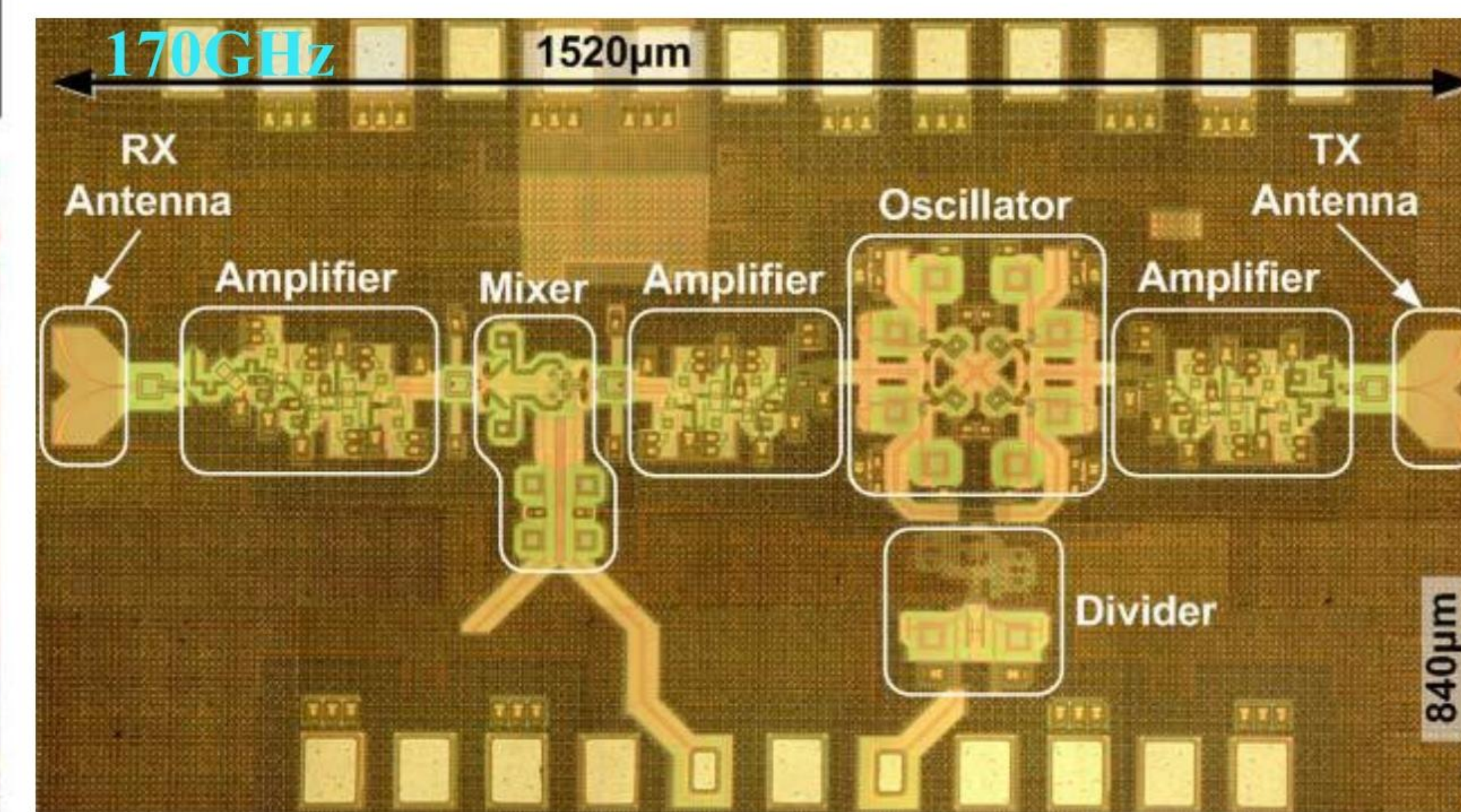
140 GHz 片上集成收发芯片



Laskin E, Tang K W, Yau K H K, et al.
170-GHz transceiver with on-chip antennas in SiGe technology[C]. 2008 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. IEEE, 2008: 637-640.



170 GHz 片上集成收发芯片

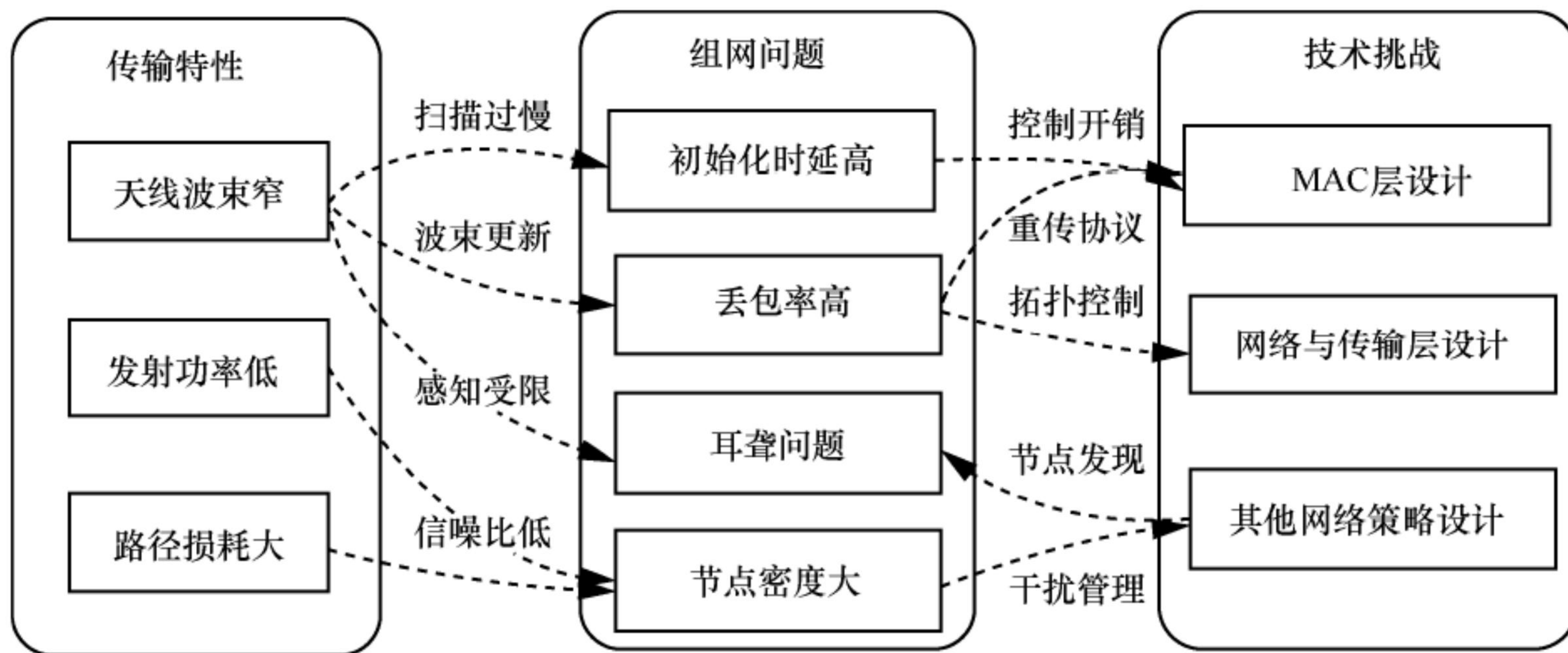


Laskin E, Chevalier P, Sautreuil B, et al.
A 140-GHz double-sideband transceiver with amplitude and frequency modulation operating over a few meters[C]. 2009 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. IEEE, 2009: 178-181.



3. 数据中心无线通信技术

目前，太赫兹通信系统实现的重点在于核心器件研制、关键技术研发和原型系统验证，如**太赫兹收发机、大规模天线集成、超宽带信号采集、超高速基带信号处理、极窄波束管理、定向组网和通信感知一体化**等。同时，由于超高频、超宽带特性，导致太赫兹信道与器件特性改变，进而在太赫兹核心器件、信道建模以及关键技术等方面仍有诸多挑战亟待突破。



太赫兹传输特性、组网问题、技术挑战关系





无锡芯光互连技术研究院
WUXI Institute of Interconnect Technology

THANKS !