



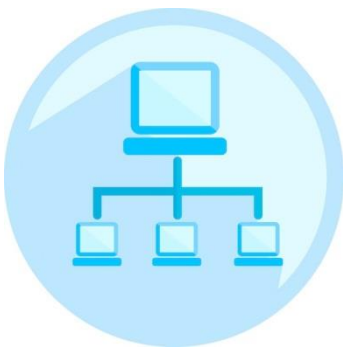
# 计算机网络



顾 军

计算机学院

[jgu@cumt.edu.cn](mailto:jgu@cumt.edu.cn)





## 专题2：信号如何在计算机网络中流动



- 应用层(application layer)
- 运输层(transport layer)
- 网络层(network layer)
- 数据链路层(data link layer)
- 物理层(physical layer)





## Q16: xDSL宽带接入技术?

- xDSL 技术就是用数字技术对现有的模拟电话用户线进行改造, 使它能够承载宽带业务。
- 标准模拟电话信号的频带被限制在 300~3400 Hz 的范围内, 但用户线本身实际可通过的信号频率仍然超过 1 MHz。
- xDSL 技术就把 0~4 kHz 低端频谱留给传统电话使用, 而把原来没有被利用的高端频谱留给用户上网使用。
- DSL 就是数字用户线(Digital Subscriber Line)的缩写。而 DSL 的前缀 x 则表示在数字用户线上实现的不同宽带方案。





# xDSL的几种类型

- ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line): 非对称数字用户线
- HDSL (High speed DSL): 高速数字用户线
- SDSL (Single-line DSL): 1 对线的数字用户线
- VDSL (Very high speed DSL): 甚高速数字用户线
- DSL : ISDN 用户线。
- RADSL (Rate-Adaptive DSL): 速率自适应 DSL, 是 ADSL 的一个子集, 可自动调节线路速率) 。





# ADSL 的特点

- 上行和下行带宽做成不对称的。
- 上行指从用户到 **ISP**，而下行指从 **ISP** 到用户。
- **ADSL** 在用户线（铜线）的两端各安装一个 **ADSL** 调制解调器。
- 我国目前采用的方案是离散多音调 **DMT** (Discrete Multi-Tone) 调制技术。这里的“多音调”就是“多载波”或“多子信道”的意思。





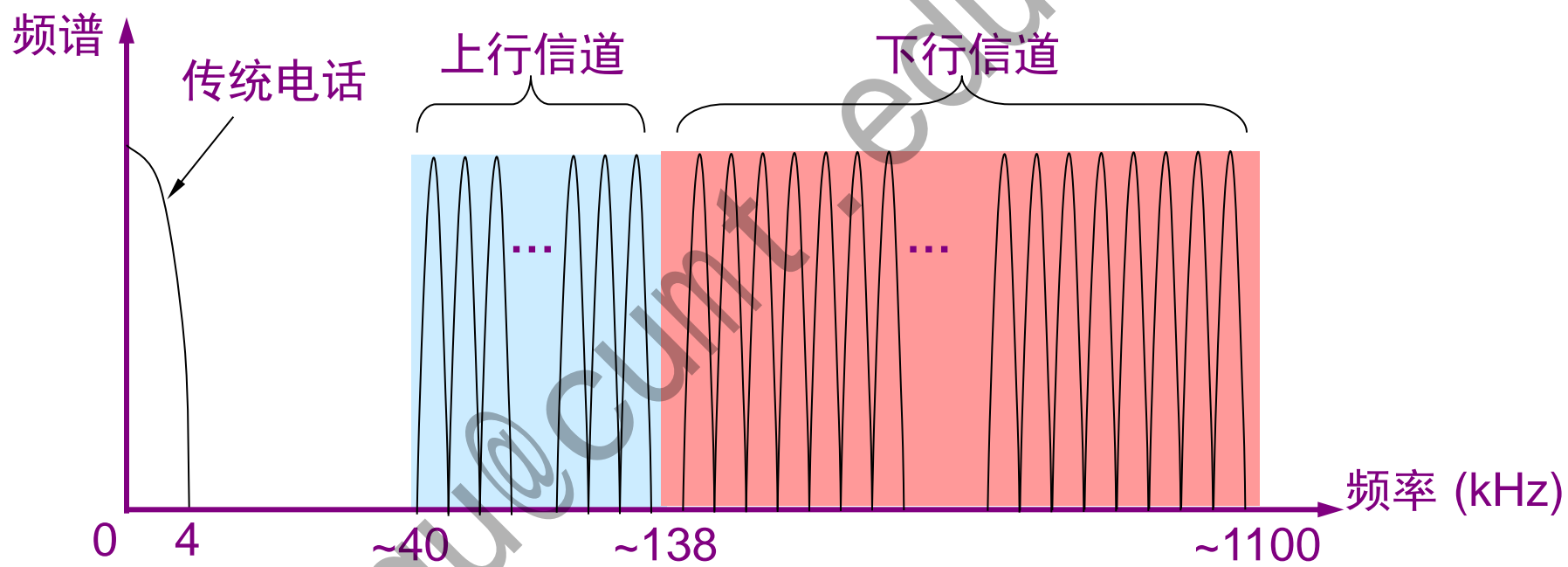
# DMT 技术

- DMT 调制技术采用频分复用的方法，把 40 kHz 以上一直到 1.1 MHz 的高端频谱划分为许多的子信道，其中 25 个子信道用于上行信道，而 249 个子信道用于下行信道。
- 每个子信道占据 4 kHz 带宽（严格讲是 4.3125 kHz），并使用不同的载波（即不同的音调）进行数字调制。这种做法相当于在一对用户线上使用许多小的调制解调器并行地传送数据。





# DMT 技术的频谱分布





# ADSL 的数据率

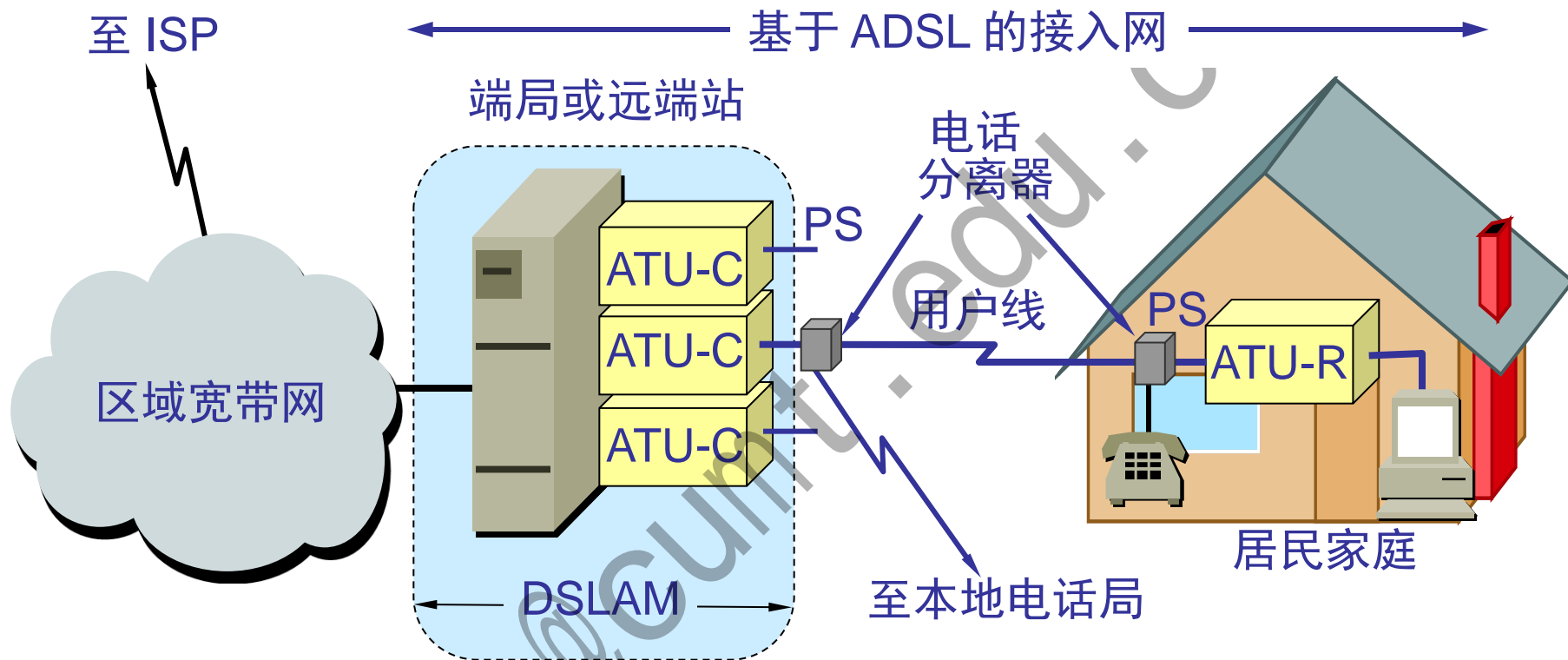
- 由于用户线的具体条件往往相差很大（距离、线径、受到相邻用户线的干扰程度等都不同），因此 **ADSL** 采用自适应调制技术使用户线能够传送尽可能高的数据率。
- 当 **ADSL** 启动时，用户线两端的 **ADSL** 调制解调器就测试可用的频率、各子信道受到的干扰情况，以及在每一个频率上测试信号的传输质量。
- **ADSL** 不能保证固定的数据率。对于质量很差的用户线甚至无法开通 **ADSL**。
- 通常下行数据率在 32 kb/s 到 6.4 Mb/s 之间，而上行数据率在 32 kb/s 到 640 kb/s 之间。







# ADSL 的组成



数字用户线接入复用器 DSLAM (DSL Access Multiplexer)  
接入端接单元 ATU (Access Termination Unit)  
ATU-C (C 代表端局 Central Office)  
ATU-R (R 代表远端 Remote)  
电话分离器 PS (POTS Splitter)





# ADSL 的极限传输距离

- **ADSL 的极限传输距离与数据率以及用户线的线径都有很大的关系（用户线越细，信号传输时的衰减就越大），而所能得到的最高数据传输速率与实际的用户线上的信噪比密切相关。**
- **例如，0.5 毫米线径的用户线，传输速率为 1.5 ~ 2.0 Mb/s 时可传送 5.5 公里，但当传输速率提高到 6.1 Mb/s 时，传输距离就缩短为 3.7 公里。**
- **如果把用户线的线径减小到0.4毫米，那么在6.1 Mb/s的传输速率下就只能传送2.7公里**





# ADSL2 (G.992.3 和 G.992.4) ADSL2+ (G.992.5)

- 通过提高调制效率得到了**更高的数据率**。例如，ADSL2 要求至少应支持下行 8 Mb/s、上行 800 kb/s 的速率。而 ADSL2+ 则将频谱范围从 1.1 MHz 扩展至 2.2 MHz，下行速率可达 16 Mb/s（最大传输速率可达 25 Mb/s），而上行速率可达 800 kb/s。
- 采用了**无缝速率自适应技术** SRA (Seamless Rate Adaptation)，可在运营中不中断通信和不产生误码的情况下，自适应地调整数据率。
- 改善了线路质量评测和故障定位功能，这对提高网络的运行维护水平具有非常重要的意义。





## Q17: HFC宽带接入技术?

- 现有的 CATV 网是树形拓扑结构的同轴电缆网络，它采用模拟技术的频分复用对电视节目进行单向传输。
- 光纤同轴混合网HFC (Hybrid Fiber Coax) 网是在目前覆盖面很广的有线电视网 CATV 的基础上开发的一种居民宽带接入网。
- HFC 网需要对 CATV 网进行改造，除可传送 CATV 外，还提供电话、数据和其他宽带交互型业务。





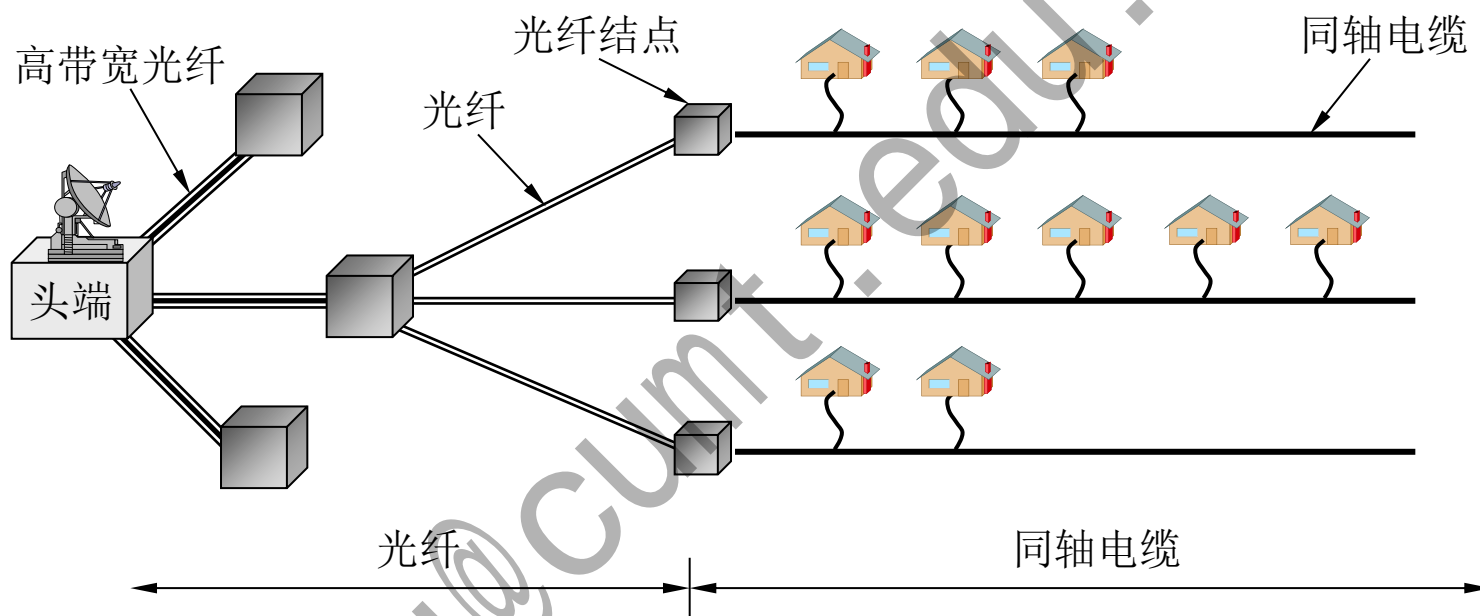
## (1) HFC网的主干线路采用光纤

- HFC 网将原 CATV 网中的同轴电缆主干部分改换为光纤，并使用模拟光纤技术。
- 在模拟光纤中采用光的振幅调制 AM，这比使用数字光纤更为经济。
- 模拟光纤从头端连接到光纤结点(fiber node)，即光分配结点 ODN (Optical Distribution Node)。在光纤结点光信号被转换为电信号。在光纤结点以下就是同轴电缆。



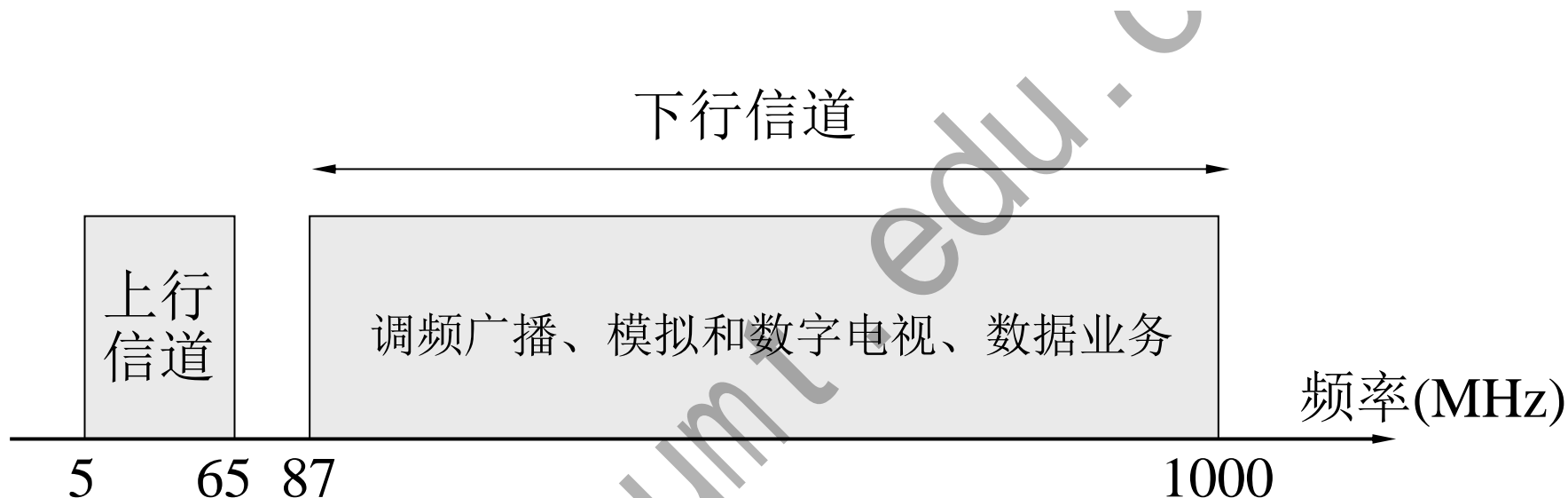


## (2) HFC 网采用结点体系结构





### (3) HFC 网具有比 CATV 网更宽的频谱，且具有双向传输功能





## (4) 每个家庭要安装一个用户接口盒

- 用户接口盒 UIB (User Interface Box) 提供三种连接
  - 使用同轴电缆连接到机顶盒(set-top box), 然后再连接到用户的电视机, 使模拟电视机能够接收数字电视信号。
  - 使用电缆调制解调器(cable modem)可以将HFC网接入到互联网, 以及在上行信道中传送交互数字电视所需的一些信息。
    - 电缆调制解调器可以做成独立设备, 也可以做成内置式的, 安装在电视机的机顶盒里。
  - 计算机可以通过双绞线连接到电缆调制解调器







# 电缆调制解调器(cable modem)

- 电缆调制解调器是为 HFC 网而使用的调制解调器，并且不需要成对使用，而只需安装在用户端。
- 电缆调制解调器比ADSL使用的调制解调器要复杂得多，因为它必须解决共享信道中可能出现的冲突问题。
  - ADSL中，用户计算机所连接的电话用户线是该用户专用的，因此在用户线上所能达到的最高数据速率是确定的，与其他ADSL用户是否在网上无关。
  - HFC中，在同轴电缆这一段用户所享用的最高数据率是不确定的，因为某个用户所能享用的数据率大小取决于这段电缆上现在有多少个用户正在传送数据。





# 电缆调制解调器(cable modem)

- 电缆调制解调器最大的特点就是传输速率高。其下行速率一般在 3~10 Mb/s之间，最高可达 30 Mb/s，而上行速率一般为 0.2~2 Mb/s，最高可达 10 Mb/s。
- 因为电缆调制解调器对同轴电缆是共享式使用，所以，只有在很少用户上网时才可能像有线电视运营商宣传的那样可以达到比ADSL更高的数据率，然而若出现大量用户（如几百个）同时上网，那么每个用户实际的上网速率可能会低到难以忍受的程度。





## Q18: FTTx 宽带接入技术 ?

FTTx（光纤到……）也是一种实现宽带居民接入网的方案。这里字母 x 可代表不同意思。例如：

- 光纤到户 FTTH (Fiber To The Home): 光纤一直铺设到用户家庭可能是居民接入网最后的解决方法。
- 光纤到大楼 FTTB (Fiber To The Building): 光纤进入大楼后就转换为电信号，然后用电缆或双绞线分配到各用户。
- 光纤到路边 FTTC (Fiber To The Curb): 从路边到各用户可使用星形结构双绞线作为传输媒体。
- 光纤到小区 FTTZ (Fiber To The Zone)
- 光纤到楼层 FTTF (Fiber To The Floor)
- 光纤到办公室 FTTO (Fiber To The Office)
- 光纤到桌面 FTTD (Fiber To The Desk)





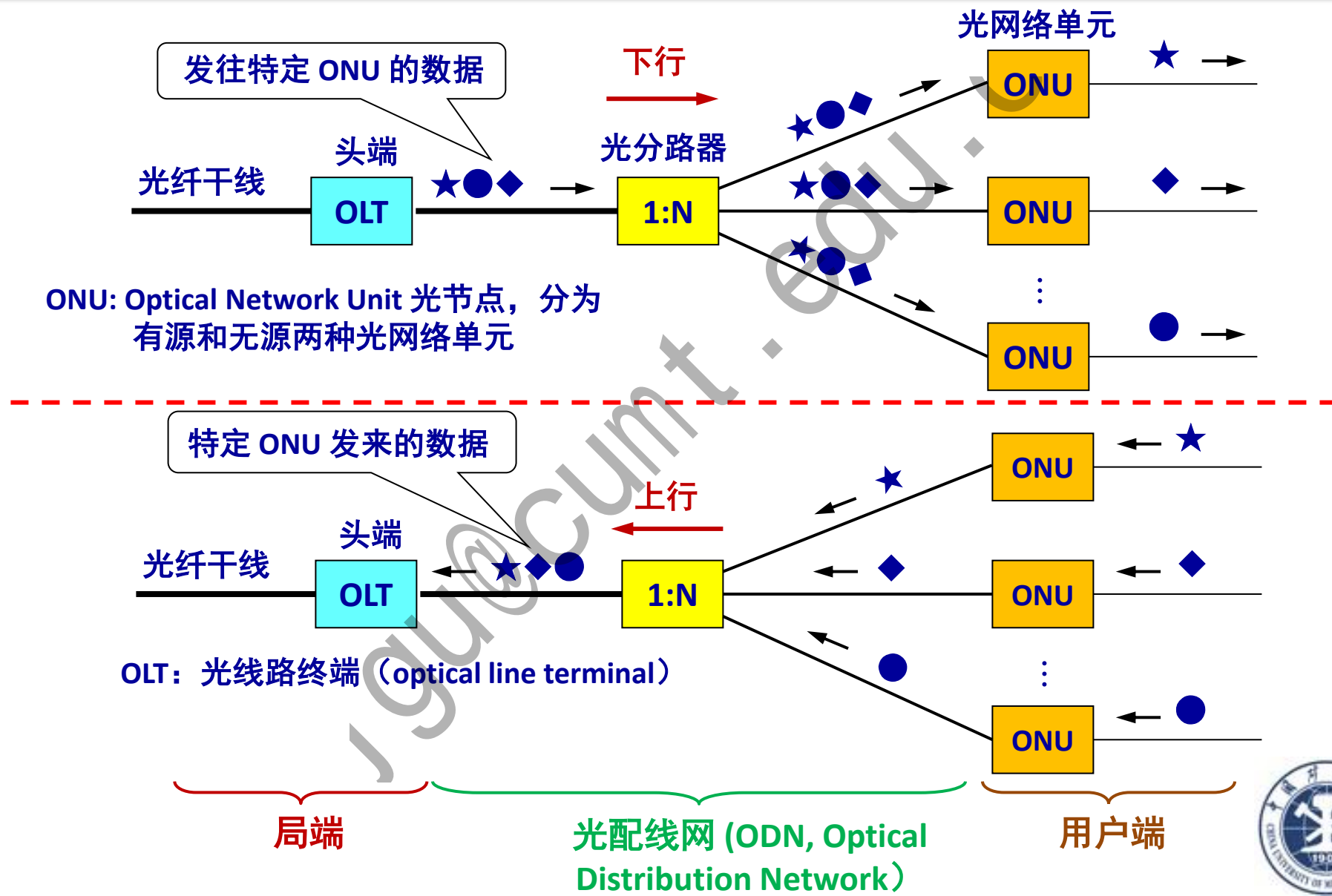
# 无源光网络 PON

- “无源”表明在光配线网中无须配备电源，因此基本上不用维护，其长期运营成本和管理成本都很低。
- 无光源网络是一种点对多点的光纤传输和接入技术，下行采用广播方式、上行采用时分多址方式，可以灵活地组成树形、星型、总线型等拓扑结构，在光分支点只需要暗转一个简单的光分路器即可。
- PON具有节省光缆资源、带宽资源共享、节省机房投资、建网速度快、综合建网成本低等优点。





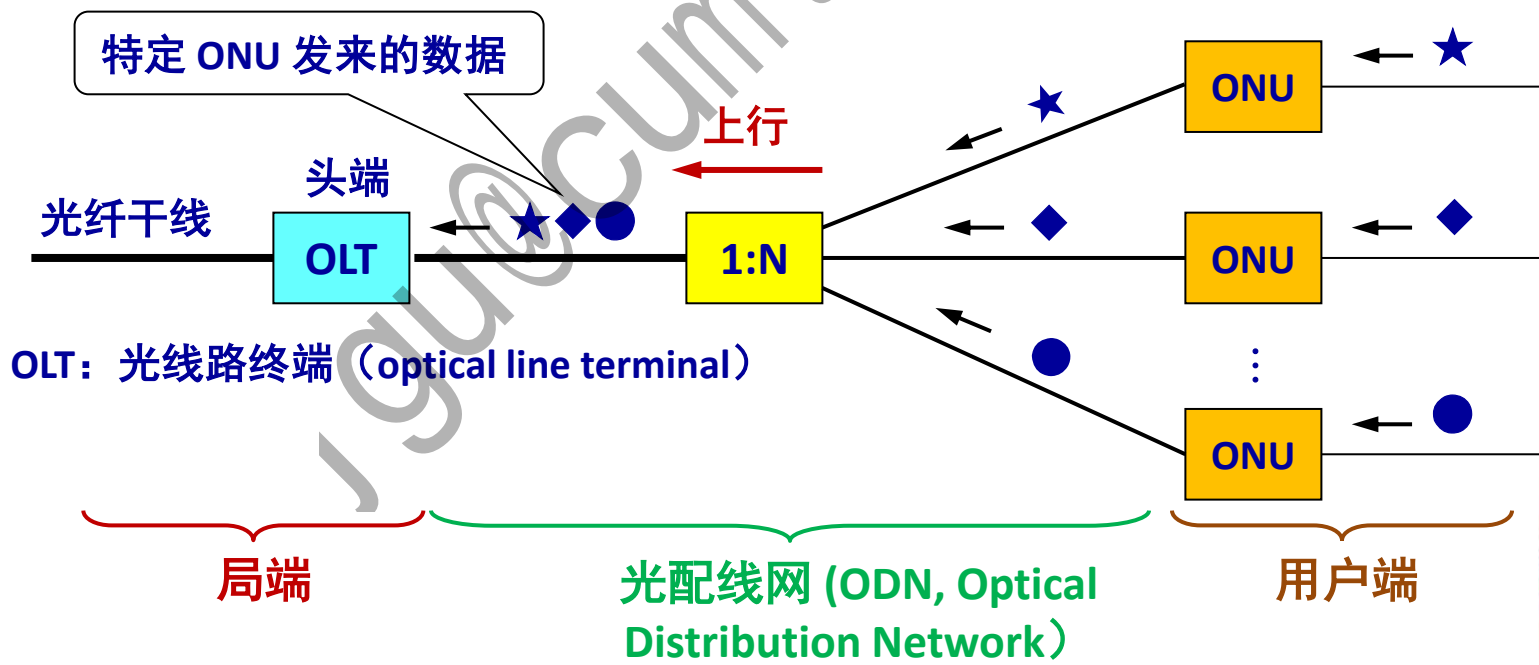
# 无源光网络 PON (Passive Optical Network) 的组成





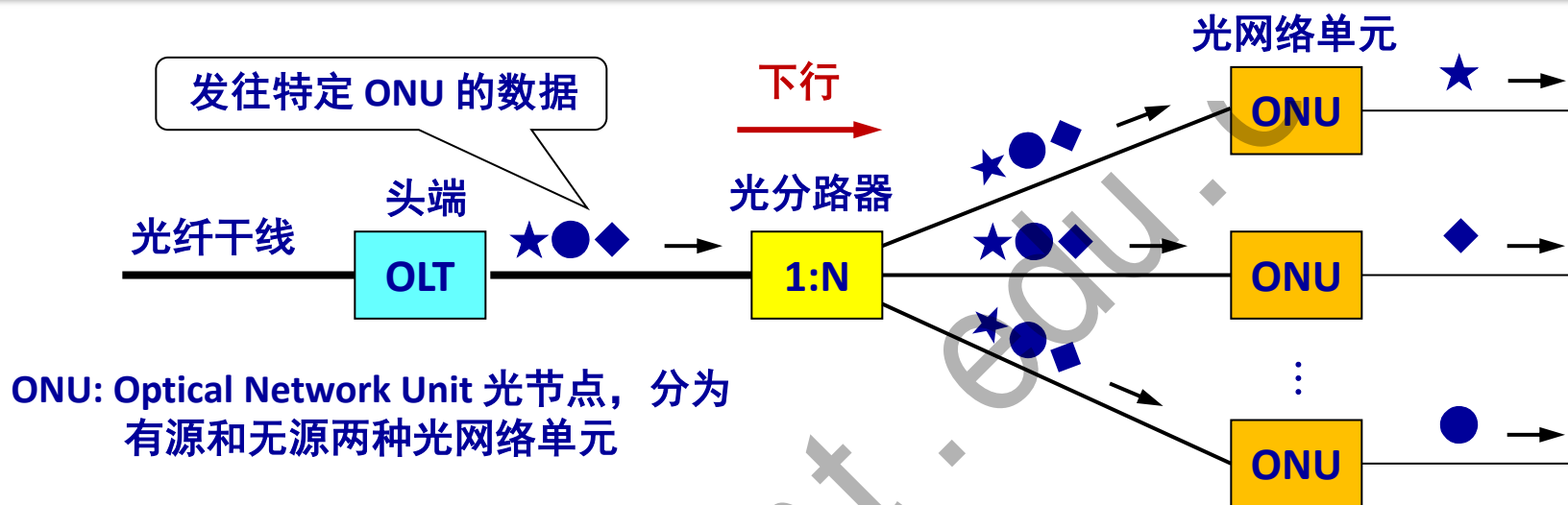
# 无源光网络 PON (Passive Optical Network) 的组成

- 光配线网ODN使用无源的1:N光分路器(splitter)让数十个家庭用户能够共享一根光纤干线





# 无源光网络 PON (Passive Optical Network) 的组成

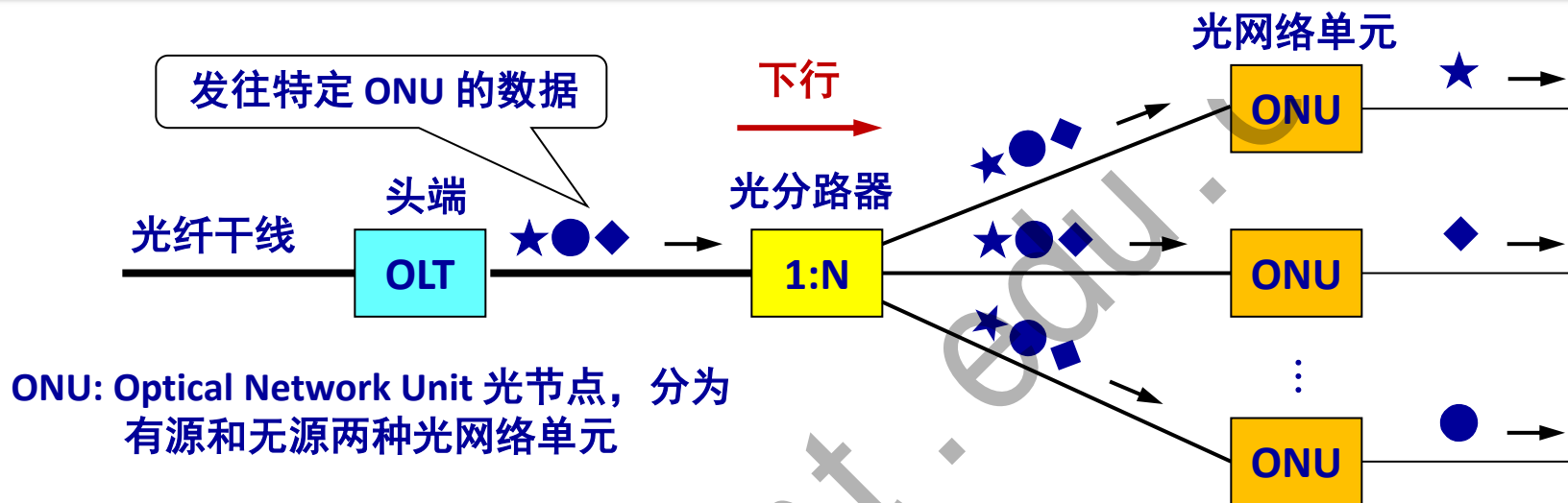


- 光线路终端OLT是连接到光纤干线的终端设备，把收到的下行数据发往无源的1:N光分路器(splitter)，然后用广播方式向所有用户端的光网络单元ONU发送。





# 无源光网络 PON (Passive Optical Network) 的组成



- OLT给各ONU分配适当的光功率，每个ONU根据特有的标识只接收发送给自己的数据，然后转为电信号发往用户家中。如果ONU在用户家中，那就是光纤到户FTTH。

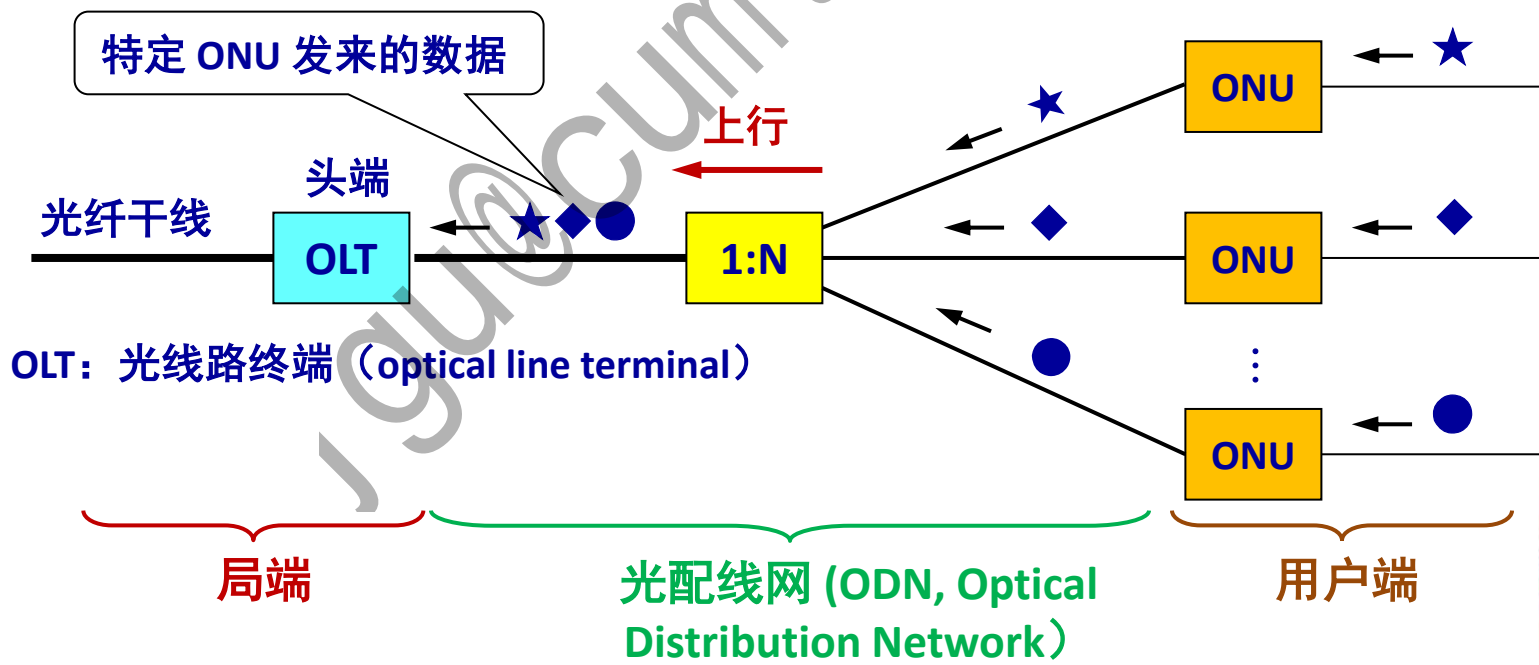






# 无源光网络 PON (Passive Optical Network) 的组成

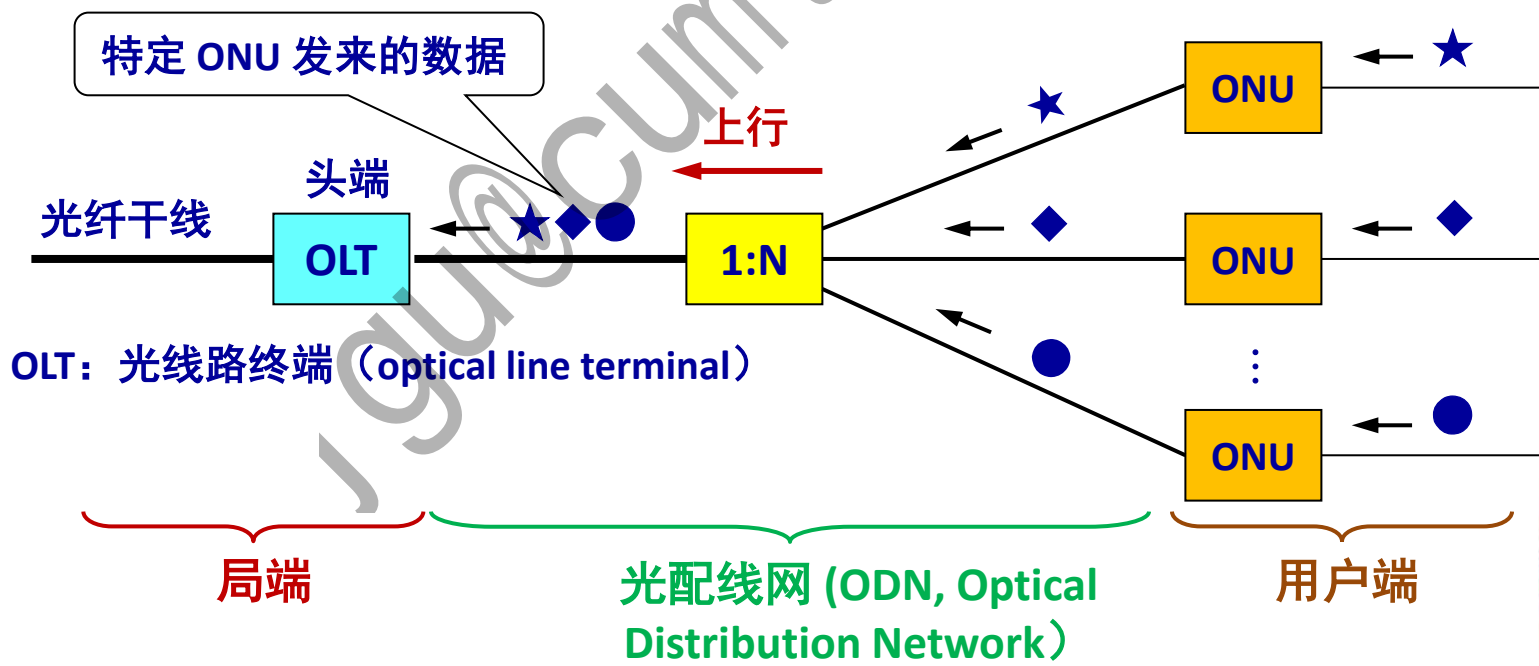
- 当ONU发送上行数据时，先把电信号转换为光信号，光分路器把各ONU发来的上行数据汇总后，以TDMA方式发往OLT，而发送时间和长度都由OLT集中控制，以便有序地共享光纤主干。





# 无源光网络 PON (Passive Optical Network) 的组成

- 光配线网采用波分复用，上行和下行分别使用不同的波长。





# 无源光网络 PON的种类

PON的种类很多，最流行的有以下两种。

- 以太网无源光网络EPON(Ethernet PON)，2004年月形成了IEEE的标准802.3ah。在链路层使用以太网协议，利用PON的拓扑结构实现以太网的接入，与现有以太网的兼容性好，并且成本低，扩展性强，管理方便。
- 吉比特无源光网络GPON(Gigabit PON)，其标准是ITU在2003年1月批准的ITU-TG.984，采用通用封装方法GEM(Generic Encapsulation Method)，可承载多业务，对各业务类型都能提供服务质量保证。





## Q19: 5G移动通信技术 ?



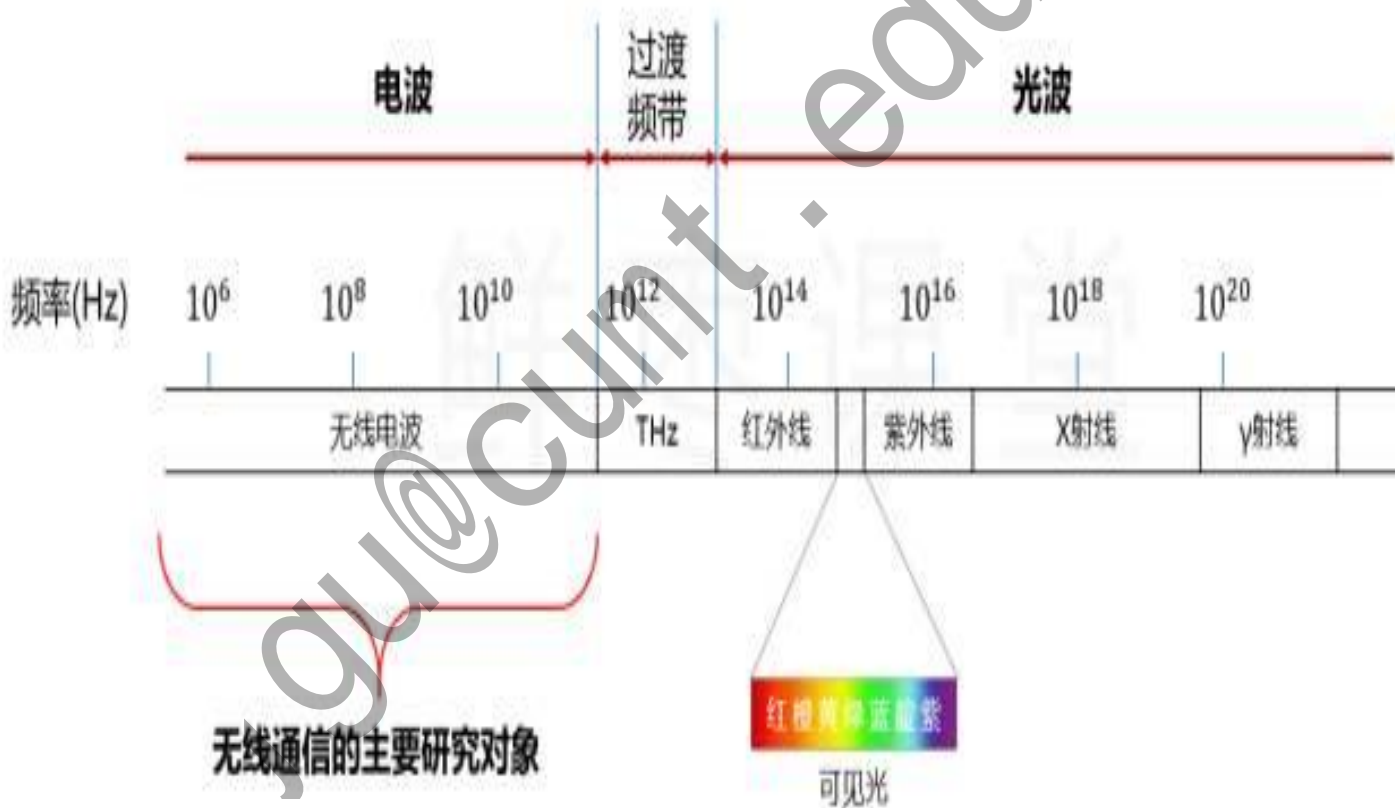
在有线介质上传播数据，速率可以达到很高的数值；而空中传播这部分，才是移动通信的瓶颈所在。





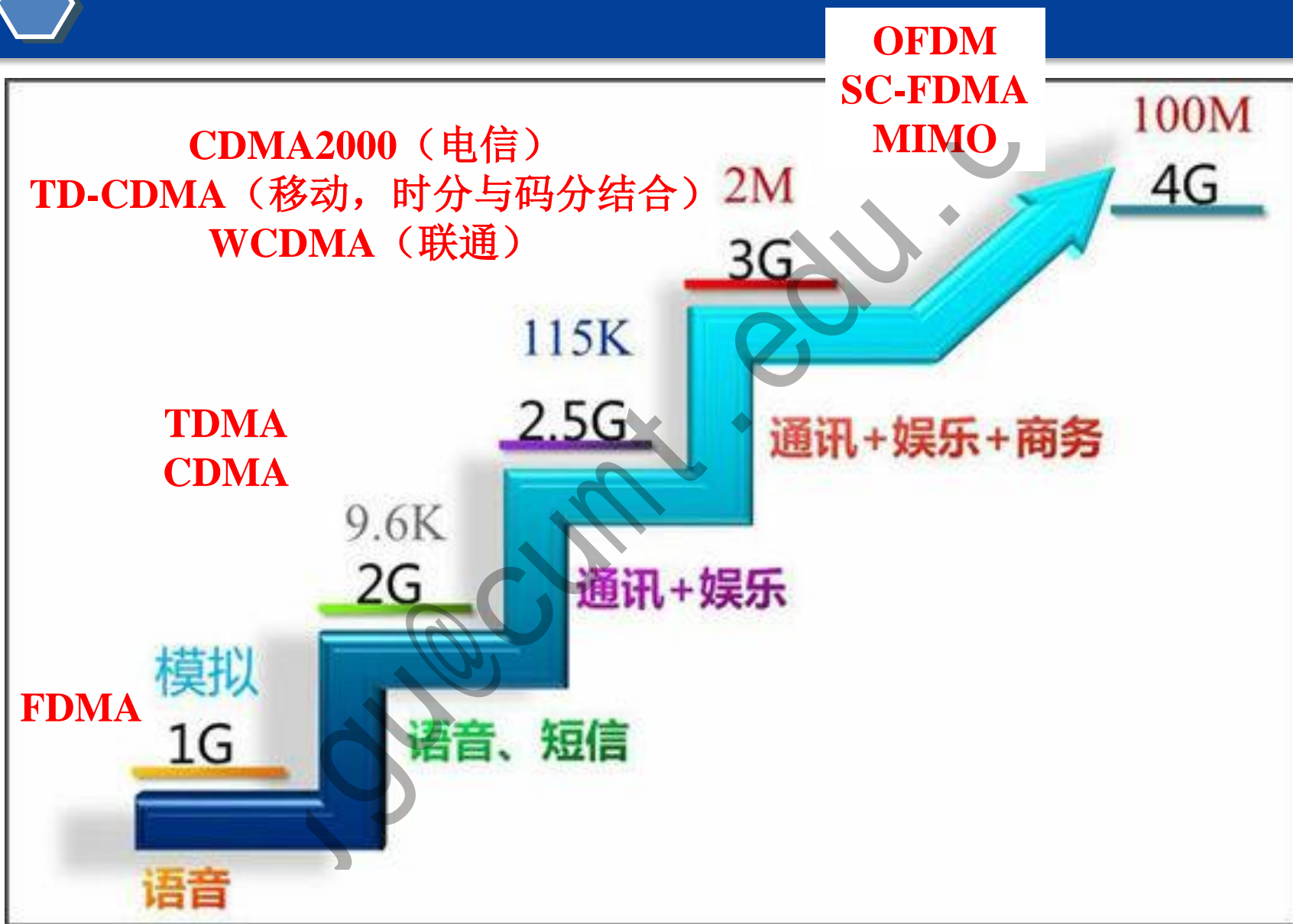
# 电磁波频谱

无线通信就是利用电磁波进行通信，电磁波的功能特性，是由它的频率决定的。不同频率的电磁波，有不同的属性特点，从而有不同的用途。





# 1G-2G-3G-4G的发展





2G

3G

4G

宽带码分多址  
(Wideband CDMA)

LTE-频分双工  
(FD Duplex)



全球移动通信系统  
(Global System for  
Mobile Communications)

GSM

WCDMA

TD-SCDMA

LTE-FDD/LTE-FDD-Advanced

TD-LTE/TD-LTE-Advanced

时分-同步码分多址

TD-Synchronous CDMA

分时长长期演进(TD Long Term Evolution)

LTE-TDD(频分双工)



CDMA

CDMA2000

全球微波互联接入  
(Worldwide Interoperability  
for Microwave Access)

TD-LTE关键技术(OFDM和MIMO)



WiMAX

WiMAX2/WiMAX Advanced



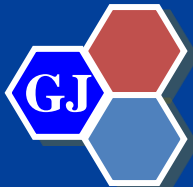
随着1G、2G、3G、4G的发展，使用的电波频率是越来越高的。

- ◆ 频率越高，能使用的频率资源越丰富。
- ◆ 频率资源越丰富，能实现的传输速率就越高。
- ◆ 更高的频率→更多的资源→更快的速度

频率资源就像车厢，越高的频率，  
车厢越多，相同时间内能装载的  
信息就越多。







目前全球主流的4G LTE技术标准，属于特高频和超高频，我们国家主要使用超高频。

我国 LTE 频谱划分

归属方	TDD		FDD		合计
	频谱	频谱资源	频谱	频谱资源	
中国移动	1880-1900MHz	20M			130M
	2320-2370MHz	50M			
	2575-2635MHz	60M			
中国联通	2300-2320MHz	20M	1955-1980MHz	25M	90M
	2555-2575MHz	20M	2145-2170MHz	25M	
中国电信	2370-2390MHz	20M	1755-1785MHz	30M	100M
	2635-2655MHz	20M	1850-1880MHz	30M	

资料来源：工信部、招商证券

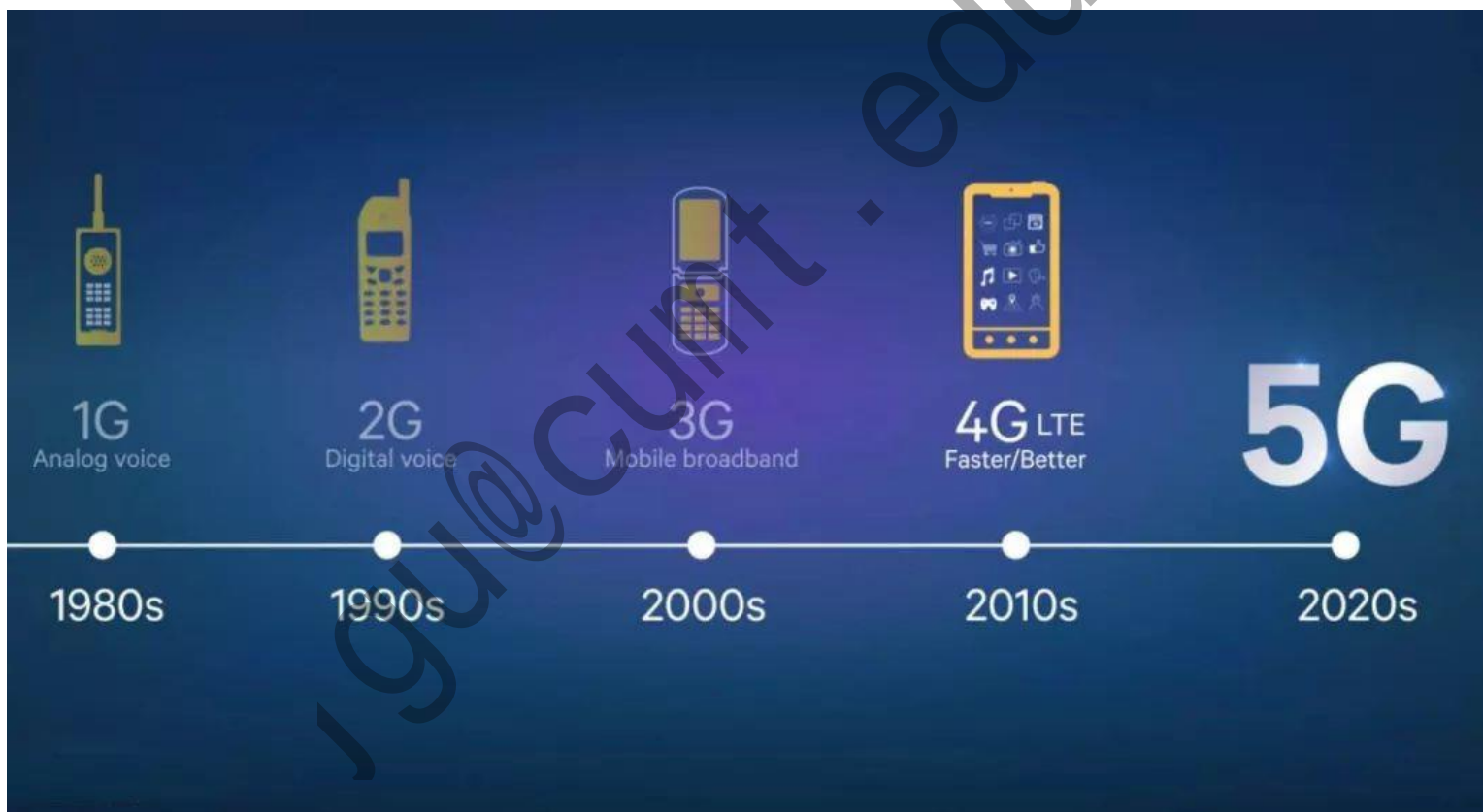
频率越低，网络建设就越省钱，竞争起来就越有利。因此，电信、移动、联通为了低频段而争得头破血流。

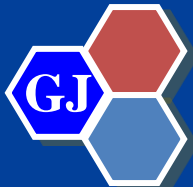




# 5G时代的到来

- 5G将实现随时、随地、万物互联，主要特点是波长为毫米级，超宽带，超高速，超低延时。





# 5G通信使用毫米波

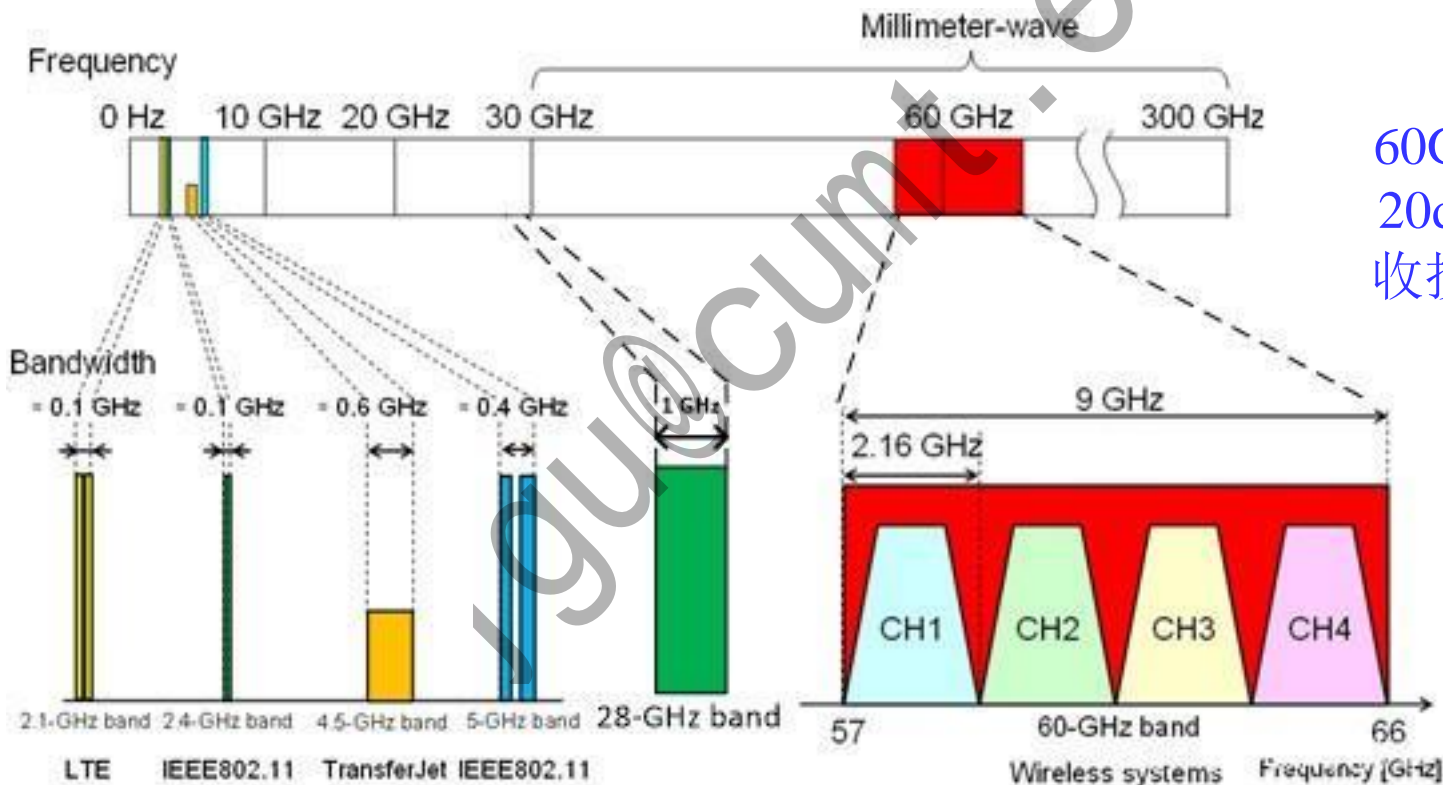
名称	符号	频率	波段	波长	主要用途
甚低频	VLF	3-30KHz	超长波	1000Km-100Km	海岸潜艇通信; 远距离通信; 超远距离导航
低频	LF	30-300KHz	长波	10Km-1Km	越洋通信; 中距离通信; 地下岩层通信; 远距离导航
中频	MF	0.3-3MHz	中波	1Km-100m	船用通信; 业余无线电通信; 移动通信; 中距离导航
高频	HF	3-30MHz	短波	100m-10m	远距离短波通信; 国际定点通信; 移动通信
甚高频	VHF	30-300MHz	米波	10m-1m	电离层散射; 流星余迹通信; 人造电离层通信; 对空间飞行体通信; 移动通信
特高频	UHF	0.3-3GHz	分米波	1m-0.1m	小容量微波中继通信; 对流层散射通信; 中容量微波通信; 移动通信
超高频	SHF	3-30GHz	厘米波	10cm-1cm	大容量微波中继通信; 大容量微波中继通信; 移动通信; 卫星通信; 国际海事卫星通信
极高频	EHF	30-300GHz	毫米波	10mm-1mm	再入大气层时的通信; 波导通信





# 毫米波的定义和频段

- 毫米波，波长在1到10毫米之间的电磁波，通常对应于30GHz至300GHz之间的无线电频谱。
- 美国联邦通信委员会在2015年规划了28 GHz、37 GHz、39 GHz 和 64-71 GHz四个适合长距离通讯的5G毫米波推荐频段。



60GHz必须承受约20dB/km的氧气吸收损耗，信号损耗较大。





# 5G使用的频率范围

频率范围名称	对应的频率范围
FR1	450 MHz - 6000 MHz
FR2	24250 MHz - 52600 MHz

国际上主要使用28GHz进行试验

$$c = \lambda \nu$$

$$\text{波长} = \frac{\text{光速}}{\text{频率}} = \frac{300,000,000\text{m/s}}{28,000,000,000\text{Hz}} \approx 10.7 \text{ mm (毫米)}$$

毫米波







# 毫米波的优势

- 毫米波由于其频率高、波长短，具有如下特点：
  - ▣ 频谱宽，配合各种多址复用技术的使用可以极大提升信道容量，适用于高速多媒体传输业务；
  - ▣ 可靠性高，较高的频率使其受干扰很少，能提供稳定的传输信道；
  - ▣ 方向性好，毫米波受空气中各种悬浮颗粒物的吸收较大，使得传输波束较窄，增大了窃听难度，适合短距离点对点通信；
  - ▣ 波长极短，所需的天线尺寸很小，易于在较小的空间内集成大规模天线阵。

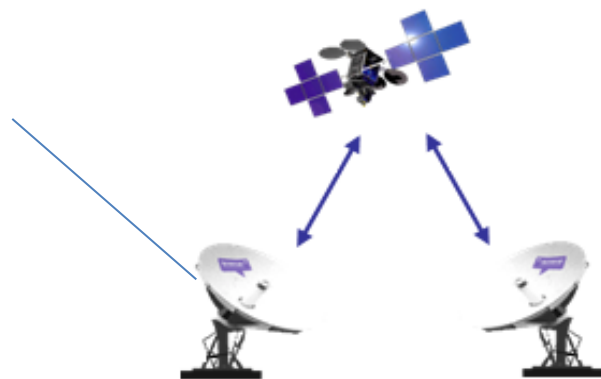




# 极高频带来的问题

- 频率越高，波长越短，越趋近于直线传播，导致绕射和穿墙能力(衍射)变差。
  - 例如，激光笔（波长635nm左右），射出的光是直的，挡住了就过不去了。
  - 卫星通信和GPS导航（波长1cm左右），如果有遮挡物，就没信号了。

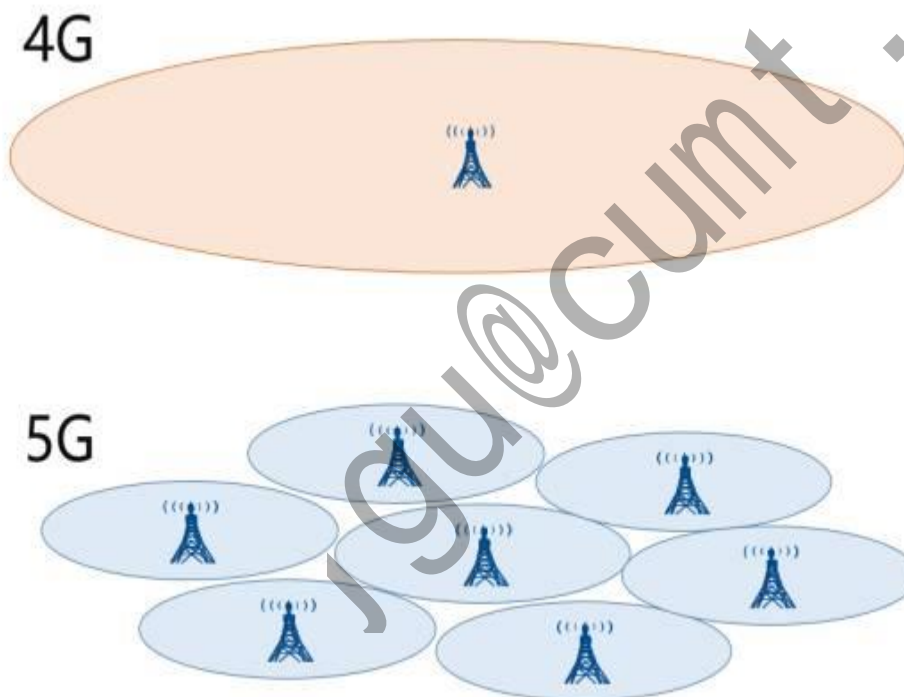
卫星锅必须校准瞄着卫星的方向，否则哪怕稍微歪一点，都会影响信号质量。





# 5G通信需要更多基站

毫米波的主要缺点就是不容易穿过建筑物或者障碍物，并且可以被叶子和雨水吸收，导致在传播介质中的衰减增大，直接传输距离大幅缩短，覆盖能力大幅减弱。



毫米波通常应用在对比较短距离的通信需求方面（2公里内），或者遮蔽障碍物不多，空间小的场景（如家庭或办公室等场合）中。

覆盖同一个区域，需要的5G基站数量，将大大超过4G。







# 宏基站和5G微基站



宏基站（室外常见，建一个覆盖一大片）



微基站（城区和室内，经常能看到）

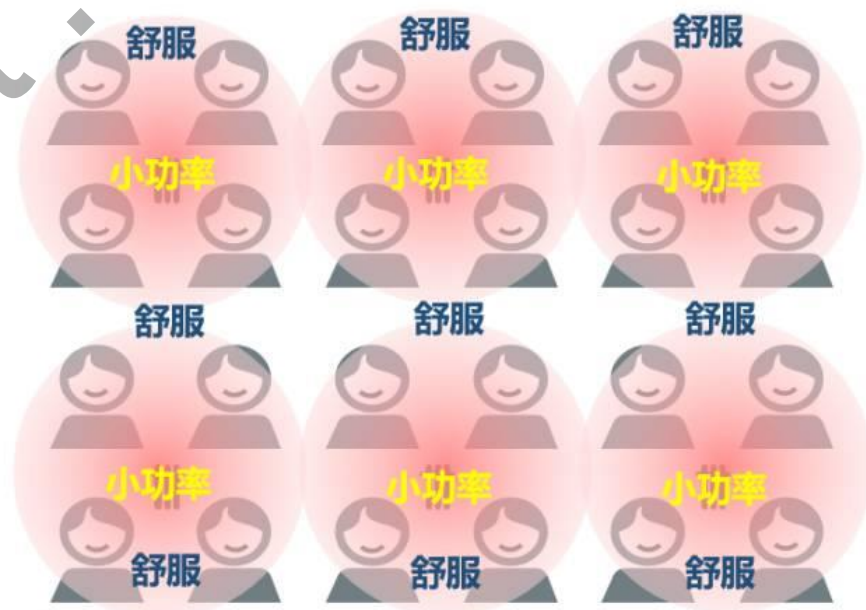




# 基站数量越多，辐射反而越小



大功率方案



小功率方案





# 无线通信中的天线问题

根据天线特性，天线长度应与波长成正比，大约在1/10~1/4之间。

$$\text{天线长度} = \frac{\text{波长}}{10} \sim \frac{\text{波长}}{4}$$

- 美国的超长波电台于1986年建成并投入使用。该电台由两部分组成，一部分位于威斯康星州，另一部分位于密执安州，两地相距258公里，其中天线总长135公里。
- 135公里的概念：一部电台的总机房设在北京的话，天线会从北京延伸到天津还不止。





# 毫米波通信，天线也变成毫米级

- 随着时间变化，手机的通信频率越来越高，波长越来越短，天线也就跟着变短啦！
- 天线完全可以塞进手机的里面，甚至可以塞很多根.....





# 5G通信使用大规模多天线技术

- MIMO就是“多进多出”（Multiple-Input Multiple-Output），多根天线发送，多根天线接收。
- 在LTE时代，已经有MIMO了，但是天线数量并不算多，只能说是初级版的MIMO。到了5G时代，变成了加强版的Massive MIMO（Massive：大规模的，大量的）。







# 波束成形(Beamforming)

- 波束成形是天线技术与数字信号处理技术的结合，目的用于定向信号传输或接收。



波束形成将数据传输到特定设备

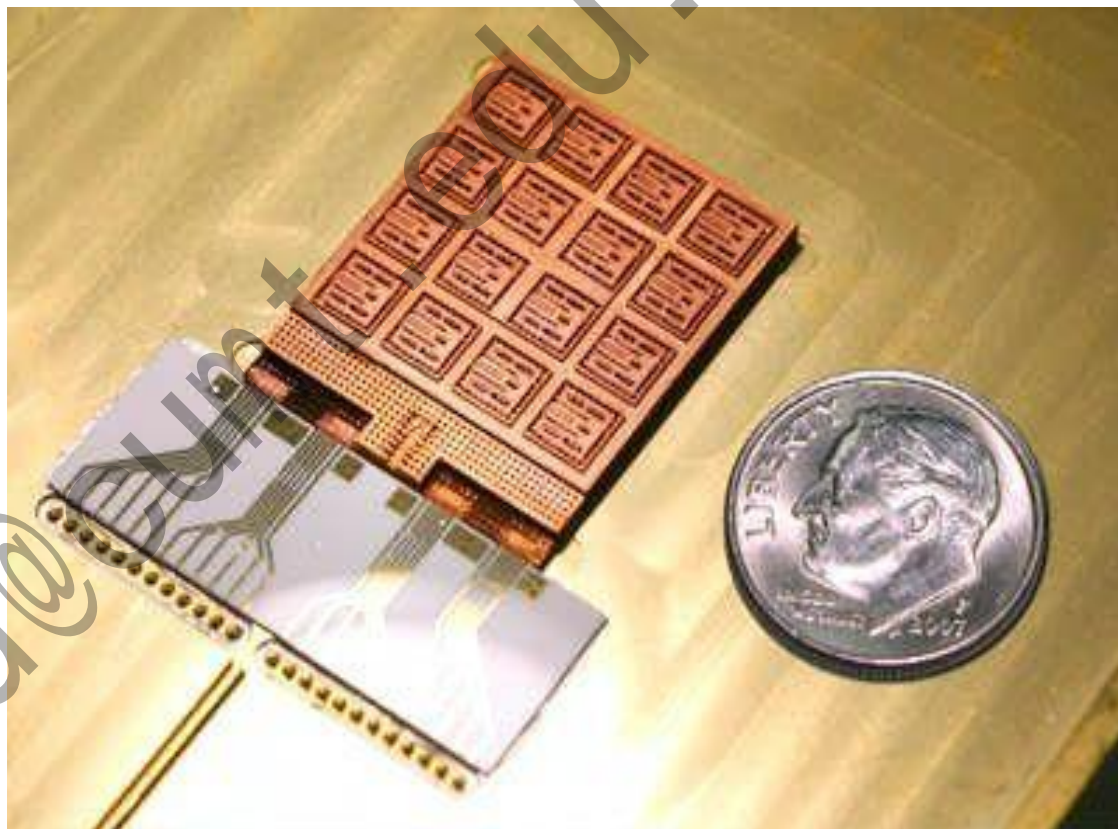




# 波束成形与毫米波是天作之合

- 波束成形可以使信号的能量集中在接收端所在的方向，从而改善频谱利用效率。

波束成形配合毫米波技术可以让通讯系统拥有高带宽并且支持大量用户同时通讯，从而使5G系统如虎添翼。



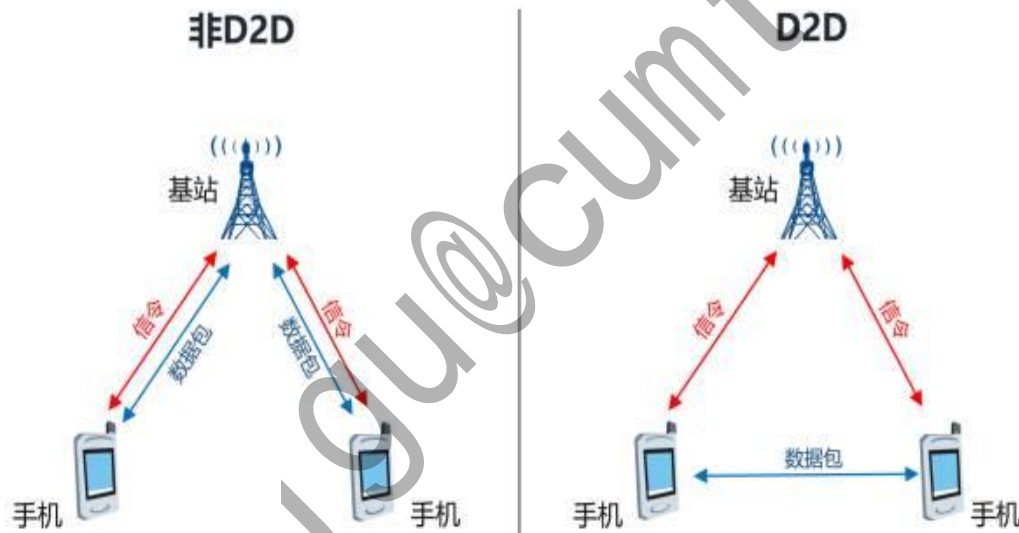
毫米波天线阵列体积很小，可以安装到手机上





# 5G通信支持D2D (Device to Device)

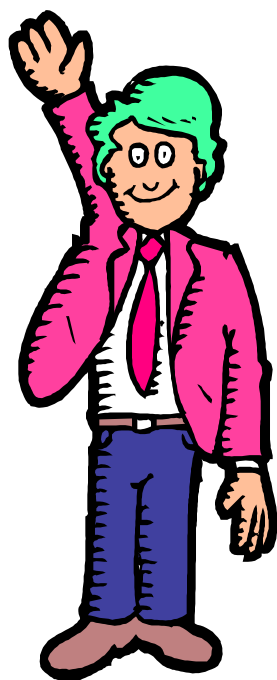
- 目前的移动通信网络中，即使是两个人面对面拨打对方的手机（或手机对传照片），信号都是通过基站进行中转的，包括控制信令和数据包。
- 5G时代，同一基站下的两个用户，如果互相进行通信，他们的数据将不再通过基站转发，而是直接手机到手机。



节约了大量的  
空中资源，也  
减轻了基站的  
压力







**THANK  
YOU!**

