

“垃圾频段”不垃圾

现代人几乎每时每刻都离不开网络。无线上网是大家最喜欢的上网方式，毕竟大家都不想拖根网线。到了一个新的地方，好多人第一件事就是找 WiFi，有免费的最好。

WiFi 是一个产业联盟，推广统筹基于 802.11 的局域无线网络产业。802.11 协议簇是国际电工电子工程学会（IEEE）为无线局域网络制定的标准，大家通常听到的 WiFi 标准有以下几种：

IEEE802.11a，1999 年，54Mbit/s，工作在 5.8Ghz。

IEEE 802.11b，1999 年，11Mbit/s，工作在 2.4Ghz。

IEEE802.11g，2003 年，54Mbit/s，工作在 2.4Ghz。

IEEE 802.11n，2009 年 9 月通过正式标准，WLAN 的传输速率由 802.11a 及 802.11g 提供的 54Mbps、108Mbps，提高到 350Mbps 甚至到 475Mbps。

IEEE 802.11ac，802.11n 之后的版本。工作在 5.8G 频段，理论上可以提供高达每秒 1Gbit（1G=1000M）的数据传输能力。

大家知道空中有很多无线电波每时每刻在传输，大家如何做到互不干扰呢？一种简单的办法就是工作在不同的频率上。对收音机，电视机来讲就是“选台”。WiFi 的频率在 2.4Ghz 和 5.8Ghz 两个主要频段。这两个频段是工业，科研及医疗频段（ISM Band），不需要许可就能够使用，但这样一来，这些频段也就变得拥挤不堪。微波炉，无绳电话，蓝牙，遥控器等等，都在这个 2.4Ghz 频道上。在城市里面一找 WiFi 网，往往同一地点就能看到几十个网络名，大家挤在一起，谁也跑不快，掉线，卡顿也是常事。

要想汽车跑得快，马路就要修得宽。要想信息跑得快，根据香农定律，一定的噪声条件下，频谱带宽决定了通道的容量。

无线频谱可是个稀缺资源，好多国家频谱都是拍卖的，动辄上百亿美元买一段频谱的使用权。除了 WiFi，手机网络，数字电视，卫星通讯，雷达等等，都要占用无线频谱。下图是中国常用频率（450Mhz~5850Mhz）使用情况。上面一段是 450Mhz 到 1850Mhz，下面一段是 1850Mhz 到 5850Mhz。我们可以看到好多被广电，电信，移动占用了，要想找出一段空白的来可不容易。想偷偷用？对不起，频谱警察：无线电管理委员会就来敲你的门了。

国内移动通信频谱分布图:



Figure 1 中国频谱分布

另一方面，用户对速率的要求也越来越高，“吃带宽”的应用也越来越多。视频，大文件，游戏等等都让 2.4GHz 和 5.8GHz 频段不堪重负，从哪里再找到大段的频谱呢？10GHz？20GHz？30GHz？不行！那边军代表发话了，这些频率我们各种雷达早就占上了，国防优先，不能让我们的战机，军舰，导弹受干扰。再说解放军让，美军，苏军不见得肯让啊，有没有这样一个频段，全世界都没有人用？如果可能，全球兼容，那有多好啊！

还真有这么一个频段以前谁都不要，这就是著名的垃圾频段：60GHz.

60GHz 频率非常高，比 2.4GHz 高了 25 倍，比 5.8GHz 高 10 多倍。60GHz 波长在 5 毫米左右，属于毫米波，是短波长的微波。

这个频率为什么叫垃圾频率呢？原来空气中的氧气对这个频率的电磁波有很强的共振吸收作用。大气中 60GHz 的无线电波每传 1 公里，就有 96% 的能量被吸收掉。工作在这个频率上的雷达根本就看不远，这个频率上的通讯设备根本就传不远，所以没有任何实用价值。

Atmospheric Attenuation

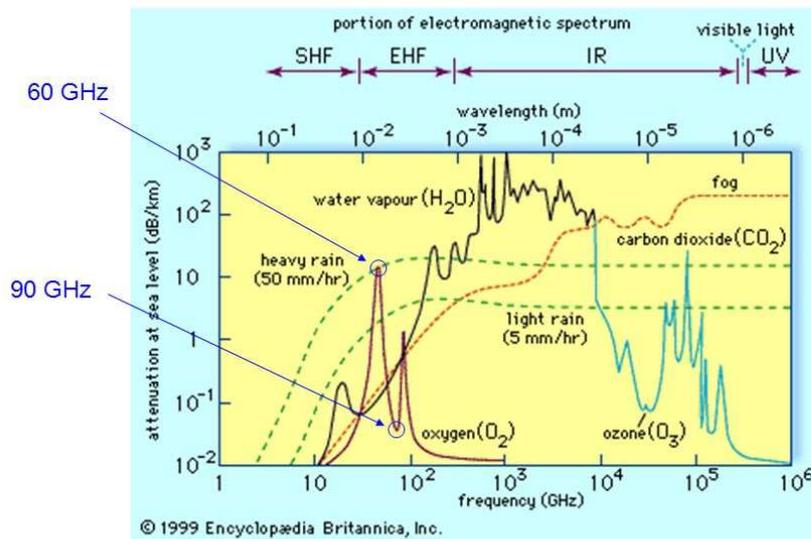


Figure 2 大气对电磁波的衰减

上图标明了大气对各种频率的电磁波的吸收情况。横坐标是频率，从 1Ghz 到 10^6 Ghz，覆盖了从微波到红外线，可见光到紫外线（UV）的频段。纵坐标是海平面上每公里的衰减，从 10^{-2} 也就是 0.01dB 到 10^3 也就是 1000dB，数字越大表明衰减得越厉害。紫色的那条曲线就是氧气吸收曲线。黑色的是水蒸气的吸收曲线。蓝色的是二氧化碳，看到它在红外波段（ 10^5 Ghz）的强吸收了吗？因为二氧化碳吸收大量红外能量，所以我们叫二氧化碳是温室气体。在可见光（ $4.3\sim 7.7\times 10^5$ Ghz）窄窄的那一段频率没有气体对它吸收，所以阳光才能穿过大气层洒满大地，所有动植物也都针对这一频段进化出了不同的器官来利用这一频段。比如植物的叶可以吸收可见光红，蓝能量（反射掉绿色的所以我们看到的叶子就是绿色），动物的眼睛也对可见光频段敏感。

当然，可见光还是可以被雾（fog）遮挡的，上图里那一条红色虚线就是雾的吸收曲线。

在 100Ghz 以下，除了雨（两条绿虚线，分别对应大雨和小雨）可以对电磁波吸收，大部分气体对电磁波都是透明的了，这段也就是目前常用的电磁波频率。但是看到 60Ghz 那里的一个尖峰了吗？这是氧气的吸收峰，大约是每公里信号衰减 14dB。对非专业读者注明一下，dB 是用指数方法标注数字的一种方法。 $14dB=10^{1.4}=25$ ，也就是说每传播一公里后信号会减弱到原来的 1/25。

每公里减弱到原来的 1/25，两公里就是 $1/25*1/25$ ，三公里就是 $1/25*1/25*1/25$ ，信号就减弱到原来的万分之一不到了。

我们身边无处不在的氧气，就像一个厚厚的屏蔽层，让 60Ghz 的电磁波传不远。这也就留下了 60Ghz 这个频段几乎无人去用。

现在其他频段都被占满的情况下，工程师的眼睛不得不重新投向这一垃圾频段。但仔细一看，这个频段居然有大家想象不到的优点。

对于局域网来说，其实我们大多数情况下并不希望信号传得太远。比如大家就不希望家里出现隔壁老王的信号，自己用自家的无线路由器就行了。信号传得远，互相之间干扰的可能性就增大，同时安全性也就容易出问题。一些人买高灵敏度的 WiFi 天线，然后可以接收到很大范围内的 WiFi 信号，还有些厂商专门生产这种“蹭网神器”来上别人的 WiFi。好多人设置 WiFi 密码马马虎虎，还有人根本就不会设密码，这样入侵者在很远的地方就能连上你的网，侵入你的网络。

加密也没有太大作用，再强的加密方法也有其缺陷。WiFi 早期的 WEP 加密方法早就有专业破解软件，后来的 WPA 也不是绝对安全。2.4Ghz 和 5.8Ghz 信号传得太远是一个让人头痛的问题，也许你网络的入侵者远在数公里之外，防不胜防。

回头看 60Ghz 信号，传不远反而成了它的一个显著优点。信号衰减快，对周边的干扰就小，一个小区中共享同样频段的用户就能大大增加。传不远，潜在的入侵者就少，本来入侵者可能在数公里以外，现在只能靠得很近才能连上网络了。

另外波长短的 60Ghz 信号还有一个特点就是穿透性差。一本书，一堵墙就能对它产生很大的衰减，这样你就不用担心隔壁老王家的信号跑到你这边来了。

前面我们讲过 60GHz 信号每公里由于氧气吸收会衰减 25 倍。对于短距离，比如 10 米，是 1000 米的 1%，氧气只吸收 $25/100=0.25$ ，也就是信号只损失了 25%，这一点损失在短距离上可以忽略不计。

所以 60GHz 频段简直就是为局域无线网络量身定做的一个频率，在家庭，办公室等地方非常合适。

我们把这个频段的特点列一列：

- 没人用：正好可以选做国际标准，各国通用。
- 传不远：避免大范围的互相干扰，安全性好。
- 穿不透墙：避免房屋，房间之间干扰。

2007，WiGig 产业联盟就成立了，吸取了其他标准的教训，所有的业界大佬这次不打架了，intel，苹果，微软，高通等等凡是数得上的都加入了这个联盟。当然大自然已经为大家定好了必然要选用的 60GHz 频率，也就避免了选频率，定信号格式等等惯常的争议。



Figure 3 WiGig 联盟标记

WiGig 瞄准的就是下一代局域无线网，和 WiFi 天然重叠。2010 年，WiGig 产业联盟就和已经成熟的 WiFi 产业联盟联合了，后来在 2013 年干脆就合并了（反正 WiFi 产业联盟背后也是这些大佬）。

2012 年，电气电子工程师学会（IEEE）就颁布了 802.11ad 标准作为 60GHz 通讯的协议。看看文章开始我们列的 WiFi 的标准（802.11a，802.11b，802.11g，802.11n，802.11ac），这是一个协议簇，60GHz 就正式加入了 802.11 这个大家庭。

这些年 WiGig 产业联盟也没闲着，和其他的联盟拉了不少关系。比如显示方面的老大：VESA 和 WiGig 制定了无线显示的标准，USB 联盟和 WiGig 制定了 MA USB 标准，这样外设都可以无线互联了。

有没有不按江湖规矩来的独行侠？有一个，就是 WirelessHD，无线高清。由于视频信号需要高带宽，无线显示是最早应用 60GHz 的。SiBeam 公司就最先开发了自己的一套基于 60GHz 的 WirelessHD 标准，在传输视频上有其独到之处。但由于只是针对视频信号，不像 802.11ad 是啥都能传（反正都是 0，1 信号），这个标准用的人比较少。

2011 年 SiBeam 被 Silicon Image 收购了。2015 年 Silicon Image 又被莱迪思（Lattice）公司收购。这个莱迪思公司是可编程门阵列（FPGA）领域的知名公司。2016 年，有中资背景的一个谷桥基金要买莱迪思，但是 2017 年 9 月 14 日被美国总统特朗普以国家安全的理由否决了。不然的话，中国就拥有这个标准的知识产权了。

从现在的形势看，WiGig 一统江湖。

各个国家也给 60GHz 规划了频段，一机走遍全球不是梦，下图就是各国对 60GHz 频段的划分。

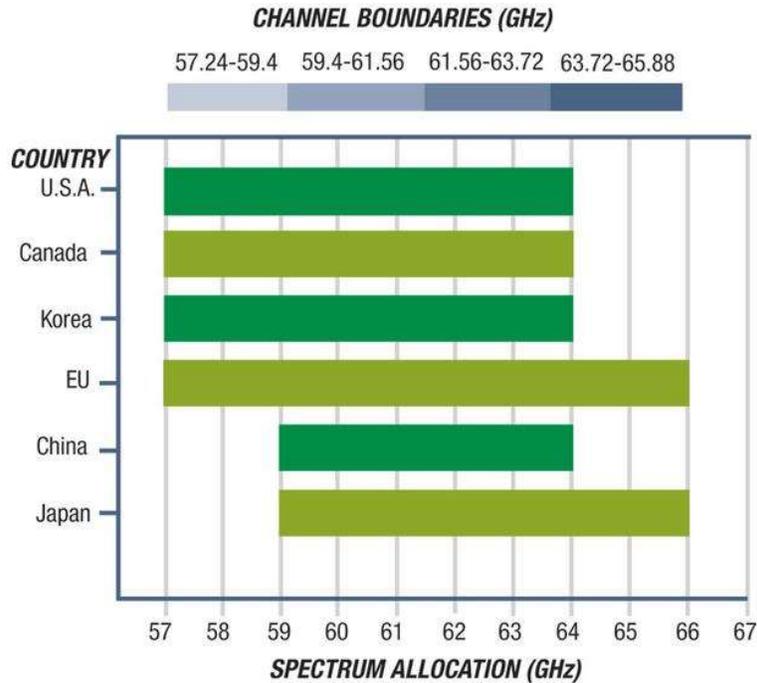


Figure 4 各国 60GHz 频段的划分。

WiGig 把 57GHz~66GHz 总共 9GHz 的频谱划为 4 个频道，每个大约 2GHz 多一些。美国，加拿大，韩国开放 1~3 频道，中国开放了 2~3 频道，日本开放 2~4 频道，欧洲 1~4 都开放。

不在通讯行业的读者可能对 2GHz 的频道没啥概念，做过通讯的同学都知道，这次是真的阔了！

给大家一点概念：一路中波收音机频道是 6~7kHz，可以传一路声音信号。一路电视机频道是 6~8MHz，可以传一路音视频（现在升级成数字电视了，频谱利用率提高了，可以传一路高清电视或者 7~8 路标清电视了）。一路 WiGig 是 2GHz，是电视频道的 300 倍，是收音机频道的 30 万倍！这才是信息高速公路啊！

带宽够，跑的数据才能快，WiGig 定义的最高速率是 7Gbps，比目前手机普遍的几兆速率快了大约一千倍。用这个速率每一秒钟可以下载一部高清电影。只有这个速率，很多“吃带宽”的应用才成为可能。比如说虚拟现实吧，你突然想去埃及金字塔逛逛，戴上头盔显示，立刻金字塔实时的影像就可以传到你的头盔显示眼镜上。没有高速传输这些技术就不

得不靠有线实现了，你的头盔显示也就不得不拖根线了。也许你在虚拟世界正看得兴起，脚下的线会一跟头把你绊回现实中来。

60Ghz 还有一个额外的好处，由于波长短（毫米波），天线就小（天线尺寸和波长成正比），这样可以用天线阵列，也就是相控阵！这个高大上的技术以前是用在军事上的，可以把电波聚焦到想要的方位（脑补一下聚光手电筒）。下图是 F-22 战机的相控阵雷达，有 1956 个收发单元，可以把电波聚焦到数百公里以外。单元数越多，聚出来的波束就可以越窄，越精确。



Figure 5 F-22 隐形战机用的 APG77 雷达，有 1956 个收发单元。上面蜂窝一样的结构就是收发器天线。

民用的无线局域网当然不要这么多单元，下图是一个 14 单元的 Sibeam 的 60Ghz 天线模块，中间那些黄黄的小矩形就是 60Ghz 天线，可以在 10 多米范围内聚焦。

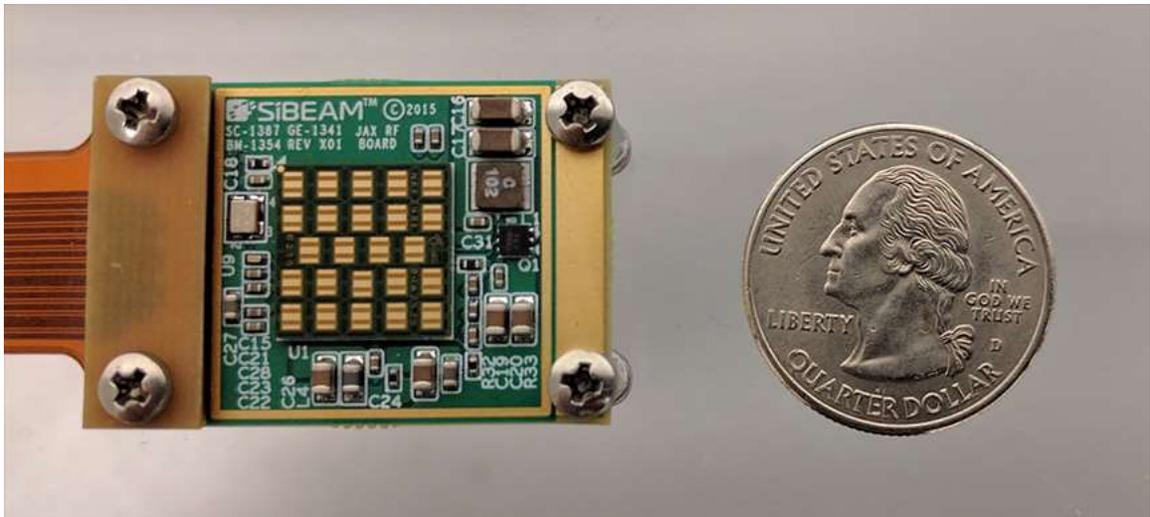


Figure 6 60Ghz 相控阵天线 和硬币大小比较。

相控阵的好处就是把电波汇聚到该去的地方。在相控阵雷达发明之前，战机的雷达是通过机械控制的来瞄准不同的地方。比如对地攻击模式就是瞄准地面；对空模式就瞄准上面天空。如果对方飞机从多个角度来袭呢？对不起，我们雷达不支持，只能选一个对付，其它的就拜托队友了。有了相控阵雷达，可以做到同时跟踪，扫描，引导导弹。先进的雷达可以做到跟 n 打 m ，也就是跟踪 n 个目标的同时引导自己导弹打击 m 个目标，这就需要雷达分出多个波束同时工作了。

举个相控阵在家庭应用环境中的例子：比如爷爷奶奶在网上看电视剧，爸爸在看网页，妈妈在抢淘宝，孩子在打游戏。用 WiFi 的话就要共享带宽，互相干扰。用 WiGig 加上相控阵天线技术，每个人都有自己的专属波束，大家互相不干扰，理想情况下，每个人都有 7Gbps 的带宽！这种方法叫做空间复用，由于大家的波束互不干扰，实际可用的带宽几乎是无限的。



Figure 7 每个人有自己的专属波束

2.4GHz 和 5.8GHz 由于波长长，很难做出相控阵天线。低频信号方向性也不如毫米波好。

60GHz 由于总优点，在一些短距离，需要大带宽的应用中正迅速普及，具体的应用有如下几个方面：

1. WiFi 进阶。

TP-Link AD7200 路由器是世界上第一款支持 2.4G, 5G 和 60G 三频的无线路由器，可以达到比 WiFi 高得多的速度。



2. 无线笔记本电脑基座（wireless docking）。

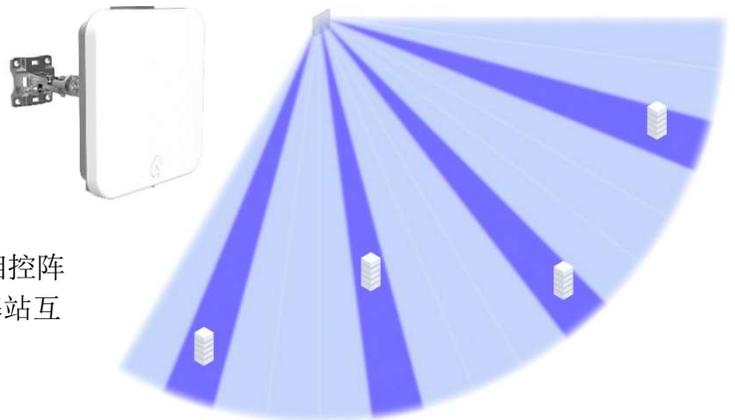
现在大家在办公室使用笔记本电脑时，往往通过一个基座和大屏幕显示器，键盘等等连接起来，以获取更好的使用体验。使用 60GHz 技术就可以取代这个基座，通过无线和各种外设连接。目前 Dell, Lenovo, HP 都有产品。



3. 中等距离骨干网代替光纤。

在中等距离高速连接（100m~1Km），通常需要拉光纤。但在一些情况下，埋设光缆成本较高。利用 60GHz 大带宽的特性，可以通过无线的方式将几个网络连接起来。

比如这款 Ignitenet 的产品就是利用相控阵天线，能够实现 120 度范围内多个基站互联。



4. 无线虚拟现实。

虚拟现实技术(VR)这些年发展很快。但用户体验还有待提高。利用 60Ghz 技术实现显示眼镜和主机之间的高速无线互联是一个趋势，可以让用户免掉线缆的干扰，完全沉浸在虚拟世界中。当然目前用无线代替有线会引入一些延迟，对于一些需要快速反应的互动场景，比如枪战游戏等会有一些影响。



5. 其他应用。

60Ghz 技术速率高的特性能够在工业，医学等方面找到很多应用。比如工业上的机器人的机械臂，有很多活动部件，和躯干的连接如果通过柔性电缆的话，长期运动，电缆弯折次数太多总会产生断裂。如果用无线技术的话，就完全可以避免这个问题。SiBEAM Snap™ 就在这方面有广阔的应用。

医学上很多内窥镜都需要电缆从患者体内连接出来，应用无线技术省去电缆可以大大减轻患者痛苦。

60Ghz 也能应用于成像，由于这个波长具有能穿透衣物的优点又不像 X 光对人体会有电离效应而产生伤害，在机场等需要安检反恐的场所大有用武之地。

60Ghz 这一频段的应用正是方兴未艾。这一“垃圾频段”目前看来是一个金矿，越来越多的应用正在被发掘出来。就在写这篇文章前几周，ASUS 刚发布了第一部支持 802.11ad 的手机：ZenFone 4。随着时间的推移，我们会在身边看到越来越多的 60Ghz 产品。

当然 60Ghz 频段也不是那么容易使用的。由于频率高，对芯片，线路板和天线的设计，制造，测试等等都提出了很高的要求。但有需求就会有创新，随着 60Ghz 产品的增多，WiGig 系统的完善，技术难关正在被攻克，产品正越来越普及。而工程师们也已把目光投向更高频率，更快速率的 77Ghz 甚至太赫兹产品。