为什么发展 5G？

作者：**让-巴普蒂斯·多尔**（DORE Jean-Baptiste），博士，工学博士，法国可替代能源和原子能委员会电子与信息技术实验室(CEA LETI) 6G 项目经理。

自上个世纪八九十年代以来，每隔十年就会涌现出新一代的移动通信技术(2G、3G、4G、5G 以及处于研发阶段的 6G)。为什么有了 4G 我们还需要 5G 呢？这些看似简单的问题实际上却很难回答。

本文提出了一种针对 5G 关键技术新见解以及这些技术对环境、气候、生命健康和社会生活所带来的深刻影响。**以上理解源于 CEA-Leti 系统部电信团队的工作(请参阅“了解更多”)**。

1. 电信技术简史

我们建议读者参考维基百科这个链接：了解电信发展历史的更多细节：英文链接。

因此，我们在这里仅对时间年表中里程碑式的事件做出一些简短的评述，并从参考资料中做一些摘录式的引用。

最初的通讯源于南北洲人民使用的烟雾信号，还有非洲的鼓声。在中世纪，

我引用了如下的描述“山顶的塔楼可以传递命令和战略意图，但相比于现代信息，那时的信息量很小，仅限于诸如：敌人来到眼前了”。

1782 年，西多会的修士多姆·戈泰(Dom Gauthey)发明了声管，并将该发明的学术论文寄给了法国科学院。

还有一些值得我们留意的重要时间节点，这里我引用如下：“1794 年，在法国，电力的发展催生了**电话**的时代，法国工程师克劳德-沙佩(Claude Chappe)实现了第一个电报系统。而第一个声学电话，或称为弦乐电话[1]是由罗伯特-胡克(Robert Hooke)在 1660 年代发明的。“经典”的电话是由亚历山大-贝尔(Alexander Bell)和埃利沙-格雷(Elisha Gray)在 1876 年各自独立发明的。然而安东尼奥-莫奇(Antonio Meucci)早在 1849 年就设计了第一个可以通过电线传输语音的装置。

从 1880 年起，我们见证了附属于邮局的电话网络开始运作，这将催生邮电局电报和电话（PTT）的诞生。

1901 年，伽利尔摩·马可尼(Guglielmo Marconi)在加拿大和英国之间实现了第一次无线电传输，他也因此获得了 1909 年的诺贝尔奖。

1941 年，随着对讲机的问世电信史也迎来了一个新的里程碑。对讲机是一种真正的便携式无线电收发器，能够建立起短距离的无线电通信。但随着 1947 年晶体管[2]的发明，微型化时代宣告到来，晶体管取代了电子管。”

正是在 1945 年，随着第一部笨重的非蜂窝式**模拟手机**的出现，拉开了现代电信历史的帷幕。

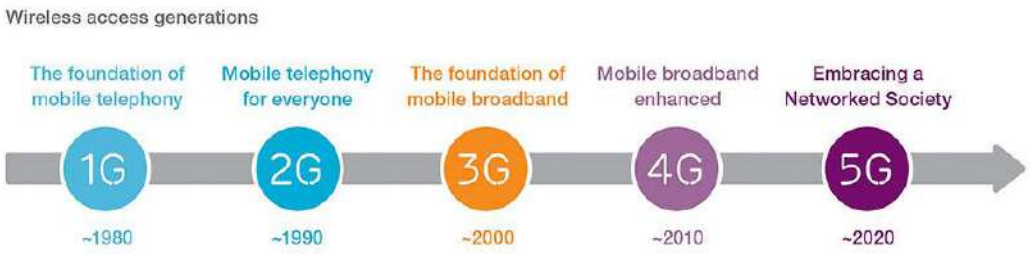

图 1 电信从 1G 到 5G 的演进。[Source: © Ericsson Mobility Report – CC BY-NC-ND 2.0]
翻译：Wireless access generations 无线接入时代；The foundation of mobile telephony 移动电话的基础；Mobile telephony for everyone 移动电话服务于每个人；The foundation of mobile broadband 移动宽带的基础；Mobile broadband enhanced 增强的移动宽带；Embracing a

这便是移动通信时代以及后续时代的开始，时至今日的 5G 以及未来的 6G（图 1）。

2. 那么什么是 5G？

“5G”是继 2G、3G 和 4G 技术之后的**第五代移动网络**。2G 推动了手机的发展（语音通话和短信），3G 促进了智能手机的发展（互联网连接、应用程序访问、通过手机发展社交网络），4G 带来了更快的速度，并通过智能手机更方便地观看视频。而 5G 则能够将宽带和移动性结合起来。在理想场景下，使用新频段将吞吐量提升了 10 倍，而传输时间缩短了 10 倍[4]。

总的来说，目前看来固定电信网络可以提供高功率、可靠性和可移动性，即无线的，网络也拥有更高的可自由移动的优势。5G 的部署依赖于一种能够在新的频段上有效地运行的无线电接口（新无线电-NR）。5G 将基于具有不同的物理特性的三类频段，频段如图 2 所示。

- **700 MHz 频段**。自 2015 年底已分配给运营商用于 4G 部署。此类频段能提供非常好的覆盖，但带宽仅在 10-20 MHz 之间。
- **3400-3800 MHz 频段**（3.4-3.8 GHz）。它在覆盖范围和速度之间提供了一个良好的折中效果。被欧洲确定为“5G 核心”频段。它允许部署空分复用技术。
- **26 -28 GHz 和 40 GHz 频段**，为极高频(EHF)的“毫米级”频段，到目前为止仅用于卫星或基础设施链路。提供的带宽从 100 到 400 MHz 不等。目标数据率在小范围的覆盖区中非常重要。

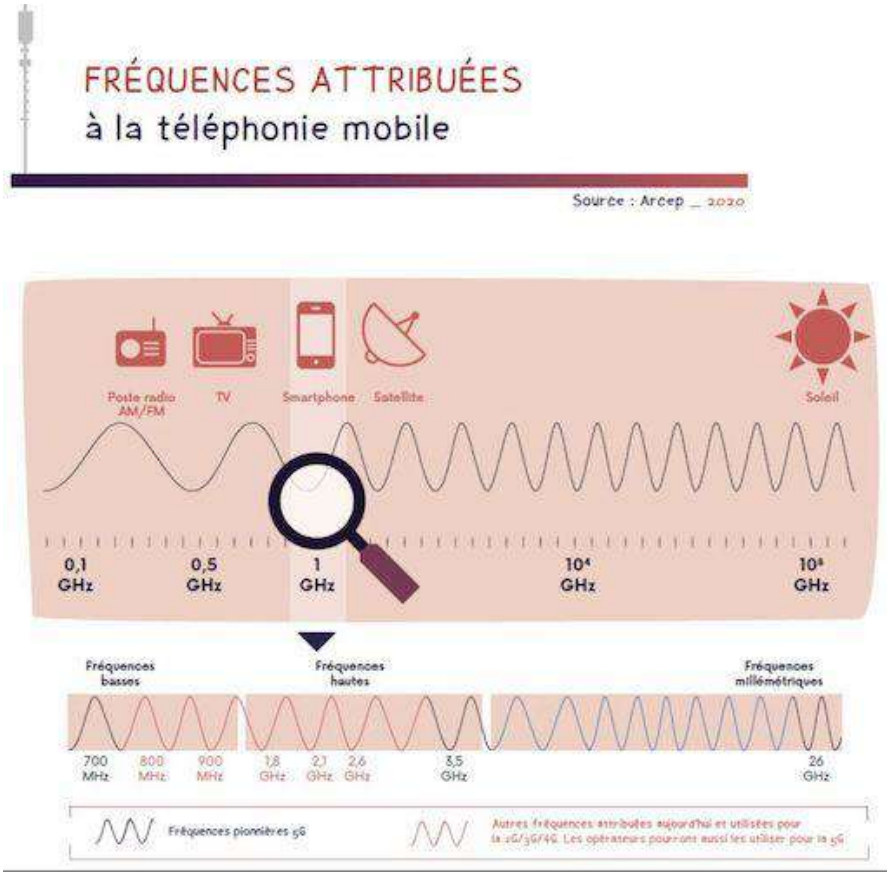

图 2 频率带[Source: © ARCEP, 2020 – Detailed version on ANFR website: https://www.anfr.fr/gestion-des-frequences-sites/tnrbf/frise-interactive/]

翻译：fréquences attribuées à la téléphonie mobile 分配给移动电话的频率

3. 技术方面：相比于 4G，5G 的关注点

3.1. 超高速

5G 会在很短的时间内交换大量的数据，并具有高可靠性。

在无法预测所有应用的情况下，2020 年 3 月的疫情管控期间，拥有一个强大和可靠的网络来维持信息交换的关切被体现了出来：如实施远程办公、虚拟课堂、远程医疗咨询等等。

5G 的部署促进了这些协作平台的使用与服务质量的提升。

3.2. 大量并发连接

许多设备（每平方公里多达几百万台）可以被连接，且**不会出现吞吐量损失**

或服务崩溃的情况。

例如，大量并发连接可以推动日常生活中物联网(Internet of Things, IoT [5])的大规模发展，其中关键在于个人服务、更智能和更经济的节能网络管理(例如，只有在有路人经过时才打开路灯或商店窗户)以及工业数字化(又例如可以更方便地重置生产线)。

3.3. 网络虚拟化

5G 将更依赖于虚拟化的网络[6]。虚拟化是依靠软件来模拟硬件功能并创建一个虚拟系统。因此，虚拟网络[7]的核心是处理最重要的流量传输和作为通信媒介。其不再由物理设备承载(如 4G 时代的情形)，转而是由软件来代替。

这种虚拟化可能会使算力尽可能地分散到用户端(边缘计算)。它还允许在相同的基础设施上根据使用情况分配不同的带宽性能(网络切片[8])。例如：自动驾驶汽车或低延迟的远程手术，更高吞吐量的虚拟或增强现实以及巨量连接的物联网和传感器。

3.4. 有源天线

在之前的技术中，网络会在大范围内向各个方向发送信号(伞状广播)；5G 中部署的有源天线**允许仅在限定范围内的用户接收到信号**。它们还允许用户在空间上正交，从而增大容量。

3.5. 能耗优化

5G 引入了基础设施处于待机状态的机制，以**减少非高峰期**(夜间或人口稀少地区)**的能量消耗**。

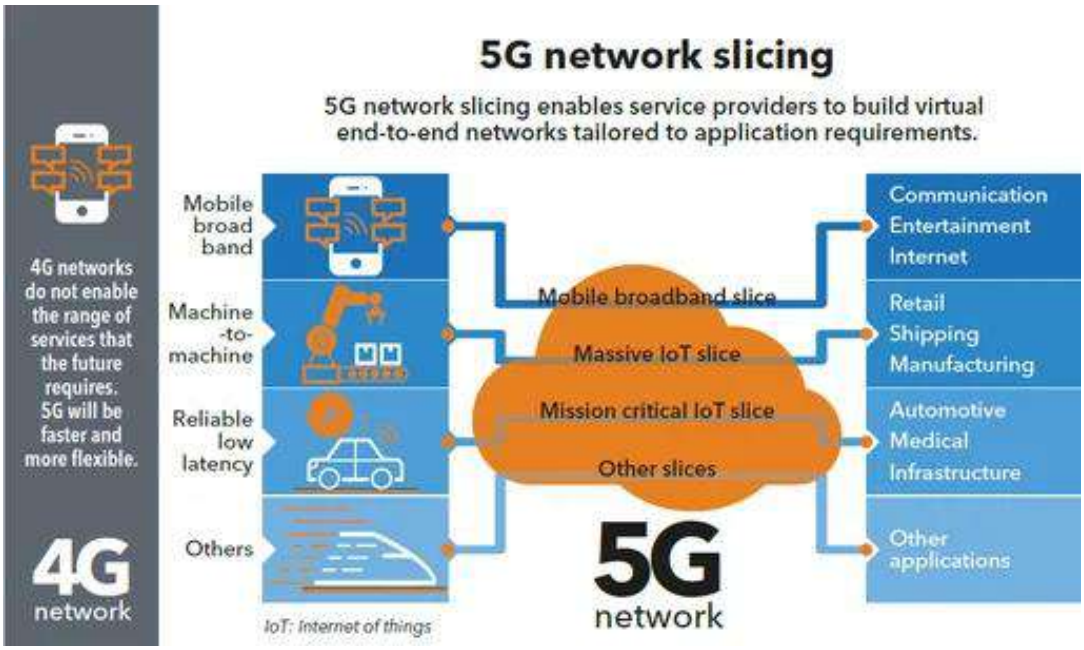

图 3 网络切片[Source: © ITU News – What Is 5G Network Slicing]

翻译：5G network slicing 5G 网络切片；5G network slicing enables service providers to build virtual end-to-end networks tailored to application requirements. 5G 网络切片能够使提供商根据应用需求构建虚拟端到端网络。4G networks do not enables the range of services that the future requires. 5G will be faster and more flexible. 4G 网络不再满足的未来所需的设备范围。5G 将会变得更快更灵活。Mobile broad band 移动带宽；Machine to machine 机器到机器；Reliable low latency 可靠的低延时；others 其他；Mobile broadband slice 移动宽带切片；Massive IoT slice 大规模 IoT 切片；Mission critical IoT slice 关键任务的物联网切片；Other slices 其他切片；Communication entertainment internet 互联网娱乐；Retail shipping manufacturing 零售航运制造；Automotive medical infrastructure 骑车医疗基础设施；Other applications 其他应用

4. 5G 和气候问题

5G 的争议还在于**数字科技行业对环境的影响**。这个问题的讨论比 5G 技术本身要多得多，5G 问题只是一个原因，但它是双重的。

在温室气体(GHG)排放方面，**数字科技行业现已超过了航空业**(4%)，如图 4 所示，这一比例仍在增加。这说明在应对气候问题方面我们还有很多工作要做。法国参议院已经就此提出了一些建议；ARCEP （法国电子通信和邮政的监管机构）在 2019 年也发布了关于这一问题的简报。

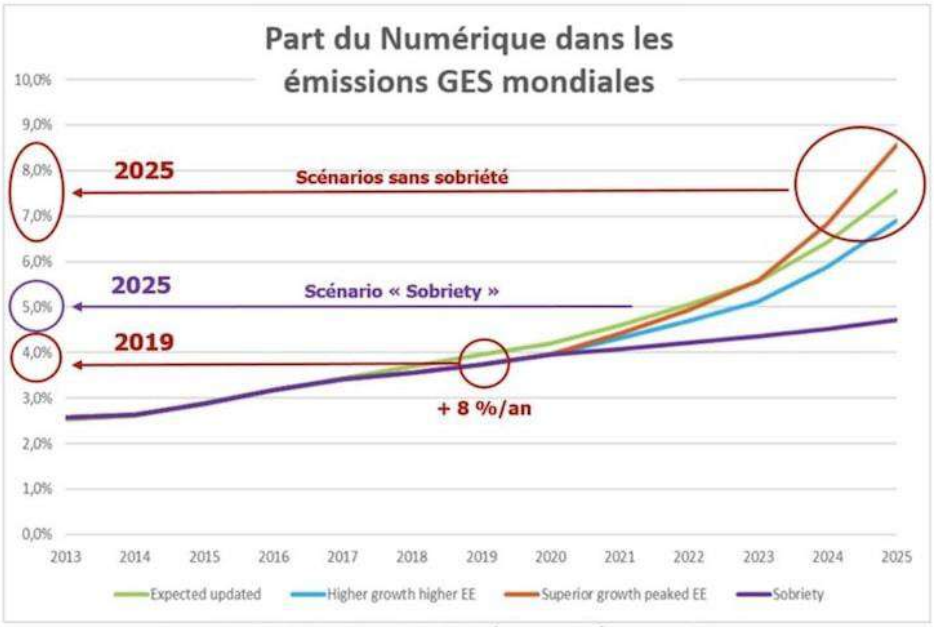

图 4 2013-2025 年数字科技行业在全球温室气体排放中所占份额的演变。[Source: "Lean ICT – Towards Digital Sobriety" – © The Shift Project, 2018]
数字技术在欧盟全球温室气体排放的占比。

在数据交换量等量时 **5G 要比 4G 更节能**。但 5G 还将开辟新的应用领域，预计流量将进一步地增加。这就是所谓的**反弹效应**[9]。

没有人能够预测 5G 未来还能有哪些应用。技术创造的就业机会；社会孕育新的产业。在手机诞生之初，短信(SMS)不太人性化，被认为是一个微不足道的小工具。但出乎设计者的意料，它确实满足了用户的需求，并得到了长足的发展。

其中一些技术的运用将有可能消除或减少某些行业所排放的温室气体。例如，COVID19 疫情期间，大量居家办公防止了很多人在高峰期匆忙地赶路，避免了堵车。**开展一些重要的远程服务，**以及开拓一些新领域（如：通过控制机器人的远程医疗和手术)。

在工厂里，物联网的运用，生产线变得更加的灵活，更容易重新配置，更模块化，报废率更低，.....，但显然并不总是如此。但 5G 的应用是一个重要的政治和社会议题，它不仅仅限于此技术上从业的技术人员、工程师或研究人员，他们也只是社会中一环（如图 5）。

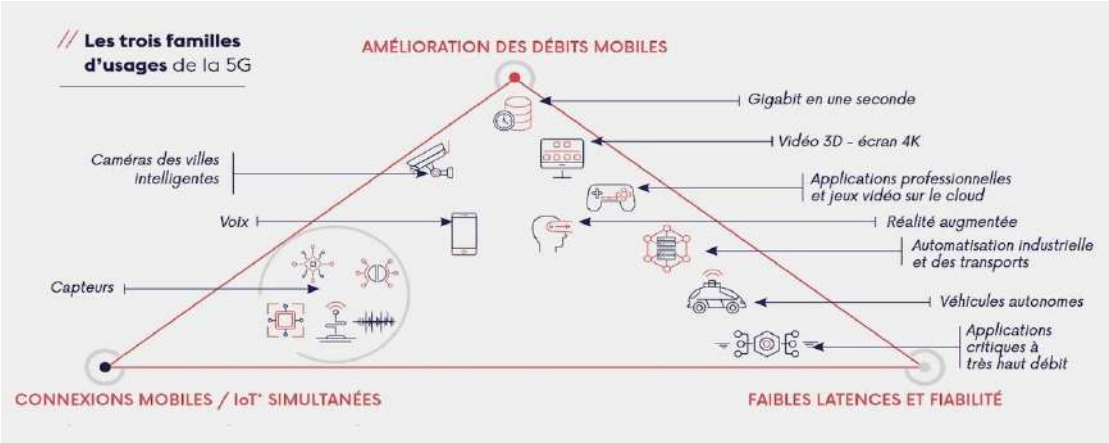

图 5 5G 的用途[Source: © ARCEP – 5G network: deployment in France, speed, coverage, compatible smartphones]

翻译：5G 的三类用途；提高移动速度；每秒 Gbit 速率；4K 高清的 3D 视频；云端的专业应用和视频游戏；工业和运输自动化；自动驾驶汽车；应用程序（高带宽通信）；智能相机；传感器；移动通信与物联网；低延迟与可靠性

是否有必要提升用户意识以规范良好的行为？如今，汽车司机都明白高速行驶会更费油。但谁了解使用 **4G 手机看电影会比通过光纤下载到电脑上再观看要多耗费 10 倍的能量**？如今这种额外消耗对消费者来说一般是无法获知的，特别是缴费账单上也体现不出来。

法国参议院在 6 月发布的一份关于数字科技行业影响的报告中建议，**是否应该进一步地规范数据消费**而终止无限制地数据套餐的使用？

我们是否应该推动数字服务的生态设计？例如，ARCEP[10]提出在疫情封闭外出期间，内容出版商应努力简化内容。虽然远程办公的使用量急剧增加，这样的作法能确保网络仍能正常运行。ARCEP 认为，在对抗臃肿的软件方面还有很多工作要做：如当流量不受限制时，软件往往会开发很庞大的附属功能。然而，有时也会为网速较慢的国家开发性能相当的轻量级版本。此外，值得注意的是，电信业一直保证着“G”(2G、3G、4G 和 5G)之间的后向兼容性。这种兼容性也是要付出额外成本的。或许需要重新思考这种向后兼容的模式。

长期来看，流量的增长是由智能手机数量的增加、用户数量的增加和每个用户平均流量的增加一同导致的，更主要是由视频内容消费的增加导致的。图 5 显示了从 2014 年第一季度到 2021 年第一季度**全球每月网络数据和语音总流量的演变**，以及移动网络上数据流量的同比变化百分比[11]。2021 年第一季度，移动网络的月度数据流量总量超过 66 艾字节[12](10^{18} 字节)。

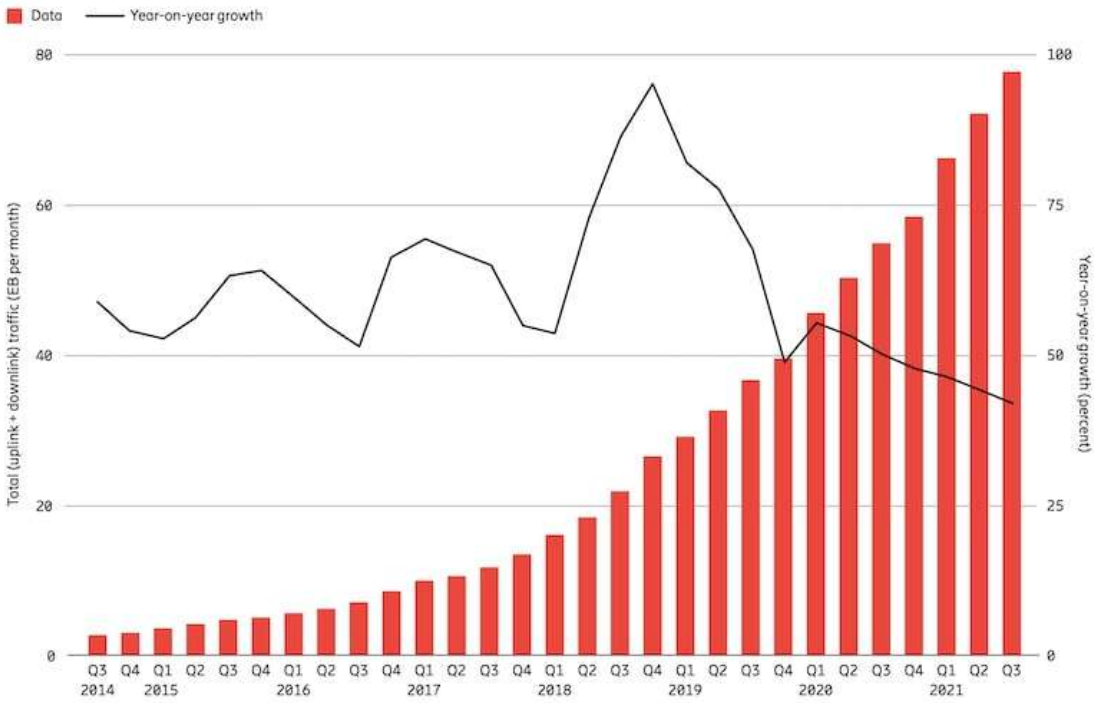

图 6 自 2014 年以来数据流量演变的统计 [Source: © Ericsson Mobility report 2021]
翻译：year-on-year growth 年增长率

5. 5G 与健康

在 2020 年 6 月 29 日由法国参议院空间规划和可持续发展委员会举办的关于 5G 的健康和环境影响的圆桌会议上，法国食品、环境和职业健康安全机构（ANSES）阐述到，在过去 20 年里频段高达 2.5 GHz 的数据和出版物已累积了庞大的信息，这些频段包括了 Wifi 以及 2G、3G 和 4G。

适当地限定 700 MHz 频段的暴露阈值可使其对健康影响得到了较好的控制。自 2015 年底以来，该频段已被分配给运营商用于部署 4G 以及 5G。

图 7 无线电频率和健康，我们的现状如何? [Source: © Leon Brooks, Public domain, – Tim Parkinson, CC BY 2.0, via Wikimedia Commons]

ANSES 还解释说，**在 6 到 10 GHz 之间，电磁波对人体的渗透力逐渐降低，与生物体的相互作用趋于其表面**。用于 5G 的 26 GHz 频段，特别是用于万物互联方面，这也成为许多出版物讨论的主题，**这些出版物表明波的吸收仅限于皮肤表面**（在一百微米的厚度上）。

关于 3.5 GHz 频段（5G 的核心频段)，ANSES 认为在这个频段它们还缺乏相关的信息。它们认为在 2.5 GHz 频段观察到的影响机制同样也适用于 3.5GHz 频段的，但它们更倾向于在相关的研究报告公开发表之后再来明确态度。这种推断方法已被不同国家的各种权威机构采纳来表达了他们对该问题的看法。法国电信联盟（FFT）指出德国、奥地利、芬兰、挪威、丹麦、爱尔兰和荷兰**当局认为在 4G 背景下的分析结论是毋庸置疑的**，世界卫生组织和欧盟委员会也持同样观点。相同暴露阈值已经被维持了[13]。

然而，在暴露测量方面，5G 与前几代有一个重要的变化。在 4G 中，网络在大范围内无差别地发送信号（伞状广播）；而**在 5G 中，天线为有源天线，信号广播仅限于通信智能手机所在的区域**（参见 3.4 活动天线）。

也就是说天线当且仅当用户在用手机时才向其发送信号。这一点改变了电磁暴露的情形，因此，用户对智能手机的使用情况不同，电磁暴露场景也会有所不同。5G 之争远未结束，科学研究也必将继续发展。**总之，铭记的是我们受电磁暴露主要因为我们在使用手机的状态**（更确切地说，是由于它发出的电磁场）

和数据消耗所造成的。

6. 理解 5G 的关键——数字通信理论

在通信领域，确定两个或多个实体通信方式是很有必要的。监管机构已经选择了频域来组建通信。

在没有障碍物的情况下，电磁波从天线传播到空间，频率越高衰减越快。

接收器，比如任何电子设备，会因电子的热振动受到与环境温度成正比的噪声的干扰。为了描述噪声与信号功率的关系，通常使用信噪比（SNR）。

1948 年由克劳德·香农（Claude Shannon）提出的**信道容量**（也称为香农极限）[14]是信息理论的一个重要结论。它代表了通信理论上的容量上界。

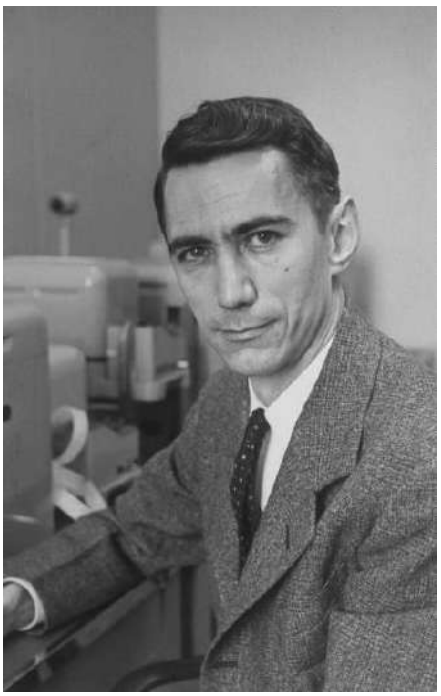

图 8 克劳德·香农，信息论之父[Source: © Life Magazine, Alfred Eisenstaedt, 1951 – https://journals.openedition.org/bibnum/568]

由于可靠传输受到香农极限的制约，无数研究工作的主题就是努力地逼近香农极限。在给定的带宽和信噪比（SNR）下达到极限速率，这意味着资源能够以最高效的方式被使用。

传输系统的**能源效率**被定义为信息位(已传输和已接收)与用于相同传输和接收模块的能耗单位的比值。这适用于通信系统中的任何实体，从用户到整个网络。其单位为位/焦耳。

频谱效率，以比特/秒和比特/赫兹表示，表征了允许在可用频段内传输信息比特的波形调制技术[15]。高频谱效率传输意味着高信噪比，因而传输功率得到了提升。而这是以能效为代价的。因此，信息理论给出的最佳状态是**由频谱效率和能耗之间的权衡来逼近的**。

由于可靠的传输受容量限制，逼近容量极限一直是无数研究努力的主题。实现给定带宽和 SNR 下的速率极限意味着资源能以最有效的方式使用。信息论指出**频谱效率和能耗之间始终存在权衡**。

高能效的可靠传输必然会导致频谱效率低，相比之下，频谱效率较高的系统必然消耗更多的能量才能维持相同数量的比特传输。

面对数字消费的指数增长，人们已研究了一种新的后 4G 标准以满足未来二十年的需求。现代通信系统（4G）已经达到信息论所定义的容量极限，而 **5G 保留了这两种选择**。

- 由于信道容量与带宽呈线性变化，分配新的频谱就能增加网络容量。3.5GHz 和 20-40GHz 之间的频段（参照波长的数量级将其称为毫米级频段）已被保留给 5G。正如前面所讨论的，由于自由空间的衰减随着频率的增加而增加，更困难的传播要付出更多的代价。人们便尝试使用集中能量的天线或增加接入点的数量。这一最终的解决方案当被推到极致时，通信系统可以降低传输功率以及移动传输模式下的设备电磁暴露——这就是小型蜂窝的扩建（4G 时引入的小型蜂窝）。然而，接入点的增加对运营商来说带来了额外成本，这也是目前部署放缓的原因。

- 由于频谱稀缺且昂贵，5G 标准引入了一个替代方案：空分复用，它包括能让**几个用户在空间中同时通信而且不互相干扰**。这项技术基于数字处理集成的发展，以及增加频率以使天线小型化来应用到网络中。

7. 空分复用：5G 的关键技术

空分复用是基于大规模 MIMO **天线阵列**的**使用**。

其原理在于来自不同用户的信号在空间上的 **"正交化"**（见文章末尾的重点）。这意味着两个用户通过信息处理可以同时通信，且互不干扰。**就人体而言，我们的大脑可以解码两个同时进行的对话，这要归功于我们的两个耳朵以及相应的处理**。

通过对每根天线上信号的相位和幅度进行操作，可以找到一组参数使得感兴趣用户的信号在一个方向上叠加增强（强信号），在另一个用户的方向上相消（产生的信号降为 0）。

如图 9 显示了四个用户在正交信号空间上的功率分布。具有 400 根天线的接入点被放置在中心位置。对于所有的配置，在感兴趣的方向（蓝色方块）的接收功率达到最大值（-60 dB）。另一方面，在其他用户的方向上，接收功率为零。

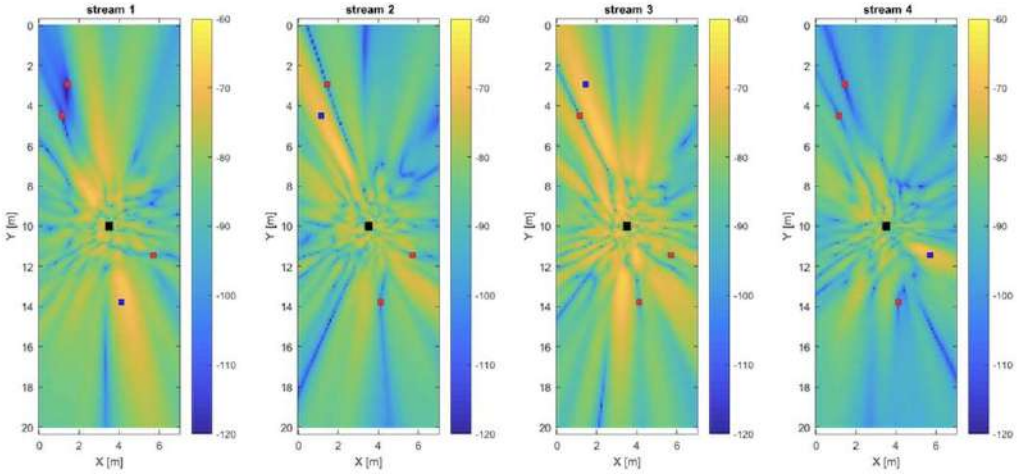

图 9 使用空分复用技术的不同用户空间功率分配示例。黑色方块表示天线阵列的位置，蓝色方块表示接收信号的用户，红色方块表示待“正交化”的用户。[Source: © CEA / LETI]

在这个例子中，4 个用户可以在相同的频谱中同时交换信息而不产生干扰。容量增加了 4 倍。

理论上，人们可以用 N 个天线阵列和 N 个数字传输通道复用服务于 N 个用户。这样一个系统的复杂性要比前几代高得多。

请注意，目前 5G 系统的技术使用的是 3.5 GHz 左右的频率，有 N=64 根天线，毫米波段大约有 100 根天线。下面的图 10 显示了由诺基亚和 CEA/LETI 设计和开发的天线系统的例子，包括一个含有 400 个天线单元的演示器。

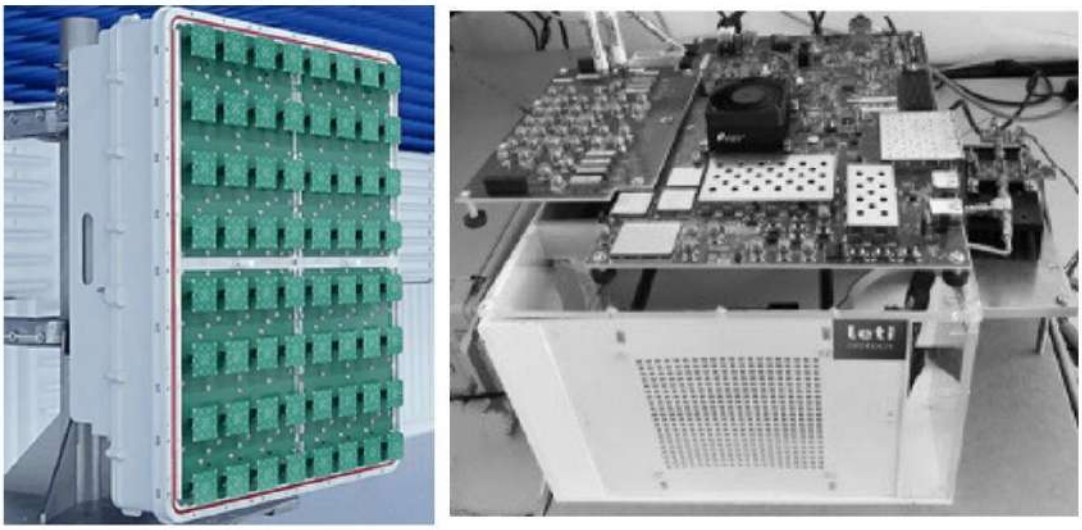

图 10 左图:诺基亚 64 根天线系统-频率:2496-2690 MHz (3GPP 波段 41)，右图：CEA/LETI 400 个单元的天线系统原型-频率 25-32 GHz [Source: © CEA / LETI]

8. 要记住的信息

- **5G 依赖于一个新的无线空口技术**（新无线电-NR），能够有效地在新的频段上运行。它具有三类不同且互补的物理特性的频段。
- **5G 结合了超高吞吐量和同步大规模连接**，特别是由于有源天线限定了信号传输到用户的区域。
- **给定相同流量，5G 的能耗导致温室气体排放比前几代要低得多**。但预计大量增加的流量可能不会对全球变暖产生积极影响。
- 依靠使用大量天线阵列的**空分复用**，允许多个用户在同一时间进行通信而互相不干扰。

参考资料及说明

封面图片：[来源：Pixabay]

本文是基于 CEA/LETI 系统的电信部门的工作，由克里斯托夫·德拉沃（Christophe Delaveaud）、埃里克·梅尔西埃（Eric Mercier）、卡米列 希罗德（Camille Giroud）、卡米列·德克鲁瓦（Camillee Decroix）和罗兰·布兰潘（Roland Blanpain）共同参与撰写的。

[1] “绳索电话”或“酸奶电话”，是由两个易拉罐、硬纸杯或类似形状的物体用电线连接而成的声学电话装置(不依靠电力系统)。”(https://fr.wikipedia.org/wiki/T%C3%A9l%C3%A9phone_%C3%A0_ficelle)

[2] “晶体管是一种具有三个有源电极的半导体器件，它通过输入电极（双极晶体管的基极和场效应晶体管的栅极）控制输出电极（双极晶体管的集电极和场效应晶体管的漏极）上的电流或电压”。(https://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor)

[3] “切换是指为使手机或智能手机（在 GSM 中称为移动台-MS，在 3G 和 4G 网络中称为“用户设备”）在不中断通话或数据传输的情况下更换无线小区而实施的一系列操作”。(https://fr.wikipedia.org/wiki/Handover)

[4] Arcep, “Grands dossiers : la 5G”（5G 是个大文档）: https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-5g.html

[5] “物联网，或称 IoT，是互联网与实物、场所和环境之间的相互联系。”(https://fr.wikipedia.org/wiki/Internet_des_objets)

[6] 这里用的是未来，因为截至本文写作之日(2022 年 5 月 31 日)，5G 的核心网络是基于不允许分片的 4G 核心网络（图 3）。这被称为 5G NSA（Non Stand Alone 的缩写)。5G SA（独立）预计将在未来几个月内部署，但不会迅速在所有国家部署。因此，这样的网络切片不会马上实现，最早也要到 2022 年底。

[7] 核心网络正在向 5G 演进: https://www.ericsson.com/fr/blog/3/2021/9/le-coeur-de-reseau-evolue-vers-5g

[8] 网络切片的目的: https://reseaux.orange.fr/actualites/5g-network-slicing

[9] ARCEP Note n°5 "数字技术的碳足迹"，2019 年 10 月 21 日："从长远来看，能源效率的提高不足以抵消流量的增加。因此，通过反弹效应(.....)，一个看似可以减少恒定使用的温室气体排放的技术发展，由于它所允许的使用倍增，可能会产生整体的排放增加。" https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/reseaux-du-futur-empreinte-carbone-numerique-juillet2019.pdf

[10] ARCEP Note No. 5 “数字技术的碳足迹”, 21 October 2019: https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/reseaux-du-futur-empreinte-carbone-numerique-juillet2019.pdf

[11] 爱立信移动的报告，2021 年 6 月。 https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report

[12] 一个字节是由 8 个比特组成的一组；一个 exabyte 相当于 1000 petabytes 或 10 亿 gigabytes

[13] 法国电信联盟主席尼古拉斯·盖林（Nicolas Guérin）在参议院区域规划和可持续发展委员会 6 月 29 日举行的 5G 的健康和环境影响的圆桌会议。 https://www.senat.fr/les_actus_en_detail/article/impacts-sanitaires-et-environnementaux-de-la-5g.html

[14] C. Shannon. “A Mathematical Theory of Communication.” The Bell System Technical

Journal 27.3 (1948), pp. 379-
423. https://people.math.harvard.edu/~ctm/home/text/others/shannon/entropy/entropy.pdf
[15] Digital Communications 5th Edition. Proakis. McGraw Hill, (2007), OR W. Gappmair, "Claude E. Shannon: the 50th anniversary of information theory," in IEEE Communications Magazine, vol. 37, no. 4, pp. 102-105, April 1999, doi: 10.1109/35.755458. https://www.leti-cea.com/cea-tech/leti/english/Pages/Leti/About-Leti/mission-organization.aspx