

第 7 章

TCP 前沿的研究动向

应用程序和通信环境一旦变化，
TCP 也会变化

如前文所述，随着互联网的普及、应用程序和通信环境的变化，TCP 自身也不断地发展变化。其中，较为明显的例子便是针对宽带、高时延环境和缓冲区膨胀问题，人们开发了新的拥塞控制算法等。

近些年来，通信速度不断提升，应用程序逐步多样化。通信网络作为社会基础设施，其重要性不断增加。今后，这个趋势想必也会一直持续下去。总的来说，TCP 今后也一定会随着相关技术和使用环境的变化而不断地发展。

因此，本章将详细介绍近些年来乃至未来的 TCP 领域中较为重要的具体技术，例如 5G（第 5 代移动通信）、物联网、数据中心和自动驾驶等。同时，本章还会涉及这些技术相应的技术背景和社会背景，以及它们带来的一些问题和 TCP 前沿的研究动向。

7.1

TCP 周边环境的变化

3 个视角：通信方式、通信设备和连接目标

近些年来，通信速度不断提升，应用程序逐步走向多样化。与此同时，TCP 的使用环境也出现了各种变化。下面，笔者将带领大家从通信方式、通信设备和连接目标 3 个视角出发，概览 TCP 周边环境的变化情况。

TCP 迄今为止的发展情况 回顾本章之前的内容

正如笔者前面一再说明的那样，TCP 自身会随着通信环境和应用程序的变化而不断发展。

举例来说，如第 5 章所述，随着网络的高速化和云服务的普及，名为长肥管道的宽带、高时延环境走向普及，过去作为标准使用的 Reno 和 NewReno 拥塞控制算法中的扩展性弱，以及 RTT 不同的网络流之间的吞吐量不公平等问题浮出水面。为了解决这些问题，新的拥塞控制算法 CUBIC 被开发出来并投入使用。

此外，如第 6 章所述，由于存储成本下降、通信速度提高，网络设备中配备的缓冲区存储容量增大，基于丢包的拥塞控制算法暴露出新的问题，即缓冲区时延增大导致吞吐量下降。针对这一情况，BBR 算法被提了出来。它是一种以 RTT 为指标的新的基于延迟的拥塞控制算法，目前已经成为主流的拥塞控制算法之一。

其他具有代表性的例子还有 3G 移动通信中使用的应用程序专用型协议 W-TCP。这一协议是专门为无线数据通信而设计的，其优点是能解决“容易因拥塞以外的原因而丢包”的问题（详见 1.6 节）。

笔者在前面已经多次提过了，这里再提一下：目前介绍过的这么多种技术和算法，都有其各自的特点，与这些特点相匹配的环境也各不相同。换句话说，这意味着并不存在什么最佳算法，最重要的是需要结合实际的使用环境，选择最合适的技术和算法。

这还意味着，今后 TCP 的使用环境还会继续变化，而与之相应的新算法也必定会出现，技术上一定会有新的发展。

观察通信环境变化的 3 个视角 通信方式、通信设备、连接目标

近些年来，通信速度不断提升，应用程序走向多样化，通信网络作为社会基础设施，其重要性日益增长。而且，这一趋势今后想必也会持续下去。那么，在我们讨论使用 TCP 的通信环境的变化时，虽然只是“通信环境变化”，但也可以从若干个视角出发。这里，笔者就来整理一下，针对 TCP 相关的通信环境，从通信方式、通信设备和连接目标 3 个视角来详细解说（图 7.1）。

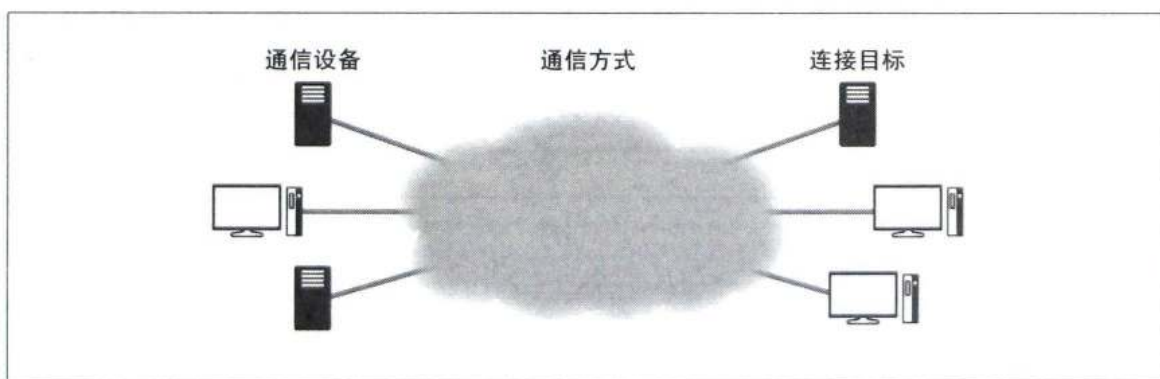


图 7.1 通信环境变化的视角

首先，“通信方式”指的是有线和无线等通信介质，以及移动通信中的 3G 和 4G 的链路种类。无线与有线相比更容易出现比特差错，不同代的移动通信，其通信速度和时延都大有不同。由于这些不同特性，不同通信方式对 TCP 的特性要求也有所不同。

其次，“通信设备”指的是智能手机、PC 等用户端的设备。由于不同设备的处理速度和存储容量等性能有所不同，所以可处理的计算量也有所不同，因此与之匹配的通信方式也显然有所不同。

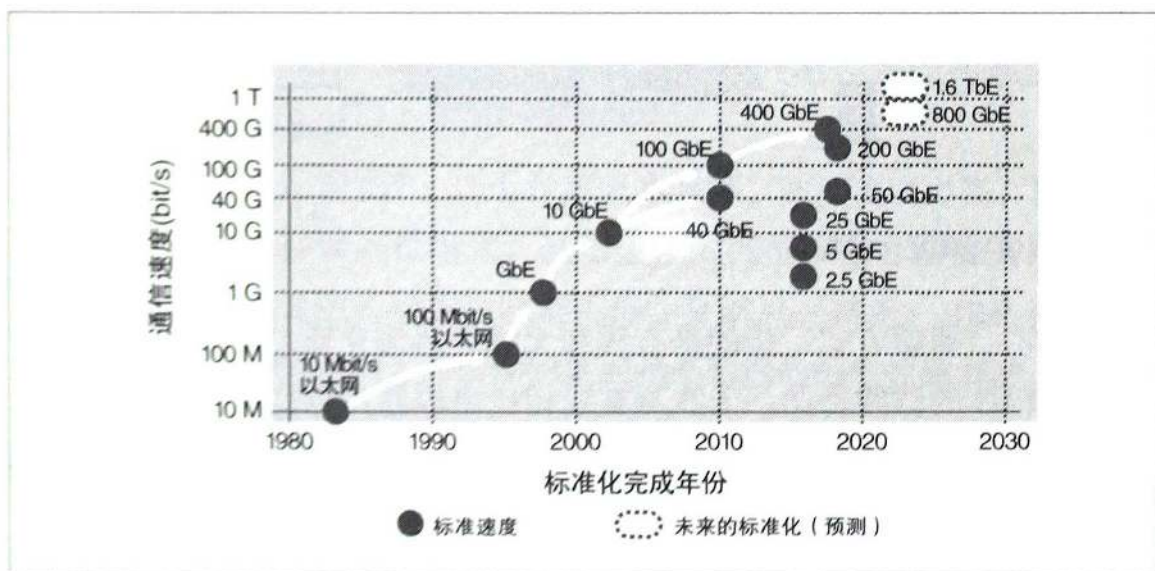
最后，“连接目标”指的是用户设备通过 TCP 连接到的目标设备。用户设备和连接目标设备之间不同的物理位置关系，会使传播时延发生很大的变化。

接下来,笔者将从上面3个视角出发,结合对TCP今后发展的思考来介绍一下近些年来的TCP发展动向。

通信方式的变化 以太网、移动网络和LPWA

无论是有线还是无线的通信介质,通信速度都在不断地提高。

以一个具体的例子——以太网来看的话,如图7.2所示,通信速度从20世纪80年代的10 Mbit/s开始不断提高,在20世纪90年代,从100 Mbit/s提高到1 Gbit/s,到了21世纪00年代达到10 Gbit/s,随后在21世纪10年代,人们制定出了超越了100 Gbit/s的标准。与网络标准相对应的产品的普及和其价格的下降通常需要花费数年的时间,然而在2019年,400 Gbit/s以太网(400 GbE)的标准化就已经完成,相应的产品也已经由思科系统公司发售。可以预见的是,今后高速化的趋势还会继续下去,800 Gbit/s甚至兆兆位(terabit)的以太网想必早晚会出现。

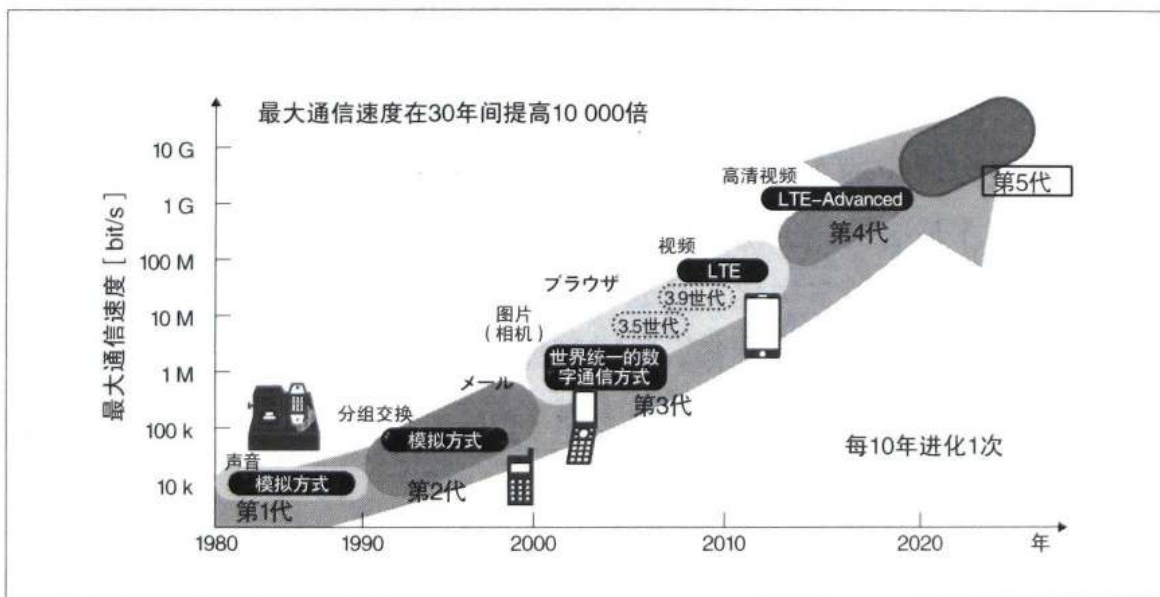


※ 参考 Ethernet Alliance 官方网站

图 7.2 以太网标准化的趋势与速度

移动通信系统,也就是移动网络方面的情况如图7.3所示。20世纪80年代的1G(第1代)的通信速度只有几十Kbit/s,此时是车载电话和肩

背电话^①的时代。进入 2G 时代，通信方式变成了分组交换，此时电子邮件和互联网开始得到使用。到了 3G 时代，通信速度进一步提升：在 2010 年左右，3.9G 技术 LTE 开始普及，通信速度上升到几十 Mbit/s，视频服务开始走向千家万户。到了 2019 年，4G 技术 LTE Advanced 开始普及，通信速度提升到 1 Gbit/s 左右。



※ 出处：《面向 21 世纪 20 年代的无线宽带战略》（日本总务省综合通信基盘局电波政策课，2015）

图 7.3 1G（第 1 代）~ 5G（第 5 代）移动通信系统的进化

接下来，2018 年 5G 标准面世，各个运营商都已经开始准备提供服务，今后想必 5G 也会在全世界范围内流行开来。5G 的特点，一般来说主要体现在以下 3 个方面：大容量、低时延高可靠性和多设备。5G 的通信速度在理论上可以达到 20 Gbit/s，与 4G 相比有 10 倍以上的提升。在时延方面，5G 的要求是无线区间内的通信时延达到 LTE 的 1/5 左右，即不高于 1 ms，而端对端的时延则要求不高于几十 ms。

与此同时，第 2 章简单介绍过的名为 LPWA 的无线通信协议也引起了关注。LPWA 并非是统一的定义，而是低功耗长距离数据通信方式的总称。通信距离一般覆盖几百米到几千米，具有代表性的规格标准有 LoRaWAN、SIGFOX、NB-IoT 等。无论是哪种规格标准，都会控制通信速度以减少耗

① 20 世纪 80 年代日本发售的一款电话，是挂在肩上的可移动电话，重量约 2.6 kg。

电量，其特点便是维持几十 Kbit/s 的低速间歇性通信。在“大范围部署传感器的网络”这种物联网相关服务中，LPWA 的应用值得期待，今后它想必一定会在更大范围得到应用。

考虑到上述情况，TCP 今后需要有针对性这些新通信方式的技术更新。

不仅仅是高性能化，还有“受限环境下的通信设备的多样化”这一视角

提到进行通信的主体设备，过去 PC、服务器，还有移动电话、智能手机等设备才是主流，但是近些年来随着各种各样的传感器、智能设备的出现，设备变得更加多样化。智能设备并没有明确的定义，通常是指能接入互联网的便携型多功能设备。除了智能手机和平板设备以外，具有代表性的例子还有手表形式的智能腕表（图 7.4）。

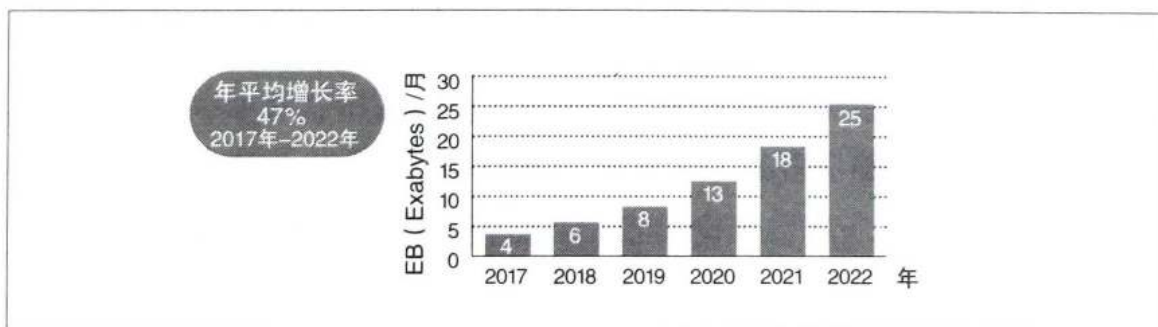


图 7.4 智能手表的示意图

特别是，近些年来物联网技术快速普及。与传统的智能手机等设备需要用户自己操作不同，物联网将家电、传感器等设备接入互联网，使得用户可以通过网络对其进行控制。

我们通过图 7.5 可以看出，在今后的互联网上，物联网相关的流量一定会呈增加的趋势。此外，设备间（双方都不接入互联网而是直接）通信的技术称为 M2M（Machine-to-Machine）。虽然严格来说，它与物联网不是同一个概念，但有些人会将二者的概念混淆。迄今为止，通信设备的性能（具体指处理速度和存储容量）一直呈现增长的趋势。今后，智能手机、

PC 等设备的性能想必也会不断提升。



※ 出处: Cisco Systems, Inc., Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends 2017—2022 (R/OL). 2018.

图 7.5 物联网相关流量的变化

不过，物联网所用的传感器等设备在通常情况下处理性能较低，在有些环境下还会出现互联网连接不稳定的情况，或者有时候会使用前面介绍的 LPWA 之类的低速网络。

此外，如同 5G 文档描述的一样，新标准下会有很多设备存在，这些设备会各自接入互联网。另外，设备安装之后其更新和更换都比较困难，充电或更换电池也比较困难，因此大部分情况下设备在耗电量上十分受限。

也就是说，随着通信设备的多样化，以后设备高性能化不再是唯一的追求目标，“受限环境下的通信”这一视角也变得重要起来。例如，那些复杂的、适合高处理性能设备的拥塞控制算法，显然无法运行在处理性能很低的设备上；又或者，适合高可靠性、高速网络的拥塞控制算法，想必无法适用于那些只能连接低速且不稳定的网络的设备。

连接目标的变化 云计算、边缘计算

从 21 世纪 00 年代后半期开始，通过互联网提供计算性能的云计算变得非常普及。其中，具有代表性的例子便是由谷歌提供的 Gmail 和谷歌云盘服务。这些服务支持用户通过互联网浏览或者更新保存在这些数据中心的电子邮件与电子文件。

云服务是由企业机构设置大规模的数据中心，在其中集中安装大量服

务器和存储等设备，并进行集中管理的服务。对用户来说，云服务的优势是只要使用手机等设备，便可以通过互联网轻松访问数据中心的服务器等设备，然后使用其中搭建的服务。

但与此同时，人们也注意到了一个情况，即用户和数据中心之间的距离有时会成为问题。换句话说，由于服务器和存储集中配置在超大型的数据中心，用户端设备和数据中心之间通信时的传播时延^①是无法忽略的。光纤内部光信号的传输，通常 1 km 需要 $5\ \mu\text{s}$ 左右。也就是说，信号往返 100 km 的距离，光是传播时延就要花费 1 ms。

如果使用场景是日常的 Web 网站浏览，这点程度的时延完全算不上问题。然而，近些年来，诸如 ITS（Intelligent Transport Systems，智能交通系统）中的事故规避等云服务，就对低时延性的要求十分苛刻，因此传播时延在这些服务中变成了问题。

在这个背景下，在以往的云计算之外，又出现了边缘计算（edge computing）的概念（图 7.6）。边缘计算通过将服务器和存储分布式部署，使得数据处理可以在用户端设备附近（网络边缘）完成。

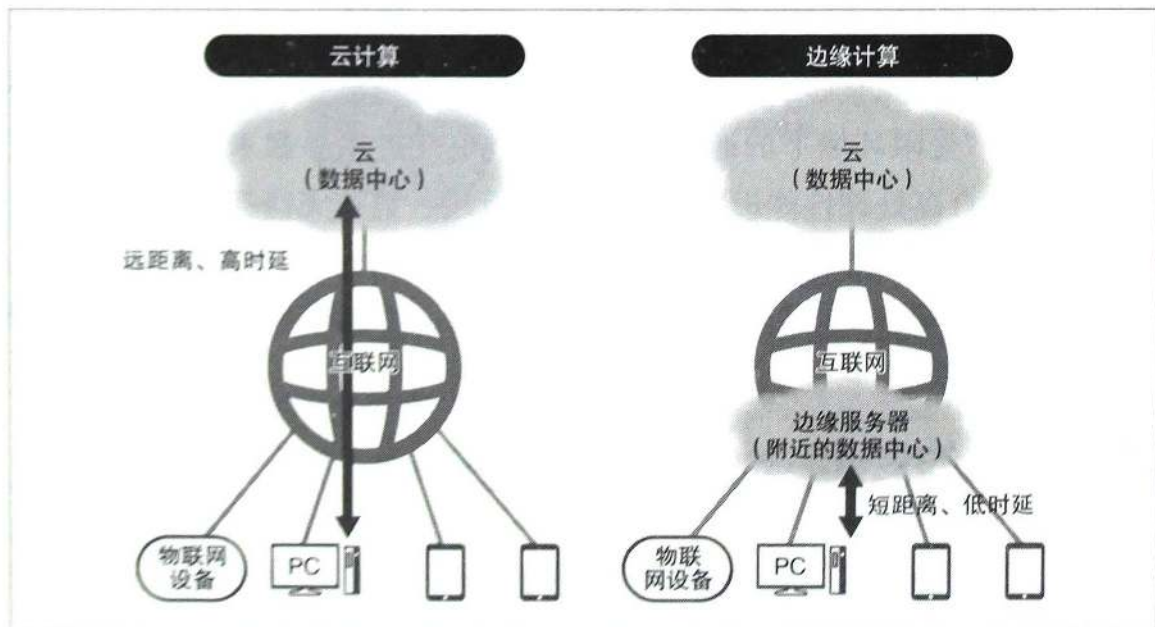


图 7.6 云计算和边缘计算的概念示意图

^① 第5章和第6章介绍的端到端时延的构成要素。

此概念在 5G 标准中也存在对应的标准 MEC (Multi-access Edge Computing, 多接入边缘计算)。与云计算不同,边缘计算由于从用户设备到连接目标的位置在地理距离上比较近,所以信号的传播时延很小,毫无疑问这非常适合对低时延性有要求的应用程序。与此同时,在边缘位置进行数据处理,显然会减少互联网的数据流量。总的来说,今后除了云服务器,边缘服务器也会经常被用作通信连接目标。

小结

本章后面的内容,将基于本节所介绍的背景知识,对以下 4 个在近年和今后都与 TCP 有关的重要事项进行详细介绍。

- 5G
- 物联网
- 数据中心
- 自动驾驶

下面,笔者将分别介绍这些内容的技术背景和社会背景,以及产生的相应问题,还有与之相关的 TCP 前沿的研究动向。

7.2

5G (第5代移动通信)

移动通信的大容量化、多设备支持、高可靠性与低时延

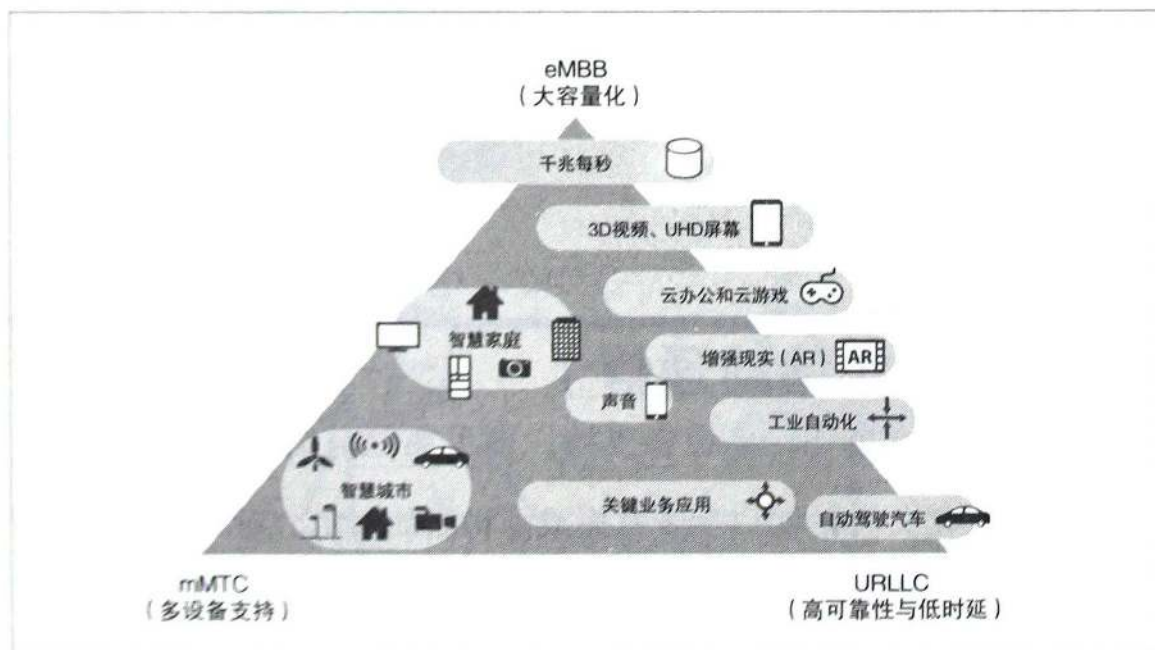
5G 标准化文档在 2017 年 5 月完成了初版的制定,与之相对的针对 5G 实用化的进程也在如火如荼地展开。TCP 在这个过程中究竟承担着什么样的角色?本节将总览 5G 相关的动向,并介绍其中正在研究的 TCP 相关的技术及其可能性。

[背景] 5G 的应用场景与走向实用的规划

移动通信系统经过大约 10 年的时间完成了进化。有关 5G 的讨论是在 LTE 开始服务的 2010 年左右开始的。在这之前, 为了实现更加高速的网络通信, 使人们可以通过移动设备享受更大容量的媒体内容, 各种各样的技术被研究和开发了出来。如今, 智能手机等移动设备进一步高性能化, 同时 LTE-Advance 标准也支持了 1 Gbit/s 的传输速度, 人们通过流媒体享受视频和音乐变得毫不费力。

于是, 业内出现了如下的讨论内容: 今后应该如何发展移动通信? 是否会有新的应用出现? 最终结果, 就是定义了如下 3 个应用场景的发展方向 (图 7.7)。

- eMBB (enhanced Mobile Broadband): 移动通信的大容量化
- mMTC (massive Machine Type Communications): 多设备支持
- URLLC (Ultra Reliability and Low Latency Communications): 高可靠性与低时延



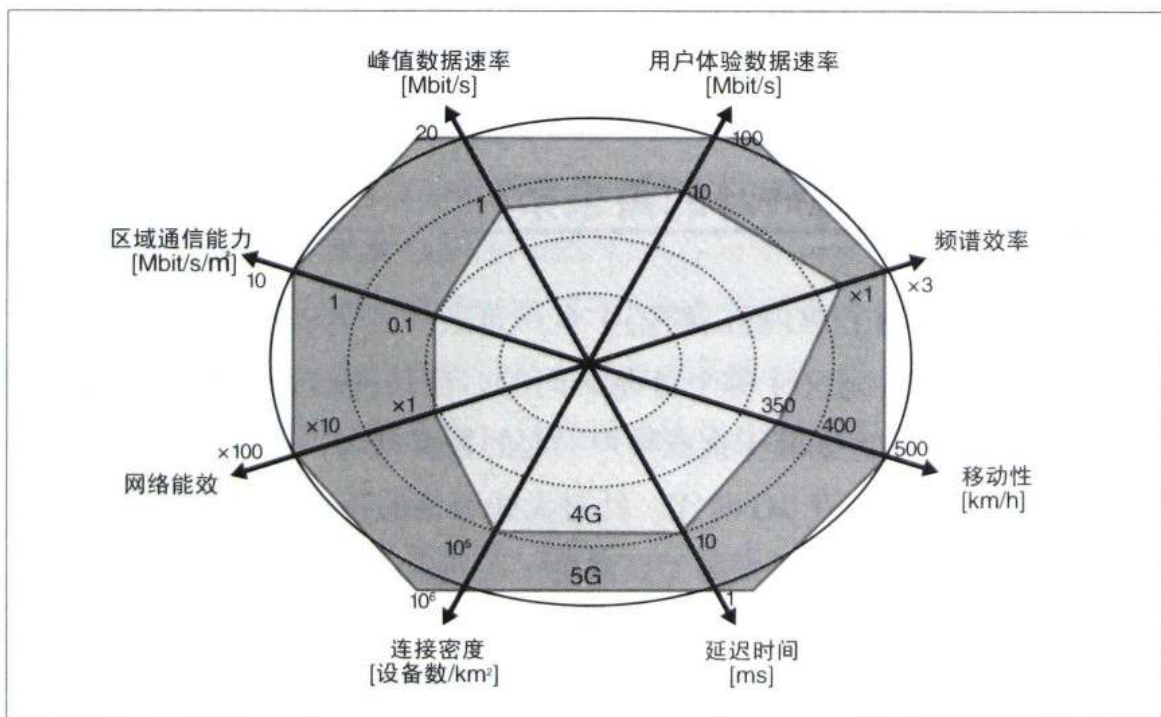
多 出处 国际电联无线电通信部门的文章《IMT 愿景——2020 年及之后 IMT 未来发展的框架和总体目标》(2015 年 9 月)

图 7.7 5G 的适用场景

eMBB 是应用程序在大容量追求方面期望进一步提升的一个方向。例如, 实现 8K (8K resolution) 视频传输等现在的设备无法实现的功能。

mMTC 则是在物联网通信设备爆发性发展的情况下, 期望能更好地支持大量设备, 并为智能社会提供帮助的一个方向。

URLLC 则是与 ITS、自动驾驶和重型设备远程操作等涉及关键任务系统新应用场景的开发相关的一个方向。为了实现以上这些方向上的发展, 业内制定了一些远超现在移动通信系统性能的高目标。例如, 10 倍的用户体验速度、100 倍的区域通信能力、10 倍的连接密度、不高于 1 ms 的传播时延, 以及对时速 500 km 的移动设备的支持 (图 7.8)。这并非意味着要同时满足所有的要求, 而是将个别的要求组合起来, 只要能通过特殊模式实现这些要求的组合即可。



※ 出处: 国际电联无线电通信部门的文章《IMT 愿景—2020 年及之后 IMT 未来发展的框架和总体目标》(2015 年 9 月)

图 7.8 5G 的需求条件

基于设定的这些目标, 业内开始了面向具体标准化的讨论和技术研讨。其成果便是 2017 年 12 月制定的初版标准文档“5G New Radio”(简称为 5G NR)。此时的 5G NR 主要是对当时的 LTE 参数进行扩展, 与此同时以未来将分配到新频段为前提, 通过重定义无线数据帧等方法实现高速

化和低时延等目标。今后想必一定会有更加先进的技术被投入实用。

与之同时,研究人员于2015年左右通过试制作设备开始了现场试验(field trial),以验证是否能满足各种各样的需求条件。在此情况下,为在2020年左右(部分提前到了2019年)实现5G服务的组建(阶段1),业界全体正全方位发力于5G实用化的开发(图7.9)。



图 7.9 5G 标准化和普及的计划

[问题] 如何应对严苛的需求条件

上文已经介绍了5G提出的若干个严苛条件。关于不高于1 ms的时延,虽然要看其是定义于哪个链路区间的,但是考虑到无线通信所特有的传输链路的变化,以及干扰或噪声引起的数据错误,这一条件可以说是极其严苛的。例如,在3G时代,针对无线通信的特点,人们专门开发了W-TCP(详见1.6节)。这是因为要满足一系列条件,就必须要有最低限度的质量保证和传输效率的改善。

5G在3个方向上给出了极为严苛的需求条件,因此可以想象到,这同样需要TCP也能以特殊的形式更好地支持应用程序和使用场景。eMBB方向预计将使用毫米波(详见后文)这种高频率的通信技术,想必其无线通信的特性会有很大变化。至于mMTC方向,则会由许多的物联网终端设备产生无线通信流量。此外,物联网设备在性能上都受限。URLLC方向的应用之一便是自动驾驶。而自动驾驶显然对低时延和可靠性都有很高的要求。

[TCP 相关动向 ①] 毫米波段的处理 新频带资源的开发

要实现大容量化,最具实现性的方法就是扩大通信所使用的频率带宽。然而,至今所使用的几百兆赫(MHz)到几千兆赫(GHz,也称吉赫)的微波频带已经没有空余可用,想要继续扩展频带显然不现实。微波频带由于其电波性质,即使基站与用户设备之间互相不可视,其电波也可以很容易地通过建筑物的反射和往返,完成通信,可以说它是非常好用的频段。正因如此,移动通信系统、无线LAN等大多数的无线通信系统使用微波频带提供通信服务,所以才会导致微波频带没有空余资源可用。

于是,5G标准要讨论的便是开发新的频带资源。一方面,毫米波^①这一高频率的频带,尚未开发的部分还比较多,资源还很富余。另一方面,与微波频带不同,毫米波的衰减较强,且通信距离很短,因此并不适合移动通信。要想延长通信距离,就必须收束电波的发送范围,使用指向性高的天线,但这样就无法利用反射电波,假如收发双方互相不可见,就很难相互通信。不仅如此,当设备移动时,其电量功耗等级的变化也比较剧烈,从通信的稳定性来看也存在问题。

图7.10展示的是微波频带(2 GHz)和毫米频带(60 GHz)在频率不同的情况下,功耗等级的变化情况。接收设备模拟的是朝着远离发送站的方向以一定的速度移动的情形。只将频率从2 GHz提升到60 GHz,接收功率就会大幅下降。

这里用 f_c 表示载波频率,用 c ($\approx 3 \times 10^8$)表示光速,用 d 表示收发双方距离,那么衰减随电波距离变化的公式如下所示。从公式可以看出,衰减量随着频率的平方而大幅增大。

$$\text{Loss} = \left(\frac{c}{2\pi f_c d} \right)^2$$

① 在国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)的分类中被称成极高频(Extremely Highly Frequency, EHF),指的是30 GHz到300 GHz频率的电波,根据这一定义,前面介绍的微波频带也包含极高频,但是人们通常把3 GHz到30 GHz的超高频(Super High Frequency, SHF)称为微波。

此外，频率与波长 λ 有以下关系，

$$f_c = \frac{c}{\lambda}$$

即，频率越高波长越短，因此在同样的范围内移动时，频率越高的设备更容易受到接收功耗等级变化的影响。虽然通过调整无线信号的时间长度等参数可以一定程度缓解这个影响，但对有些应用程序来说，可能还是需要全面性的适配与优化。例如，可以考虑像 1.3 节介绍的 QUIC 那样，设计传输层以上的协议。

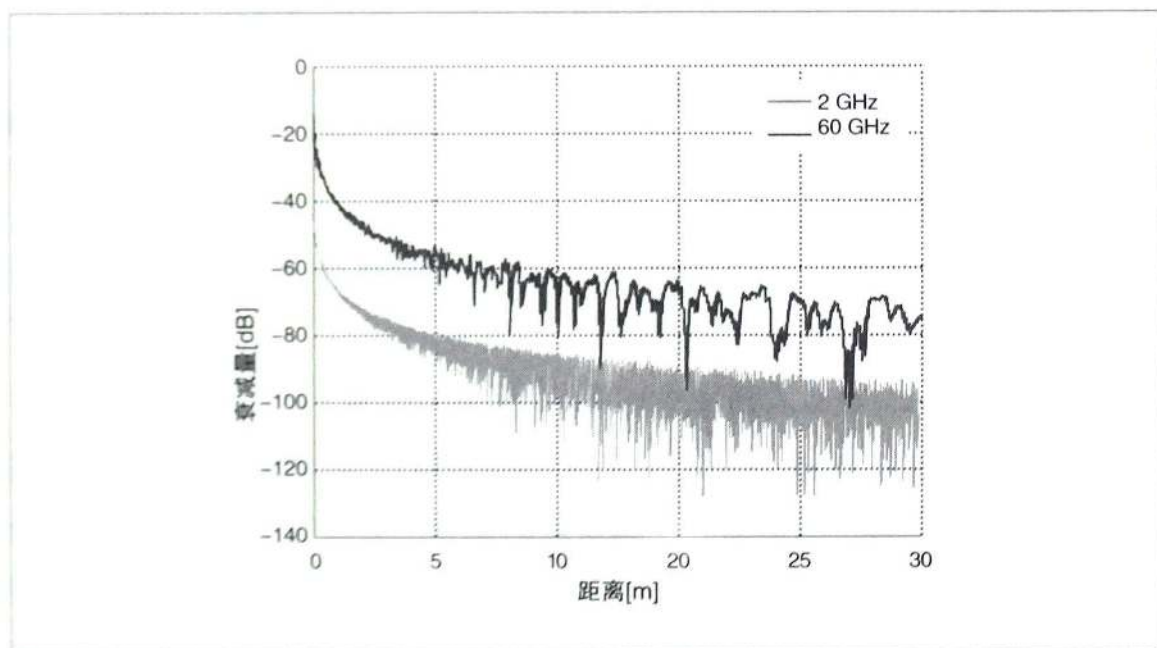


图 7.10 频率不同导致的接收功率的变化

[TCP 相关动向 ②] 多路径 TCP 通过一个 TCP 连接使用多条链路

多路径 TCP (multipath TCP, MPTCP) 是指经过扩展之后，可以通过一个 TCP 连接使用多条链路的技术。此标准定义在 RFC 6824 中。

该技术具体来说，就是先建立多个名为 subflow 的 TCP 连接，并将这些连接在更高层次统一用一个 TCP 连接管理起来，拥塞控制则以 subflow

为单位进行。例如,一个通信终端支持 LTE 和无线 LAN,此时会将这两条链路以 subflow 的形式管理,使用 TCP 来进行通信。

同样的,1.6 节介绍的 SCTP 也是一种使用多条链路的 TCP。与多路径 TCP 不同的是,SCTP 是新定义的算法,因此应用程序需要针对此协议进行一些修改。而多路径 TCP 只是将多个连接在逻辑上虚拟成一个单一的 TCP 连接进行管理,因此应用程序只要将其当作以往的 TCP 进行处理就可以了。

图 7.11 展示的是一个使用了 LTE 和无线 LAN 这两种无线通信方式的多路径 TCP 的例子。最近,配备多个以太网接口的 PC 在增多,而同时拥有移动网络和无线 LAN 等多个通信接口的移动设备也在增多。通过同时使用多条连接,不仅可以增加通信带宽,而且可以在部分链路连接速度降低或者连接断开时继续通信。因此,对于依赖于环境的无线通信,可以说多路径 TCP 的作用十分巨大。

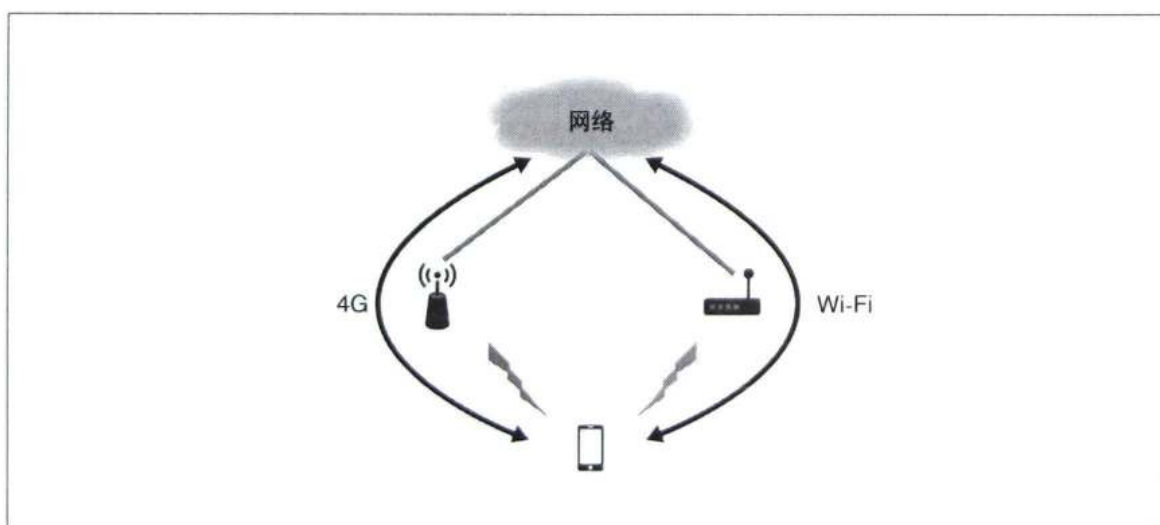


图 7.11 多路径 TCP

5G 并非是要完全替代 4G,现阶段其设计的方向是活用双方的特点,让双方能够共存。因此,标准定义了能让两者共存的网络形态。这称为双连接 (Dual Connectivity, DC) (图 7.12)。像这样同时使用 4G 与 5G 网络的多路径 TCP 的实用性也在近年的研究中被证实。