

网络时代的三大基本定律与骨干网容量的演进

韦乐平

(信息产业部电信研究院, 北京 100083)

[摘要] 文章首先分析了新时期的巨大挑战及其对网络的深远影响, 特别指出了网络面临的巨大容量压力。接下来分别就主宰网络时代的三个基本定律: 摩尔定律、光纤定律和迈特卡尔夫定律的内涵、影响和技术极限进行了论述。最后探讨了骨干网传输链路、传送节点和业务节点的容量演进策略。

[关键词] 网络; 容量; 骨干网

1 新时期的挑战

当前, 人类社会正进入一个前所未有的信息时代, 而信息时代的一个基本特征就是信息爆炸和信息技术革命。从历史上看, 信息技术革命的诞生是计算机芯片能力按摩尔定律发展的结果。长期以来, 网络只是计算机的附属物, 主要完成计算机的互联作用。时至今日, 关键的革新力量已经开始转移到网络方面来, 网络技术正成为信息时代的核心技术。特别是近年来, 以因特网为代表的新技术革命正在深刻地改变传统的电信概念和体系, 其迅猛发展的速度是人类历史上所有工业中最快的。全球的因特网业务量几年内将超过话音业务。100多年来始终占据绝对主导地位的话音业务将最终让位给数据业务。从我国的具体国情分析, 预计今后五六年全网的数据业务量也将可能会超过话音业务量, 传统电话网将不可避免要过渡到以数据业务特别是IP业务为中心的融合的下一代电信网。

新时期网络所面临的首要挑战就是容量。近10年来, 全世界电话用户的平均年增长率为6%左右。然而, 数据业务的平均年增长率高达25%~40%, 远高于电话业务。特别是IP业务正呈现爆炸式增长态势, 年增长率达三位数。其次, 从核

心网角度看, 由于网络高生存性要求, 需要多消耗额外容量。从接入网看, 由于一系列宽带接入技术的应用, 使接入速率增加了数十至数百倍, 导致核心骨干网上的业务流量大大增加。再有, 在网络业务组成中将占主导地位的IP业务量的分布模式, 将使未来的网络业务量分布大幅度向核心网转移, 进一步加剧了骨干网容量需求的压力。而且, IP业务量的高度不确定性使不同路由器的负荷会随时发生变化, 造成网络资源利用的高度不平衡。此外, 日益廉价的带宽正在刺激大量宽带新业务和新应用的产生, 诸如IP视频业务、高清晰度电视(HDTV)和虚拟现实(VR)等, 有些特殊的宽带业务甚至需要高达1 Tb/s以上的数据速率。最后, 在未来骨干网上, 用带宽换服务质量的轻载网络策略随着网络IP业务量份额的日益扩大和带宽成本的迅速降低正赢得越来越多的支持, 那将需要更大更宽松的网络带宽。

综上所述, 预计未来10年, 骨干网所需的容量将是现有的数十倍甚至上百倍, 容量问题将成为21世纪网络的最大挑战, 超大容量将成为下一代网络的基本特征。

2 网络时代的三大基本定律

世界上任何领域都有其内在的基本发展规律,

[收稿日期] 2000-11-01; **修回日期** 2000-12-18

[基金项目] “八六三”高技术计划资助项目(863-317-04-04-99)

[作者简介] 韦乐平(1940-), 男, 浙江杭州市人, 信息产业部电信研究院教授, 博士生导师

网络的发展是有规律可循的，而且人们从各自的角度已经总结出了大量网络发展的内在定律。在众多的定律中，决定网络未来发展态势的基本定律主要有三个，即摩尔（Moore）定律，光纤定律和迈特卡尔夫（Metcalfe）定律。摩尔定律展示了电子系统的发展规律和潜力，光纤定律又称超摩尔定律，揭示了光层面上带宽的扩展趋势与发展潜力，迈特卡尔夫定律实质上是一个联网（包含电层联网和光层联网）定律，阐述了真正网络本身的发展规律与潜力。严格说，这些所谓定律并非是数学或物理定律，没有直接的物理基础，而是人们从技术发展中所总结和推测出来的社会经济发展规律，反映了技术进步和市场压力所引起的技术能力的指数增长。在未来 10 年的时间内，这些基本定律还将继续代表着网络的发展方向 and 进程。

3 摩尔定律及其极限

所谓摩尔定律是美国 Intel 公司的创立者摩尔在 20 世纪 70 年代所观察到的一个有趣的规律，即单位面积上硅集成电路的器件数大致按 18 个月翻一番的速度发展^[1]：

$$y(T) = y(T_0)2^{(T-T_0)/18} \quad (1)$$

式中： T_0 表示起始时间， $T - T_0$ 单位是月， $y(T)$ 表示 $T \geq T_0$ 时的器件密度。尽管人们一次又一次地对其适用性发出疑问，但从 1965 年以来直至今日，单位面积上硅集成电路的器件数一直约按 18 个月翻一番的速度发展。这一规律导致 35 年间半导体器件密度增长了近 1 000 万倍。

从历史看，微电子工业基本按 3 年一代，线宽减少 70 % 的规律发展，目前是 $0.18 \sim 0.25 \mu\text{m}$ ，以下是 $0.13 \mu\text{m}$ ， $0.09 \mu\text{m}$ ， $0.06 \mu\text{m}$ ，2012 年将达到物理尺寸极限 $0.05 \mu\text{m}$ 。按目前工艺水平制作 DRAM 器件，单个芯片可包含几亿个晶体管，若制作微处理器，每个器件可包含 1 000 多万个晶体管。按目前的发展速度，预计在 2011 年能生产包含 10 亿个晶体管的芯片。

沿着摩尔定律发展，微电子加工尺寸和器件尺寸的缩小究竟有无极限？从加工技术的极限看，主要受限于光刻工艺的精度。普通光刻技术只能用于 $0.13 \mu\text{m}$ 以上工艺，下一步需要利用深超紫外线或 X 射线。现在看来，这一极限在近期内不会影响芯片的进步。从器件结构的某些物理本质看，则器件尺寸缩小到一定程度后，确实会遭遇到某些难以克

服的困难，诸如强场效应、量子隧道效应、掺杂原子的统计涨落、互连延时等等。实际上，这也是当前人们普遍以 $0.05 \mu\text{m}$ 作为极限尺寸的主要原因。上述限制有可能改变今天硅芯片以 CMOS 为基础的局面，使人们转向其他替代产品，其中低维结构信息功能器件和电路就是潜在的替代产品之一。当然，真正实现纳米信息功能器件和电路还有很长的路要走，但这将是一次对传统集成电路工艺的革命。

除了上述工艺技术限制外，摩尔定律还存在经济限制问题，有人称为摩尔第二定律，即每代芯片成本是前一代的两倍。目前 $0.25 \mu\text{m}$ 生产线需要 20 亿美元， $0.18 \mu\text{m}$ 生产线大约需要 30~40 亿美元，按照这一增长趋势，10 年后的生产线需要大约数百亿美元，构成摩尔定律的经济限制。综合考虑工艺技术限制和经济限制后，以摩尔定律为基本发展规律的传统硅芯片集成电路工艺的发展，至少可以持续到 2012 年，仍然有十几年的时间继续享受摩尔定律所带来的巨大发展潜力和利益。届时，如果纳米信息功能器件和电路有突破性进展，则还有希望沿一条全新的发展轨道继续快速前进。

4 光纤定律及其极限

在因特网时代，骨干网的带宽需求目前大约是 9 个月翻一番，远高于摩尔定律所遵循的发展速度。由摩尔定律所限定的电子系统发展速度已经成为网络整体发展的瓶颈层面。唯一的出路是将目光转向光层面。从而彻底摆脱电层面及光电转换所引起的技术限制。

根据光通信容量的发展历史，可以发现近 10 年来光带宽的翻一番速度大约是 16 个月，快于摩尔定律。近几年，由于波分复用技术的发展导致光带宽的增加速度明显加快，达到 9 个月翻一番的程度，远高于摩尔定律。由摩尔定律所限定的电层技术（包括 SDH，ATM 和路由器）的发展速度，已经远远落后于光层技术的发展速度。如果，按比较稳妥的 12 个月翻一番的速度计算，则光纤定律为：

$$y(T) = y(T_0)2^{(T-T_0)/12} \quad (2)$$

按照这一公式，可以算出 10 年后光带宽需求可能达到目前的 1 000 倍，技术上能否支持还是一个未知因素。下面讨论光层的容量极限问题。这不是一个理论计算问题，而是一个需要综合考虑光纤可用光谱、单波长最大传输速率、容许的最小波长

间隔等因素后才能有结论的技术问题,而且随着技术的突破有可能有新的结果。首先,波分复用系统的可用波长范围按目前ITU-T的最新规范和讨论意见^[2],大约共有415 nm可用光谱,相当58 THz(按50 THz计)。第二个要考虑的因素是单波长的最大传输速率。从理论上讲,单路波长的传输速率主要受限于集成电路硅材料和砷化镓材料的电子迁移率。其次还受限于传输媒质的色散和极化模色散。最后还受限于所开发系统的性能价格比和商用经济价值。尽管目前有人在进行160 Gb/s速率的试验,但还看不到实用化的前景,因而暂且以40 Gb/s作为单波长的最大传输速率。第三个要考虑的因素是容许的最小波长间隔,这一参数不仅与传输的信号速率密切相关,而且与现有的光源和滤波器特性密切相关。随着技术的进展,最小波长间隔也在不断缩小。理论上,一个光信号的真正信息带宽大约为传输比特速率的两倍,然而光滤波器不具有理想的平直特性和绝对稳定性,光源也同样不具有绝对稳定性,因而实际系统设计的最小波长间隔通常都远大于传输比特速率的两倍。从保守的角度看,假设2.5 Gb/s, 10 Gb/s和40 Gb/s的最小波长间隔至少应为传输比特率的10倍、5倍和2.5倍,则对2.5 Gb/s, 10 Gb/s和40 Gb/s来说,其总的传输容量可分别到达5 Tb/s、10 Tb/s和20 Tb/s左右。

随着技术的进一步突破,频谱效率还有可能提高,这一技术容量极限则还有可能进一步扩展。根据香农定理,信息容量 C 可以表示为^[3]:

$$C = B \cdot \lg(1 + S/N) \quad (3)$$

其中: B 为通路带宽, S/N 为信噪比。从公式(3)可以看出,频谱效率(C/B)随信噪比的增加而增加,因而只要信号功率容许增加,则频谱效率就能改进。然而信号功率不能无限制地增加,最终受限于光纤的非线性。假设为了保证必要的误码率, S/N 为100,则由式(3)可以算出,理论上光纤可以传输的容量上限可达350 Tb/s。实际上,随着信号功率的增加,光纤非线性的影响将成为最终限制通路容量的因素,因而目前并没有充分的理论依据可以证明上述最大容量是可以达到的。比较合理的光纤容量的技术上限可以认为在20 Tb/s左右。这样,通常包含数十根光纤的光缆容量可以达到拍它量级。可见,就目前可以预见的技术发展趋势,传输链路的容量已经基本实现突破,焦点将集

中在网络节点容量上。

5 迈特卡尔夫定律及其极限

所谓迈特卡尔夫定律表述为通信网络的价值与用户数平方成正比,设用户数为 N ,网络价值为 V ,则

$$V \propto N(N-1). \quad (4)$$

上述 $N(N-1)$ 实际上是 N 个用户之间的最大可能连接数。这个公式可以导出三个以上的重要结论。**a.**以前未实现联网时设备数(例如计算机数)增加 N 倍,通信效率也只增加 N 倍。而实现联网后设备数增加 N 倍,通信效率将增加 N^2 倍, N 值越大通信效率越高,通信网络的价值也越大,是一个良性正反馈过程。这一结论表明无论是电层还是光层,只有实现联网的通信网,价值才能达到最大化。**b.**当 N 值较小时,通信网络的价值很小,而通信网络特别是大型电信网需要覆盖的区域很大,网络建设的初期投资通常很大,早期有能力承受高资费的用户很少,这样,就在新网络投入应用时,给网络提供者和用户施加了沉重的负担和风险。为此,新网络特别是大型网络的建设需要仔细规划和全面考虑,进行充分的现场技术、业务和用户需求试验,否则,就有可能失败。电信史上已有不少这样的失败示例,如可视电话和B-ISDN业务。而传真业务和因特网的发展则是成功的例子。**c.**由于网络的连接数按 N^2 关系增长,因此网络通信所需要占用的带宽也按指数关系增长。当点到点通信所需的带宽很大(如视频业务)或 N 值很大或两者都变得很大时,网络通信所需要占用的带宽将会持续地无限制地增长,造成网络带宽的巨大需求和压力。

从原理上看,迈特卡尔夫定律本身是有限制的。从网络技术的角度看,这种一对一通信的方式可以有两种基本实现技术,即面向连接的电路交换方式和无连接的包交换方式。无连接包交换网对连接是透明的,因而其包转发只需维持很少的状态信息,网络节点的工作负荷降低很多,非常适于非对称的突发数据业务的传输。显然,网络中数据业务量成为主导后,从传统的面向连接的电路交换技术逐步转向无连接包交换技术,特别是无连接IP技术为基础的整个电信新框架将是历史的必然。

6 骨干网容量的演进

骨干网的宽带化涉及传输链路,还涉及传送节

点和业务节点，每一环节受限都会影响整个网络的容量演进，必须要有全面的解决方案。下面探讨每一环节的容量演进策略。

6.1 光传输链路的容量演进

从技术上看，光传输链路的容量主要有两条扩容路线，一条是按时分复用（TDM）方式扩容，另一条是按波分复用（WDM）方式扩容。如前所述，单波长的传输速率上限目前认为 40 Gb/s 是比较实际的最高实用化速率。

光纤的全部可用带宽资源仅仅利用了不到 1%，如果采用波分复用技术，则可以使容量迅速扩大数十倍至数百倍。目前除了 320 Gb/s (32×10 Gb/s) 系统已经大量投入现场业务外，1.6 Tb/s (160×10 Gb/s) 已经开始商用，实验室则已完成了 7.04 Tb/s (176×40 Gb/s) 的试验，揭示了 WDM 技术的巨大发展潜力。根据目前的技术水平，实用化的最大传输链路容量 5 年内可能达到 5~10 Tb/s，再考虑光缆内光纤芯数的因素，单根光缆的总容量可以达到 1 Pb/s。可见网络的容量将不再受限于传输链路。

6.2 传送节点的容量演进

目前网络的大容量传送节点主要指数字交叉连接设备（DXC），按照骨干网容量的增长速度，按 12 个月翻一番的速度估计，那么 2005 年每一节点的总容量将超过 5 Tb/s。于是问题的焦点集中在技术上是否有合适的、经济的高容量传送节点的解决方案？

目前电信骨干网的传送节点主要有两类，一类是目前正在应用的 SDH 电传送节点（分插复用器 ADM 和数字交叉连接器 DXC），另一类是光传送网（OTN）节点（光分插复用器 OADM 和光交叉连接器 OXC）。

6.2.1 SDH 电传送节点的容量演进 多年来 DXC 的容量一直在扩大，目前已达 160~320 Gb/s，其容量演进主要通过持续的半导体芯片密度和性能的改进来提高节点的容量。然而由于 DXC 系统的复杂性，其系统开发和改进的速度要慢于半导体芯片性能改进的摩尔定律，其节点容量大约为每 2 年翻一番，显然无法跟上网络传输链路容量的增长速度。而且其实现难度和成本越来越高，唯一的出路是转向光传送节点，靠光层面上的波长连接来解决节点的容量扩展问题。这样，其带宽颗粒从 VC-4 增加到一个波长，同样 1 000 个端口的单个节点

容量，可以从 160 Gb/s 增加到 2.5 Tb/s、到 10 Tb/s 乃至 40 Tb/s。

6.2.2 OTN 光传送节点的容量演进 普通点到点波分复用通信系统尽管有巨大的传输容量，但为了将其所提供的巨大原始带宽转化为实际组网可灵活应用的带宽，需要在传输节点处引入灵活光节点，实现光层联网，构筑所谓的光传送网，即实现从传统 WDM 走向 OTN 的转变和升级。目前，具有固定波长上下的 OADM 已经商用，具有软件可配置的 OADM 也即将商用，而 OXC 尚处于试验和现场实验阶段，主要问题是尚未有性能价格比好、容量可扩展、稳定可靠的光交换矩阵，核心是光开关。

从原理上，光开关有三类：电光开关，热光开关以及光机械开关。但综合性能都不够理想。近来，一种称为微电子机械开关（MEMS）的新型光开关显示了巨大的发展前途^[4]，这是一种将自由空间互连与硅基单片集成技术相结合的新技术，这种机电一体化的开关器件结合了机械光开关和固体波导开关的特点，结构紧凑，集成度高，性能优良，矩阵规模大，便于批量生产，正成为实用化大型 OXC 的主要开关技术之一。例如，美国朗讯公司采用 MEMS 技术实现了 256×256 的全光交叉连接器，称为波长路由器，可节约 25% 的运行费用和 99% 的能耗。美国 Xros 公司，利用两个相对放置的各有 1 152 个微型镜面的阵列，实现了 $1\,152 \times 1\,152$ 的大型 OXC，容量上和端口上都有重大突破，其总容量已经比传统 DXC 提高了约两个量级。除了硬件外，光节点还有大量的软件工作，例如，光层联网还需要解决稳定的高效恢复算法和控制信令以及与业务层的交互和协调等一系列技术问题，才能真正实用化。

6.2.3 业务节点的容量演进 一旦传送链路和传送节点的容量有了突破，网络的容量瓶颈将开始转移到业务节点。目前业务节点的种类很多，主要适用于核心网用的节点有 ATM 交换机和 IP 路由器。前者由于硬件投资高，ATM 的分段和组装（SAR）功能随着接口速率增加而变得十分复杂困难，速率难以提高，节点容量扩展性受限，目前正转移到网络边缘。于是业务节点容量的突破将寄希望于路由器。

传统的路由器是用软件来负责选路和转发的，速度慢，延时大，无法满足网络发展的需要。近来通过硬件体系结构的改进，从单总线、单 CPU 发

展到多总线、多 CPU 和交换矩阵,采用 ASIC 用于包转发和路由表的查寻,以及第 2 层交换与第 3 层选路的一体化,不仅处理能力和吞吐量有了很大进展,而且可以基本保证服务质量,转发分组延时也已降至几十微秒量级,不再是大问题。此外,路由器工作在无连接方式;因而可以同时从层 1、层 2 和层 3 彻底消除 N^2 问题。然而,IP 业务量的增长是指数式的,现有的 IP 网络基础设施每隔 1~2 年就需要全面升级换代一次,IP 网络运营者已无法忍受这样频繁的网络升级换代,要求开发能够可持续发展的新一代高性能超大容量路由器,各种设计的太比特路由器应运而生。但是,实际系统的单机架吞吐量不超过 160 Gb/s,靠多路由器端口互联来继续扩容至太比特。另外,其节点容量扩大时,端口成本迅速上升。简言之,这一代高性能路由器的容量和性能仍不能满足未来网络扩展性的要求,需要进一步探究可以经济持续扩容的有效途径。方法之一,是将路由器的单级交换结构扩展为多级结构,通过互联多个较小的交换单元来制造大型的可扩展的交换矩阵。方法之二,是采用创新的设计思想,例如,采用分布式交换矩阵和多维光互联背板,就有可能提供巨大的交换容量、线路容量、端口密度和线速转发分组能力。方法之三,是在网络中引入具有灵活疏导业务量能力的 OADM 和 OXC,可以从光层旁路掉不在本地下路的大量业务量,从而减轻了路由器所要处理的业务量,既提高了业务节点的效率,又降低了对业务节点规模的要求。总之,作为核心业务节点的实用化高性能路

由器的容量和性能还有待突破性进展。

7 结语

骨干网的容量已成为下一代网演进的关键因素,目前光传输链路的容量突破已见曙光;电传送节点的容量正在继续扩大,但增长速度受限,难以满足长远的发展需要;光传送节点代表了传送节点容量突破的希望;业务节点中路由器最有希望成为下一代网的主要核心业务节点,但仍有很多问题需要妥善解决;整个核心骨干网将在未来 5 年左右发展成为所谓的 3 T 网络,即传输链路、传送节点以及业务节点都具有太拉量级的巨大容量,从而可以为下一代电信网提供巨大的网络带宽,保证可持续发展的网络结构、容量和性能以及廉价的成本和支持当前和未来的任何业务和信号。

参考文献

- [1] Viterbi A J. Four laws of nature and society [M]. Wireless Communications: Signal Processing Perspectives. Prentice Hall, 1998. 380~392
- [2] ITU-T Q. 16/15 (Rapporteur). Report of the ITU-T Q. 16/15 Experts Meeting [R]. ITU-T Q. 16/15 Experts Meeting, September, 2000. 1~14
- [3] Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. BSTJ, 1948, 27(3): 379~423, 27(4): 623~656
- [4] Lin L Y. Free-space micro-machined optical switches with sub-millisecond switching time for large scale optical cross connects [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(4): 525~527

Three Basic Laws for the Network Era and Capacity Evolution for Backbone Networks

Wei Leping

(China Academy of Telecom. Research, Beijing 100083, China)

[Abstract] First this paper described the great challenge from the new era and its impacts on networks and indicated the huge capacity pressure faced by networks. Then, the paper discussed implications, effects and technical limits for the three basic laws which guide network era such as Moore's Law, Optical Fiber Law and Metcalfe's Law. Finally, the paper presented capacity evolution strategies for transmission links, transport nodes and service nodes in backbone networks, respectively.

[Key words] network; capacity; backbone network