

1

通信网络系统概论

1.1 引 言

在近二十年中,通信技术得到了飞速发展。无论在有线通信领域,还是在无线通信领域,人们经历了从模拟通信到数字通信的巨大转变。现在通信技术正面临着从宽带传输转向超宽带传输的发展过程,从单一的业务服务转向多媒体业务服务的转折。同时,通信的目的也不再是为了完成单一的信息传递功能,而伴以移动计算、信息监控、信息重组等多项附加功能。因此,系统地了解通信技术的基本理论和基本概念变得越来越重要。本书的上册简单地介绍了通信系统的大系统与网络化概念,其侧重点在于讨论通信的信息与传输理论。本册将重点介绍通信网络理论,包括网络的构成与分类、各种网络的特点与应用、网络通信的关键技术及其性能分析、相关学科的近期发展及其对网络技术演进的影响。

1.2 网络技术的发展历程

现代通信网络的主要功能除了要能够提供语音、数据、图像、文本等这些传统的多媒体业务传输外,还需要提供流媒体传输、信息搜索与监控、信息的分类剪裁与重组、信息的智能化计算等多种新功能。信息通信已成为当今社会人们日常生活的一个重要组成部分,它已从传统意义上的信息传递工具变为人们日常生活和工作的必需品,如同衣、食、住、行一样重要。回顾整个通信发展的历程,人们可以从不同的层面描述它。在上册,我们从系统发展的角度重点介绍了通信的信息与传输理论发展历史中一些里程碑的工作。在本书的这一节,我们将重点介绍通信网的相关发展。

关于数字通信网,最早的商用通信网是 1962 年在美国芝加哥建立的贝尔数字电话系统。此系统采用了 T1 标准,即在贝尔电话局间的铜芯电话线上传 24 路数字话音。不久之后,升级为 T3 模式,每个 T3 系统能传输 28 个 T1 信号,即支持 $672(24 \times 28)$ 路电话。在 1970 年前后,出现了 ARPANET 和 TYMNET 等数据通信网,它们主要用于传输计算机数据,其支撑技术是数据包交换(类同于邮件传递系统,将数据拆分成包来处理)。与采用 T1 和 T3 系统的电话网络(以分配线路给用户的方式实现信息传递)不同,包交换技术主要用于支持数据业务,它至今仍是数据网络的基础。在包交换网络广泛安装的同时,国际通信联合标准化委员会 ITU-T 推出了 X.25 建议书。X.25 标准建议书主要是规范定义个人计算机与网络设备的通信规程和传送数据到其他联网的计算机的操作协议。之后,X.25 成为被广泛应用的工业标准。在 1980 年前后,不同类型的数据网开始陆续出现,例如局域网,越来越多的网络通过网关和网桥相互连接,以使得一个网络用户可以向另一个网络用户传送数据。事实上,一个大的网络可以看成由多个子网组成。子网的类型可能是局域网、城域网或专用网等。局域网能提供低代价、高容量的信息通信,它能在联网的各计算机或用户间实现可靠的分布式网络计算、信息交换(如传送电子邮件),这样就极大地提高了工作效率,因此在较短的时间内就得到迅速普及。当然,网络技术的发展主要的推动力来自超大规模集成电路(VLSI)的技术革命。由于这一技术的不断发展使得以计算机为核心的电子设备的成本不断大幅度降低,从而使其得到广泛的应用。与此同时,移动通信技术也得到较大发展,出现了人类有史以来的第一代地面模拟移动通信网络,宽带与超宽带的光纤传输网和卫星通信网络等也得到了快速发展,Aloha 和时隙 Aloha 接入技术就是此时发展起来的。进入 1990 年,综合业务数字网的概念被提出来,人们期望能在一个统一的通信网络上提供多种不同的业务,然而它的发展并没有像人们预期的那样,直到今天这种网络模式也没有实现。与此同时,第二代地面移动通信网络被广泛铺设,移动通信从此进入到数字通信的时代。在计算机通信技术领域,Internet 互联网络也在 1990 年前后出现了,它是以 IP 协议簇作为基本的技术,IP 协议是一种完全的非面向连接的信息转发协议。

今天,网络用户之间可以通过局域网进行通信,也可通过网关或网桥在一个广域网内与另一个局域网内的用户进行通信。在广域网内长距离的通信可以通过卫星通信网、地面的微波通信网或光纤传输网等实现。对于移动用户而言,在大部分地区,蜂窝移动网络均与地面的公共电话网相连,用户可以很容易进行话音和短数据信息通信。处在建筑物内的移动用户也可以通过无线局域网实现通信。

在通信技术的发展历程中,国际标准化组织(ISO)在通信技术的发展和推广应用中扮演了重要的角色。其中,国际标准化组织提出的 OSI 标准模型(开放系统互联模型)对计算机互联通信的普及起到至关重要的作用,它允许在不同制造商生产的计算机之间进行通信,只要这些计算机的通信协议服从 OSI 互联标准的协议。

1.3 通信网络的分类

通信网络的分类方式是很多的。按传输介质分主要有无线网络和有线网络。按网络的用途或覆盖面积又分为：骨干网、城域网、局域网、专用网和家用网。其中后三者称为私有网络，主要面向个人家庭或某一个社会集团，而其他网络都是服务于公共社会的。骨干网主要是指用于国际联网或国内主要城市之间的联网；城域网指在一些大城市内各个城区之间的联网；局域网的应用相对较广，可以建立在一个工厂内或一个学校内，主要用于不同部门之间的联网，覆盖面积相对较小，有时采用无线局域网，其覆盖面积更小，覆盖半径大约在 50m 至 100m 之间。专用网是一些特殊行业或部门之间的联网系统，如金融和银行系统拥有自己的专用网络。家用网是一种近年才引起重视的网络，主要用于家庭或办公室各通信设备之间的联网。

按网络的服务类型又分为电话网、数据网、广播电视网、电报网等。按采用设备的类型可以分为微波通信网、地面蜂窝移动网、公用电话网、卫星通信网、光纤通信网。按网络资源分为固定网络和移动网络。近年随着信息技术的迅速发展，网络划分又出现了按信息的播送方式的划分模式，它可以概括为单播、组播和广播三种模式。所谓的单播，就是一个联网用户通过网络将信息发送给一个特定的网络用户或终端；组播就是一个联网用户通过网络将信息发送给一组选定的网络用户；而广播模式就是一个联网用户通过网络将信息发送给所有的联网用户或终端。

为了从理论上更好地描述和设计网络，人们常采用拓扑结构对网络进行划分，这样可以避免许多网络设计中的细节问题，从而使网络的实际物理实现与网络性能的分析可以相对独立进行。网络拓扑的本质就是利用图论技术将网络抽象化，并且使其表现形式更形象化。实际网络中的每个终端设备、交换设备和工作站都被抽象为拓扑图中的节点，网络设备间的物理连接线被抽象为拓扑图中的边。此时，原来非常复杂的物理网络就简化为非常形象的拓扑图。按照网络的拓扑图，网络可以划分为格状网(mesh network, 又称网状网)、星状网(star network)、线状网(bus network)、树状网(tree network)和环状网(ring network)。具体结构参见图 1.1。

事实上，每种拓扑都有各自适应的应用环境，其优缺点也非常分明。在通常情况下，采用如下的指标对它们的性能和功能进行评估。

- (1) 网络的流量(throughput)；
- (2) 最大传输距离(maximum distance)；
- (3) 网内容纳的最大站数(maximum number of stations)；
- (4) 对连接线和设备失效的抗毁能力；
- (5) 信息传输延时；
- (6) 安装和维护费用。

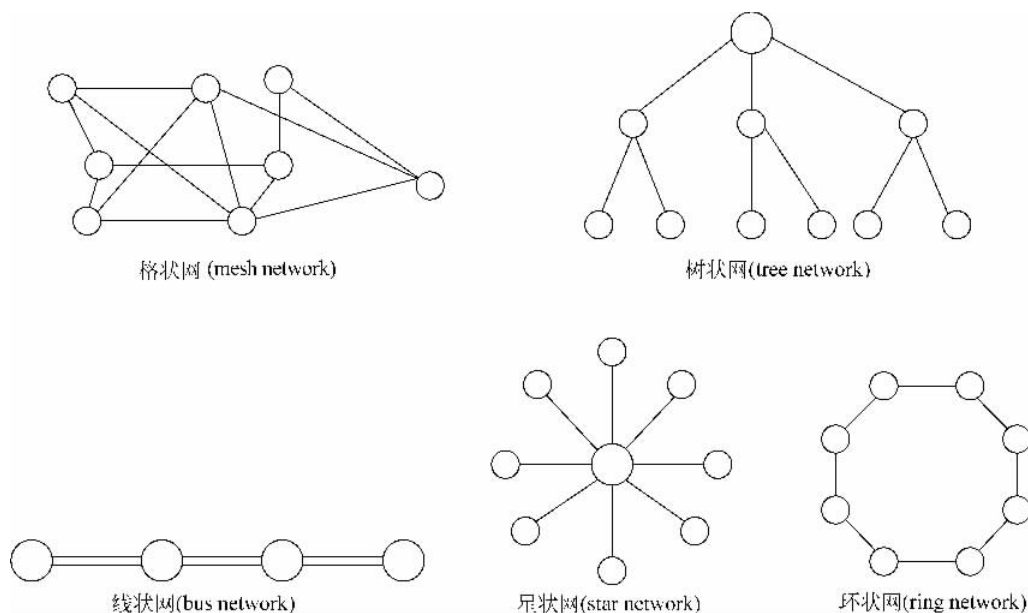


图 1.1 各种网络的拓扑图

1.3.1 格状网

格状网通常用于信息交换机之间的长距离数据传输。对于具有 n 个节点的格状网，要在任何两个节点之间直接建立连接线，那么需要的连接线数为 $\frac{n(n-1)}{2}$ 。通常情况下，不可能采用这种连接方式。格状网的网络的流量主要由传输介质和交换节点的容量决定。而信息的传输距离可以扩张到非常大，网络中所容纳的节点数(站数)可以达到由最大容量和信息报头地址域联合限定的最大数目。在对连接线和设备失效的抗毁能力方面，格状网具有天然的优势，因为从一个节点到达另一个节点的路径可能有许多条，一旦事先选定的路由上有节点或连接线出现故障，那么可以利用替代路由绕开出现故障的节点和线路进行信息传递。在传输延时方面，格状网的传输延时可能较大。这主要是因为长距离传输提供的可行的有效数据率相对较低，并且由于穿越的中间节点数相对较多，每个中间节点因为其流量的限制可能在信息存储转发过程中出现信息队列排队或信息包的重传。一个格状网的安装和维护费用可以通过消除冗余的连接线进行优化。

1.3.2 星状网

在 20 世纪 80 年代中期，星状网被广泛地应用于边缘设备(主要用于信息处理)与交

换中心之间的信息传递,例如分散在各个实验室的个人计算机和计算中心的大型工作站之间的信息交换系统。星状网的容量主要由交换中心的工作站的信息处理和交换容量决定。网络的覆盖范围由通信的载体决定,例如,采用卫星通信其覆盖半径非常大,而在室内采用无线通信其覆盖半径相对较小。星状网容纳的站数由中心站可接纳的站数决定。星状网在对连接线和设备失效的抗毁能力方面是比较脆弱的,一旦中心站出现故障,整个网络就彻底瘫痪。而单个的连接线失效,只影响到一个边缘节点不能工作。在延时上可能相对较大,因为边缘节点之间的信息交换需要通过中心站转发,而在中心站由于其流量的限制会引起转发信息的排队现象。关于星状网的安装和维护成本,一般情况下初始安装成本相对较高,这是因为中心站的成本会很高。而之后边缘站的安装成本会随着数目的增加相应减少。

1.3.3 线状网

线状网被大量应用于采用基带传输的局域网内,多节点终端设备上或军用数据信息高速公路上,其网络的流量由传输介质和接入控制机制决定。随着网内站点数目的增加,网络总的传输容量会下降。如果采用线状总线模式要求在相同的带宽内要支持多个虚拟信道,那么电缆的长度常常较短。在无须重构网络情况下,只要网络容量和信息传播延时允许,就可以增加新的站点。如果利用轮询机制控制网络传输和交换,那么网络中就存在一个站点作为控制中心,一旦此控制站点出现故障,那么整个网络就会瘫痪。因此,在军用网络中常采用对偶线,以避免单条线路故障。在信息传递延迟方面,随着站点数的增加延时会增加,同样,在轮询机制下,站点的信息传输延时也会受到轮询的优先规则的影响。总的来讲,每个站点的平均安装和维护费用低于星状网,但高于环状网。线状网不需要很高的初始安装费用。

1.3.4 树状网

树状网络可由一系列的线状网络组成,主要用于局域网的信息发布或广播。所有的站点都与称为树根的中心站点相连接。网络的拓扑呈现树状结构。广播树系统的流量比较高,主要由连接线路的容量决定。树状网最大覆盖半径可能大于线状网,主要是因为多个分支可以采用转播器进行互联。广播系统有时可以扩张到几千米,不需要重构网络,就可在网内扩充大量的站点。单个站点故障只影响到它本身,可以通过备份模式得到解决。而转播器和树枝故障会导致与该转播器和树枝上相连的站点不能工作。当广播系统中独立的信道采用频分多址技术时,信息传递的延时会大大减小。安装和维护成本与线状网相当。

1.3.5 环状网

环状网是一种高效的传递网络,一般在局域网或城域网中被采用。主要采用令牌环

或时隙环形接入控制机制。传输容量与传输介质和环上每个站点的转发器的能力有关。环状网的总长度一般大于线状网络,站点之间的距离以及总的站点数根据系统的设计而定。每新增加一个站点都要中断网络,并且网络的性能会随之下降。任何单连接或任何单节点转发器故障都不会影响环状网的信息传递。如果采用双环结构,则网络系统的抗毁能力会增加到两个节点或两个连接或一个节点和一个连接的故障。信息延时随着网络中站点的增加而增加。每个节点的安装费用一般低于其他能提供类似性能的网络拓扑类型,并且所需要的电缆或光纤的长度小于星状拓扑网。

1.4 通信网络中的关键技术问题

通信的基本任务是将信息从发送端快速准确地传递到接收端。从通信的基本任务中,人们可以体会到通信技术的两个最基本要求:一是信息的传输速度,通常又称信息的传输速率。另一个就是信息传递的可靠性,即因传输引入的差错率应尽可能小。而通信网作为承载信息传输的载体,它的目标除了能满足通信技术的基本要求外,还需要考虑通信网的布局和内在设置的要求,一方面要求网络的铺设费用和维护费用尽可能低,另一方面又要为尽可能多的用户提供满意的通信服务。基于这些考虑,可以将通信网络中涉及的关键技术罗列如下:

- (1) 网络的接入控制技术;
- (2) 网络中信息的交换技术;
- (3) 不同通信业务之间的服务质量控制技术;
- (4) 网络的维护与抗毁技术。

对网络用户而言,他们关心的问题更多的是通信网能提供的业务类型、相应的技术指标。具体地,它概括了如下几个方面:

- (1) 信息的模式与信息的粒度

用户的信息是信息流模式还是数据包模式。如果采用信息流,那么信息流的长度分布、信息到达率以及时变特性都是重要的物理指标。在某些情况下,信息流的长度又称为会话的持续时间,一般情况下采用负指数分布模型进行刻画。关于信息的到达率,通常采用的模型包括泊松到达、确定性到达(每个信息流与下一个信息流到达的时间间隔是固定的)和均匀分布到达(两个相邻的信息流的到达时间间隔是一个在最小值和最大值之间取值,服从均匀分布的随机变量)。如果采用数据包形式,数据包的长度是一个必须考虑的问题。因为网络中传输介质的不同,对数据传输引起的误码率会不同,所以为了更加充分利用传输介质的特点,需要认真地设计数据包的长度。此外,关于数据包的到达率和时变特性,仍可以利用泊松到达、确定性到达和均匀分布到达进行描述,但是,在 Internet 网络中,由于存在信息传输的自相似性,所以需要建立一些新的模型进行刻画。

(2) 可用的信息传输带宽

在下一代通信网络中,用户需要了解自己可租用的信道情况,因此,信道带宽将成为一个非常重要的技术指标。因为下一代通信系统的目标是能提供更加个性化的通信服务,所以一旦用户了解到自己可租用的信道带宽,他就可从多业务通信平台中选择适合自己的通信模式或方式。

(3) 信息传输的延时

不同的业务或应用对传输的延时也有不同的要求,例如利用计算机终端进行通信,对延时的要求不算严格,而对语音信号,其最大延时的要求就非常严格。

(4) 信息传输的可靠性

在某些应用中,所有的信息都需要无差错传输。例如对金融交易的业务数据,如出现一个比特的差错可能会导致非常严重的后果;而在语音通信中,允许有一定量的差错率,但并不影响语音通信的质量。

在现在通信技术处于高速发展的时代,新的通信业务随时都可能出现,它们将对通信网络的传输技术有相应的新要求。为了能适应时代的发展,我们需要更加关注下一代网络技术的发展趋势。但是有一点需要指出的是,用户对通信网络和技术能提供高质量服务的要求是始终不变的,因此,我们可以从上述4个指标进行分析。

1.5 网络接入控制技术

网络接入控制技术是一种提高网络传输利用率的技术。其基本思想就是在多用户共享系统中,采用适当的接入控制机制可以有效地分离不同用户发送的信号,如在时分复用网络中,需要采用一定的时域控制策略控制用户接入网络。如果没有控制机制,许多用户可能会同时向网络发送信息,在不采用信息碰撞分离技术的情况下,将导致网络传送许多被破坏的数据,而这些数据对任何一个接收者而言都是无效数据。常用的多用户信号分离技术包括时分复用、频分复用、码分复用、空分复用、统计复用以及它们的一些组合复用方式。事实上,接入控制技术就是研究在共享传输介质中如何进行多信号分离的方法。下面将简单回顾网络接入控制的发展历史。

接入控制技术最早起源于无线网络中,这是因为许多用户需要共享一个同频的无线信道。一个常用的方法就是设定一个控制站点,利用控制站点对各个用户发送指令使它们轮流向网络传送信息。这种方式称为轮询(polling)。采用这种技术时,网络拓扑多采用星状拓扑。先由中心控制站向用户终端发出邀请指令或派发指令,一旦某用户终端收到指令,当它无数据需要发送,就向控制站发送“无数据发送”信息;如果它有数据要发送,就向网络发送数据。轮询方式就是一种时分复用方式的实现模式。

关于频分复用技术,早在20世纪中叶,这一技术就在载波通信中被广泛应用,小到从

几路电话的架空明线载波系统,大到上千路电话的同轴电缆载波系统,它们在电信史上都留下了辉煌的记忆,另外在卫星通信中该技术也被广泛采用。采用频分复用时,每个用户可以利用不同的载波线谱承载被传送的信息。实际上,至今仍在不断发展的波分复用超宽带(WDM)光纤传输系统也属于频分复用技术范畴。在 20 世纪 70 年代后期,时分复用技术得到了迅速的发展,被用于卫星通信中。一方面它可以提高卫星通信中无线链路的利用率,另一方面也可简化地面站的设备和星上天线系统与信号转发系统设计的复杂度。此时,各卫星地面站采用一个共同的定时信号作为同步控制信令,每个地面站只允许在自己预定的时隙内向卫星发送信号。该时分复用方式类似于轮询方式。在此之后,时分复用的另一种实现方式——Aloha 方式被提出。它采用了自由竞争模式实现信道共享,即每个用户在有数据发送时就向网络自由传送数据,如果发生信号碰撞,则随机延迟一段时间再次向网络重新发送原发生碰撞的数据包。如果成功发送,则接着发送下一个数据包。Aloha 方式适合于用户站点数目较大,而每个站点向网络传送数据占用时间较短的情况,即不经常有数据需要向网络发送的情况。因为 Aloha 方式采用纯自由竞争模式,所以发生多用户信号碰撞的概率较大,因此,其网络利用率较低,最大只有 18% 左右。之后,人们提出了改进型的 Aloha 方式,又称时隙 Aloha 方式,此时,用户只能在规定的时间点上开始竞争信道,其他时间是不允许向网络发送数据的。这一改进取得了革命性的进步,网络传输利用率提高了一倍,从原来的 18% 提高到 36% 左右。在此之后,出现了树状分裂方式,可以进一步减少碰撞概率,提高网络利用率,其网络传输效率可达 56% 左右。进入 20 世纪 80 年代后期,无线局域网技术引起国际学术界和工业界的重视,此时提出了另一种时分复用的实现方式:载波侦听碰撞避免模式(CSMA/CA)。它可最大限度地利用网络的各种反馈信息,提高网络的传输效率,网络利用率在饱和状态下最大可达 82%。关于这些技术的详细介绍和分析,将在后面的章节中给出。

另外一种接入控制技术是码分复用,它在军用通信和地面移动通信系统中被广泛采用。它允许多个用户可以同时向网络发送数据。用户信号的分离是依靠检测发送信号波形特征完成的。因此,码分复用或码分多址系统是自扰系统,用户的数目是受扩频码的长度制约的。在空间区域较小,用户数目较大的情况下,不宜采用此种方式。

空分复用完全是利用用户在空间位置的差别,通过采用定向天线分离多用户的信号,其工程设计和实现都比较复杂,不可能单独使用,需要与其他复用方式联合使用才能体现其价值。

网络接入控制技术一般分为中心控制、分布式控制和非中心控制模式 3 类。

中心控制模式一般采用主从控制方式,即有一个站作为主站,用于控制网络的接入,如采用轮询模式。许多情况下,中心控制模式采用了时分多址接入方式。系统将这些时隙分配给每个用户,控制中心主要负责传输信号帧的同步。

分布式控制模式一般也采用主从控制方式,与中心控制模式最大的差别在于,它采用

令牌派发(token passing)机制,每一个站点都可能成为临时的主控站,负责控制网络的接入。令牌的派发从逻辑上看相当于在一个线状网络中进行,得到令牌的站点临时扮演主控站的角色,控制整个分布式网络的接入。

非中心控制模式,即所有的站点在一个公共的平台上进行传输竞争。系统设定一个公共的竞争规则,所有的站点必须遵循这一规则,以避免传送信号发生碰撞。在无线局域网中采用的 CSMA/CA 模式就是一种非中心控制模式。

1.6 通信网中的交换技术

通信网络的基本功能就是将信源节点发送的信息通过网络的中间节点(枢纽点)转发到目的地节点。对于网络的枢纽点而言,需要完成的任务包括信息转发,即在枢纽点实现信息交换。因为某些中间节点可能同时负责多个不同用户的信息转发,所以如何将来自不同用户的信息转接到那些与它们各自目的地节点相近的链路上就成为网络研究的重点问题,这就是信息交换技术。通常的信息交换方法分为3类:线路交换、信息交换和数据包交换。

所谓**线路交换**就是首先在信源节点和目的地节点之间建立一条端到端的传输路径,然后开始通信。在整个通信过程中,此传输路径上所有的中间节点和连接线路一直被占用,直到此次通信结束。这些被该通信路径穿过的中间节点负责将来自上一个邻接节点的信息转接到它的下一个邻接节点上。常用的公共电话网和电报网都采用线路交换。线路交换的主要特点如下:

- (1) 电话呼叫的连接的时间是变化的,它的持续时间范围从10s到几个小时。
- (2) 传输的数据带宽是受限的,难于进行高速率的数据传输。
- (3) 线路的质量变化非常大,主要的性能指标为信噪比、带宽和相位畸变等。
- (4) 有些线路的误码率在 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 内变化,低于理想的标准。
- (5) 线路故障的维修有可能需要较长时间。
- (6) 通信线路中一旦被插入了干扰信号,正在传送的信号质量会急剧下降。
- (7) 网络具有良好的安全性。
- (8) 能提供较好的用户服务质量保证。

信息交换是一种存储转发技术,其中间节点负责从信源接收信息,然后存储这些信息直到有合适的空闲线路能够转发这些信息为止。在采用信息交换时,信源节点首先对要发送的信息或一段分组数据进行封装,增加一个信息报头。报头中添加有关的目的地地址和一些控制信息。在中间节点,数据包在转接到下一个节点或目的地节点之前先对信息进行存储。为了保持链路具有高的利用效率,信息要进行排队直到轮到它发送为止。这就需要中间节点具有一定的存储能力。一般情况下,总的存储能力要大于主寄存器的

存储能力。因此,存储系统就引入了延时。信息延时的范围一般为几秒到半个多小时。对于长信息,一旦信息出错,有可能需要花费几分钟的时间恢复,所以需要努力管理此系统。为了降低信息交换系统的延时,建议传送短信息或采用高速数据线。另外一种减低队列长度的方法就是在系统中引入分片技术。分片就是将长信息分成一些长度小的信息片,从而减小所需寄存器的存储容量,与此同时可以降低系统的信息延时。分片的另外一个优点就是,如果整个信息的某些信息片受到干扰,只须重新传送这些受干扰的信息片即可,不需要重传整个信息。另外,一些信息片也可以被赋予高优先传输级别,以利于快速传送。当然,分片也有如下的缺点:

(1) 处理和控制程序较复杂。这是因为一个整条信息被分解成若干个信息片后,信息片在传输中的差错控制、路由切换、暂存缓冲排队以及目的地端的信息组合等与整条信息传输所需要的处理与控制相比要复杂很多。

(2) 每个信息片需要一个地址和控制报头,这样会相应地增加传输的额外开销。

数据包交换,简称包交换,是一种由信息交换派生出的交换技术。与信息交换的主要区别在于它将信息分解为一组尺寸小的元素,即数据包。这些数据包在通过网络传输的过程中有可能与来自其他虚拟信道的数据包交织在一起进行传输。在接收端,需要根据数据包报头携带的指示信息重组接收到的信源信息。ARPNET 是最早的采用包交换技术的数据网络。大约在 1976 年,ITU 推出 X.25 接入协议和界面标准,之后在 1978 年、1980 年和 1984 年经过多次修改,最终成为包交换网络的标准。包交换系统可以利用动态选路方法,允许传递同一信息的不同的数据包选择不同的路由,这样可以有效地避免暂时的网络拥塞和链路故障。在最后的交换节点需要对数据包按正确顺序重新排列,然后再转发到目的地节点。当然,包交换也可选用分组处理技术,即对每组数据包进行路由选取。这种方法类似于线路交换,因此又称为虚拟线路交换。在数据包序列通过网络之前,先建立一条虚拟线路。通常在每个网络入口和出口节点建立路由和控制表格的时间远少于 1s,这与线路交换平均需要几秒的时间相比具有明显的优势。但是对数据包交换而言,它可能在传输中需要进行速率转换、码型转换和协议转换等,这些操作需要消耗一定时间,同时也增加了系统处理的复杂度。更为严重的问题是,当一个节点接收到的数据包个数大于它的转发能力时,网络会出现拥塞现象。为了解决网络拥塞问题,通常可以采用两种不同的策略:一种是面向连接的控制方法,即类似于虚拟线路交换方式。在一组数据包发送前先建立虚拟通道或线路,然后将此组内所有的数据包沿此虚拟通道传送。另一种是非面向连接的控制方法,即在每个数据包上附加地址信息,数据包的发送一般沿具有最小延时的路由传送,这种模式也称为数据报协议(datagram protocol)。利用此协议时,一旦网络发生拥塞,该数据包可能被丢弃。对于采用非面向连接系统而言,应选择适当的数据包的长度。当发现某些数据包被丢弃后,应及时恢复,并在接收端对所有的数据包重新排序,使之与信源信息次序完全一致。显然,这样的处理会引入更多的额外开销,即每个数据包需要更多的

地址和控制信息。现在也有采用混合线路与包交换的模式,即希望利用二者的优点。显然,这种混合系统的设计费用和控制复杂度远高于数据包交换和线路交换系统。但是,一旦技术上取得突破,系统所带来的效益是非常可观的。下一代网络交换系统的目标就是采用这种组合系统以支持各种不同类型的业务,如数据、语音、传真、视频、多媒体、流媒体等。值得一提的是帧中继(frame relay)技术也是一种广泛采用的包交换模式。它最早在美国被采用。它有别于综合业务数字网中采用的 X.25 协议。它是由综合业务数字网的信令控制信道(D 信道)发展而来的一种高速包交换技术,其传输速率相当于采用 X.25 标准网络的 10 倍。它采用了带外信令,并删除了许多状态控制表而保留了最小的路由选择功能。

1.7 网络技术的发展趋势——网络的融合

网络的融合是通信网络发展的必然趋势。网络融合的概念体现在许多方面,包括广泛的应用和先进的技术基础。

就应用而言,网络的融合是一种综合的大系统处理的概念,一个单独的通信终端设备可以通过一个本地环路或接入网络提供多种服务,如支持同步化的数据、视频、图像和音频应用等。应用是推动通信网络大系统化的主要力量之一。近 10 年的技术推动和专用网络的普及,特别是无线移动通信网的大面积覆盖和 Internet 接入技术的广泛应用,用户已经被培养出对带宽密集型(占用大量带宽型)应用的兴趣,唯一欠缺的是能够支持这种综合业务信息网络化的设施和技术。根据目前的技术特点,可以预见未来 10 年内网络融合技术可以实现如下的综合服务:语音通信、数据通信、Internet 接入、电视、视频会议、远程教育、视频点播、音乐点播、交互式游戏、家庭购物、网上出版、多媒体和综合报文传送等。

就网络技术而言,目前支持各种专用网络的技术是合适的或正处于良好的发展阶段,特别是支持语音和数据通信的技术已得到很好的发展。然而,网络融合所带来的真正的技术问题仍存在,并且现代网络技术的改进,甚至网络结构的调整对当前通信技术人员提出了更大的挑战。下面将给出相关技术发展的若干方面。

1.7.1 终端设备

当前终端设备为个人的语音、数据、视频和图像应用提供了强有力的支持。然而,这些支持主要是通过单个设备,如电话机、计算机和电视机等实现的。虽然现在已有能支持语音、数据和视频的多媒体移动终端,然而其数据和视频的支持能力仍不够强。这表明:通信技术的个性化发展受到终端和网络技术发展水平的制约,从另一方面,也表明网络融合技术有更大的发展空间。

在网络融合的方案中,终端设备除了采用一些单个的多功能设备形式外,很可能会更多地采用模块式的多功能组合形式,如将计算机、电话、显示器、摄像机和其他设备按需要

组装在一起。在这种方式中,用户可以根据自己的需要按模块化的方式组装个性化通信终端。例如在家庭中,用户可以将个人计算机、电视机、电话机、照相机、录像机、传真机和一些其他的家用电器等通过无线网络进行联网,组建个人的家用通信组合终端。用于支持这种组合终端的 IP 编址方案 IP v6 也正处于快速发展阶段。可以预计,一旦 IP v6 成功商用化,那么几乎每台终端设备都可以获得自己的静态 IP 地址分配。届时,信息网络的应用会更加广泛,信息的存储、传递与处理会影响到每个人的生活和工作方式,甚至改变社会运作的形态与方式,因此新型终端设备的研发已开始成为通信技术创新与快速翻新变化的重要领域,而且会成为竞争日益激烈的通信市场中的新宠。

1.7.2 用户接口

融合型终端设备的用户接口标准目前正处于不断翻新和研究阶段。多个国际标准化组织正不断地制订具有高带宽的各种媒介接口标准。其中研究的重点主要集中在高度直观的图形用户接口(GUI)上,使 GUI 可以生成一个有效的导航设备,类似于网上浏览器。或许用户将来可以通过远程无线电在综合型终端显示设备上用菜单模式选择应用程序。

1.7.3 网络接口

网络接口是非常重要的部分。目前已开发出不同形式的网络接口标准。如在 xDSL(数字用户环路)领域中,ADSL(非对称数字用户环路)分离设备的标准化早已完成,它可以支持语音、数据和视频业务。CATV(闭路电视广播系统)的接口和 VSAT(甚小口径天线终端)形式的卫星抛物面天线等在技术上都有可能成为融合网络接口的重要组成部分。然而,作者认为未来的网络接口,有可能采用集中化的终端复用器形式。在家用网络中,可能会利用同轴电缆将用户网关接入到社区的光纤接口上,然后通过光纤本地环路接入骨干网络。目前无线局域网(Wi-Fi)和无线城域网(WiMAX)的接口技术也有可能成为未来网络接口的重要后选技术。

1.7.4 本地环路

本地环路技术分为有线和无线两种形式。无线本地环路,就其频谱以及带宽而言,尽管可以采用高效编码调制技术,这在相当程度上减缓了频谱和带宽受限的缺陷,但从本质上讲,仍是受限的。另外,无线本地环路也会由于恶劣的天气而使性能急剧恶化。除此之外,无线本地环路是距离受限的,特别是对于高频信号。传输介质的开放性可能是无线本地环路的最大缺陷,它从本质上会导致信息的不安全性。有线本地环路,尽管可以采用 ADSL 或 CATV 网,其带宽也受到一定的限制。光纤到户(FTTH)目前的发展在一些商业模式运作好的国家,用户数约占总人数的 10%。其主要原因在于网络接入受到多种因素的影响,如地理环境、已有网络资源、网络建设和维护的投资以及用户对资费的承受能力等。

1.7.5 信息传送网

因为光纤在带宽、误码性能、传输距离、信息的安全性和费用等诸多方面均具有极大的优势,所以在骨干的传送网上采用 SONET/SDH(同步光纤网/同步数字系列)和 DWDM(密集波分复用)。其中 SONET/SDH 是一种时分复用(TDM)方法,而 DWDM 是一种光纤级的频分复用(FDM)技术。现在,这两种技术处于共存的状态。在未来的十多年内,这种传送网的格局可能难于改变。

1.7.6 交换与网络协议

在网络融合中,最后需要考虑的问题,也是最关键的问题,是交换和网络协议。在交换级,必须处理电路、分组和信元等多种交换之间的协调问题。众所周知,电路交换对传统的语音和视频信息的传输是非常有效的。然而对其他业务而言,其效率相对较低。而基于 TCP/IP 的分组交换对数据业务效率很高,而对其他应用不是很有效。由于数据应用对数据分组的随机延时有很强的容许力,因而它很适合用于 TCP/IP 的分组交换处理。目前虽然 IETF 和其他一些国际标准化工作组正致力于解决服务质量(QoS)问题,但分组网络的处理是最费力的。相反,以 ATM 形式(等包长具有多服务等级的体制)的信元交换,从根本上可为所有应用同时提供服务质量保证,但是,这是在费用和性能之间的一种折中结果。事实上,ATM 对除了骨干数据网络外的其他应用来讲是太昂贵了,而且技术实现的复杂度甚高。而分组交换相对来讲非常简易有效,用户可以负担得起,但缺少服务质量保证。电路交换面对来自信元交换和分组交换,其竞争力正在逐步下降,可以预见,电路交换仍会保留一段时间直到它们完全不受重用或其功能被淘汰为止。正在运行着的 TCP/IP 协议组的分组交换在不断提高其 QoS 的同时,对于语音业务的处理能力也在提高,近年出现了 IP 语音技术(VoIP),虽然它目前的话音质量还不够令人满意,但可以预见,这一问题会在近几年得到彻底解决。

习 题

1. 现代通信网络中涉及的关键技术是什么? 阅读有关参考文献和资料,给出对这些技术的观点和看法。
2. 业务的服务质量参数主要是指什么? 它们的物理意义是什么?
3. 通信网络中的交换技术主要有哪些? 它们之间的主要区别是什么? 请从技术特征、应用范围以及对网络性能的影响几个方面加以论述。
4. 网络的接入控制技术主要包括什么?
5. 如何看待下一代网络融合? 请给出你的观点和看法。

2

随机过程理论基础

为了定量分析通信网的性能,在本章中,主要介绍有关的数学基础知识:随机过程。

2.1 泊松过程的基本定义

定义 2.1 一随机过程 $\{N(t), t \geq 0\}$,若满足如下条件:

- (1) 它是一计数过程,且 $N(0)=0$ 。
- (2) (独立增量特性)任取 $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n, N(t_1), N(t_2) - N(t_1), \dots, N(t_n) - N(t_{n-1})$ 相互独立。
- (3) (增量平稳性) $\forall s, t \geq 0, n \geq 0, P[N(s+t) - N(s) = n] = P(N(t) = n)$ 。
- (4) 对任意 $t > 0$ 和充分小的 $\Delta t > 0$,有

$$P[N(t + \Delta t) - N(t) = 1] = \lambda \Delta t + o(\Delta t)$$

$$P[N(t + \Delta t) - N(t) \geq 2] = o(\Delta t)$$

则称为时齐泊松过程。其中 $\lambda > 0$, 称为强度常数, $o(\Delta t)$ 为高阶无穷小。

为了应用方便,有时采用如下等价定义:

定义 2.2 一计数过程 $\{N(t), t \geq 0\}$,如果满足如下条件:

- (1) $N(0)=0$ 。
- (2) 它是独立增量过程。
- (3) $\forall s, t \geq 0, N(s+t) - N(s)$ 是参数为 λt 的泊松分布,即

$$P[N(t+s) - N(s) = k] = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}$$

则称此过程为参数为 λ 的时齐次泊松过程。下面分析上述两个定义的等价性。

记

$$P_n(t) = P[N(t) = n]$$

由增量的平稳性得

$$P_n(t) = P[N(t) = n] = P(N(t+s) - N(s) = n)$$

考察 $n=0$ 的情形, 因为

$$(N(t+h) = 0) = (N(t) = 0, N(t+h) - N(t) = 0), \quad h > 0$$

所以

$$\begin{aligned} P_0(t+h) &= P[N(t+h) = 0] = P(N(t) = 0, N(t+h) - N(t) = 0) \\ &= P(N(t) = 0)P(N(t+h) - N(t) = 0) \\ &= P_0(t)P_0(h) \end{aligned}$$

另一方面

$$P_0(h) = 1 - (\lambda h + o(h))$$

代入上式得

$$\frac{P_0(t+h) - P_0(t)}{h} = -\left(\lambda P_0(t) + \frac{o(h)}{h}\right)$$

令 $h \rightarrow 0$, 得

$$P'_0(t) = -\lambda P_0(t)$$

这是一阶线性常系数微分方程。由初始条件 $P_0(0) = P(N(0) = 0) = 1$, 可得

$$P_0(t) = e^{-\lambda t}$$

现在考察 $n > 0$ 的情形, 因为

$$\{N(t+h) = n\} = \bigcup_{l=0}^n \{N(t) = n-l, N(t+h) - N(t) = l\}$$

所以

$$P_n(t+h) = P_n(t)(1 - \lambda h - o(h)) + P_{n-1}(t)(\lambda h + o(h)) + o(h)$$

化简得

$$\frac{P_n(t+h) - P_n(t)}{h} = -\lambda P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t) + \frac{o(h)}{h}$$

令 $h \rightarrow 0$, 有

$$P'_n(t) = -\lambda P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t)$$

将上式两边乘以 $e^{\lambda t}$, 移项后得

$$\frac{d}{dt}[e^{\lambda t} P_n(t)] = \lambda e^{\lambda t} P_{n-1}(t)$$

满足初始条件

$$P_n(0) = P(N(0) = n) = 0$$

当 $n=1$ 时

$$\frac{d}{dt}[e^{\lambda t} P_1(t)] = \lambda$$

可得

$$P_1(t) = (\lambda t) e^{-\lambda t}$$

利用归纳法得

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}$$

所以利用定义 2.1 可得到定义 2.2。

利用定义 2.2 和 Taylor 展开式易得

$$P_1(\Delta t) = \lambda \Delta t + o(\Delta t)$$

当 $n > 1$ 时有

$$P_n(\Delta t) = o(\Delta t)$$

于是定义 2.1 的条件(4)得证。

其他条件请读者自己验证。从而可得定义 2.1 与定义 2.2 是等价的。

2.2 泊松过程的基本性质

利用泊松分布的概率论知识可得如下的性质：

(1) 均值： $E(N(t)) = \lambda t$ 。

事实上，上式可改写为

$$\lambda = \frac{E(N(t))}{t} = E\left(\frac{N(t)}{t}\right)$$

显然， $N(t)/t$ 为单位时间内事件发生的平均次数，即出现的频率，它与时间 t 有关，是一随机过程。而 λ 表示单位时间内事件在统计平均意义下发生的平均次数，即平均频率，有时，它用于描述顾客或数据包的到达率。

(2) 方差 $\text{Var}(N(t)) = E[N(t) - \lambda t]^2 = \lambda t$ 。

(3) 特征函数 $\Phi_{N(t)}(x) = E[e^{-jN(t)x}] = \exp\{-\lambda t(1 - e^{jx})\}$ 。

(4) $E[N(t)^2] = (\lambda t)^2 + \lambda t$ 。

2.3 指数分布的基本性质

设 X 和 Y 是两个相互独立的随机变量，分别服从参数为 μ 和 η 的指数分布，则有如下结论：

(1) 遗忘性：对任意的 $s, t > 0$ 有

$$P(X > t + s \mid X > s) = P(X > t) = e^{-\mu t}$$

(2) $X \Delta Y = \min\{X, Y\}$ 服从参数为 $\eta + \mu$ 的指数分布，即

$$P(X \Delta Y > t) = e^{-(\eta + \mu)t}$$

$$(3) P(X > Y) = \frac{\eta}{\mu + \eta}.$$

证明

(1)

$$P(X > s + t \mid X > s) = \frac{P(X > s + t, X > s)}{P(X > s)} = \frac{e^{-\mu(s+t)}}{e^{-\mu s}} = e^{-\mu t}$$

(2)

$$P(X \wedge Y > t) = P(X > t, Y > t) = P(X > t)P(Y > t) = e^{-(\mu+\eta)t}$$

(3)

$$\begin{aligned} P(X > Y) &= \iint_{\{(u,v): u > v > 0\}} \mu e^{-\mu u} \eta e^{-\eta v} du dv \\ &= \int_0^\infty \eta e^{-\eta v} \int_v^\infty \mu e^{-\mu u} du dv = \int_0^\infty \eta e^{-\eta v} e^{-\mu v} dv \\ &= \frac{\eta}{\eta + \mu} \end{aligned}$$

证毕

2.4 泊松过程与指数分布的关系

设 $\{N(t), t \geq 0\}$ 是一计数过程, $N(t)$ 表示在 $[0, t]$ 内事件发生的个数(或顾客到达的个数)。令 $S_0 = 0, S_n$ 表示第 n 个事件发生的时刻, $X_n = S_n - S_{n-1} (n \geq 1)$ 表示第 n 个事件与第 $n-1$ 个事件发生的时间间隔。于是有

$$S_0 = 0$$

$$S_n = \inf\{t: N(t) = n\}, \quad n \geq 1$$

相应的 $N(t)$ 可以表示为

$$N(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{[0, t]}(S_n)$$

其中 $I_{\{A\}}(\omega)$ 表示集合 A 的示性函数

$$I_{\{A\}}(\omega) = \begin{cases} 1 & \omega \in A \\ 0 & \omega \notin A \end{cases}$$

事实上, 对 $t \geq 0$, 下列事件是等价的:

$$\{N(t) \geq n\} = \{S_n \leq t\}$$

$$\{N(t) = n\} = \{S_n \leq t < S_{n+1}\} = \{S_n \leq t\} - \{S_{n+1} \leq t\}$$

其中 $\inf\{t\}$ 表示集合 $\{t\}$ 的下确界, 即集合的最大下界。

因此, S_n 的分布函数为: 当 $t < 0$ 时, $P(S_n \leq t) = 0$; 当 $t \geq 0$ 时, 有

$$P(S_n \leq t) = P(N(t) \geq n) = 1 - e^{-\lambda t} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^k}{k!}$$

于是 S_n 的概率密度函数

$$f_{S_n} = \frac{\lambda (\lambda t)^{n-1}}{(n-1)!} e^{-\lambda t} I_{(t \geq 0)}$$

特别当 $n=1$ 时,有

$$P(S_1 \leq t) = P(X_1 \leq t) = (1 - e^{-\lambda t}) I_{(t \geq 0)}$$

即 X_1 是参数为 λ 的指数分布。现在的问题是 $X_n (n > 1)$ 的结果如何?

根据泊松过程的定义,通过借助于信号呼叫的例子,可以观察到事件 $\{X_1 > t\}$ 等效为在 $[0, t]$ 内没有呼叫到达,因此

$$P(X_1 > t) = P(N(t) = 0) = e^{-\lambda t}$$

即

$$P(X_1 \leq t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

相应的概率密度函数

$$f_{X_1}(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

所以, X_1 服从指数分布,其均值为 $1/\lambda$ 。

关于 X_2 的概率分布,由全概率公式得

$$P(X_2 > t) = \int_0^\infty P(X_2 > t \mid X_1 = s) f_{X_1}(s) ds$$

因为

$$\begin{aligned} P(X_2 > t \mid X_1 = s) &= P\{(s, s+t] \text{ 内无事件发生} \mid X_1 = s\} \\ &= P\{(s, s+t] \text{ 内无事件发生}\} \quad (\text{独立增量性}) \\ &= e^{-\lambda t} \quad (\text{平稳的增量特性}) \end{aligned}$$

从而有

$$P(X_2 > t) = \int_0^\infty e^{-\lambda t} f_{X_1}(s) ds = e^{-\lambda t}$$

类似于 X_1 的讨论可得 X_2 也服从指数分布,其均值为 $1/\lambda$ 。

同理,可以证明 $X_n (n > 2)$ 也服从指数分布,其均值为 $1/\lambda$ 。

注意 从上述讨论中可以看出 X_2 与 X_1 是独立的,这是因为在给定 X_1 的情况下, X_2 的条件分布与 X_1 的状态无关。由此可以推断: $X_n (n=1, 2, \dots)$ 是独立同指数分布的,其均值为 $1/\lambda$ 。

2.5 到达时间的条件分布

本节主要讨论在给定 $N(t)=n$ 的条件下, $S_1, S_2, \dots, S_n$ 的条件分布及有关性质等。

定理 2.1 设 $N(t), t \geq 0$ 是泊松过程,则对 $\forall 0 < s < t$ 有

$$P(X_1 \leq s \mid N(t) = 1) = \frac{s}{t}$$

证明

$$\begin{aligned} P(X_1 \leq s \mid N(t) = 1) &= \frac{P(X_1 \leq s, N(t) = 1)}{P(N(t) = 1)} \\ &= \frac{P(N(s) = 1, N(t) - N(s) = 0)}{P(N(t) = 1)} \\ &= \frac{(\lambda s) e^{-\lambda s} e^{-\lambda(t-s)}}{\lambda t e^{-\lambda t}} = \frac{s}{t} \end{aligned}$$

证毕

此定理表明,在已知 $[0, t]$ 上有一事件发生的条件下,事件发生的时间在 $[0, t]$ 上是等可能性的。

这一性质也可推广到 $N(t) = n, n > 1$ 的情况。具体结果如下:

定理 2.2 设 $N(t), t \geq 0$ 是泊松过程,则对 $\forall 0 < s < t, k \leq n$ 有

$$P(S_k \leq s \mid N(t) = n) = \sum_{l=k}^n \frac{n!}{l!(n-l)!} \left(\frac{s}{t}\right)^l \left(1 - \frac{s}{t}\right)^{n-l}$$

特别是当 $k=n$ 时有

$$P(S_n \leq s \mid N(t) = n) = \left(\frac{s}{t}\right)^n$$

证明

$$\begin{aligned} P(S_k \leq s \mid N(t) = n) &= \frac{P(S_k \leq s, N(t) = n)}{P(N(t) = n)} \\ &= \frac{\sum_{l=k}^n P(N(s) = l, N(t) - N(s) = n-l)}{P(N(t) = n)} \\ &= \frac{\sum_{l=k}^n \frac{(\lambda s)^l e^{-\lambda s} (\lambda(t-s))^{n-l} e^{-\lambda(t-s)}}{l!(n-l)!}}{\frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}} \\ &= \sum_{l=k}^n \frac{n!}{l!(n-l)!} \left(\frac{s}{t}\right)^l \left(1 - \frac{s}{t}\right)^{n-l} \end{aligned}$$

当 $k=n$ 时,易得

$$P(S_n \leq s \mid N(t) = n) = \left(\frac{s}{t}\right)^n$$

证毕

2.6 泊松过程的分流

在实际应用中,有时对泊松过程按某种规律进行分流或分类。例如,在某超市内有多个收银台,假设顾客到达是一泊松过程,顾客可以依据收银台的情况随机选取收银台付款。那么,不同的收银台都有自己的顾客流,它们是原始的泊松流的支流。我们的问题是这些支流的分布是否仍服从泊松分布,它们的分布参数是什么?

定理 2.3 设 $N(t), t \geq 0$ 是参数为 λ 的泊松过程,到达事件的类型取决于它到达的时间。如果某事件到达时间是 $s > 0$,则它是类型 1 的概率为 $P(s)$,是类型 2 的概率为 $1 - P(s)$ 。假设 $N_m(t), (m=1, 2)$ 表示 $(0, t]$ 内到达的类型 m 的事件数,则 $N_1(t)$ 和 $N_2(t)$ 是两个独立的泊松变量,相应的均值分别为 $\lambda p t$ 和 $\lambda(1-p)t$, 其中

$$p = \frac{1}{t} \int_0^t P(s) ds$$

证明

$$\begin{aligned} P(N_1(t) = n, N_2(t) = l) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} P(N_1(t) = n, N_2(t) = l \mid N(t) = k) P(N(t) = k) \\ &= P(N_1(t) = n, N_2(t) = l \mid N(t) = n+l) P(N(t) = n+l) \end{aligned}$$

现在考虑发生在区间 $(0, t]$ 的事件。如果它在时刻 s 发生,由假设知道它是类型 1 的概率为 $P(s)$,是类型 2 的概率为 $1 - P(s)$ 。又根据上述定理知,事件发生的时刻 s 在 $(0, t]$ 上服从均匀分布。因此该事件是类型 1 的概率为

$$p = \frac{1}{t} \int_0^t P(s) ds$$

不是类型 1 的概率为 $1 - p$ 。

另外,这些事件是相互独立的。因此, $P(N_1(t) = n, N_2(t) = l \mid N(t) = n+l)$ 表示在总共 $n+l$ 个事件中有 n 个类型 1 的事件和 l 个非类型 1 的事件发生的概率,因此

$$P(N_1(t) = n, N_2(t) = l \mid N(t) = n+l) = \binom{n+l}{n} p^n (1-p)^l$$

从而有

$$\begin{aligned} P(N_1(t) = n, N_2(t) = l \mid N(t) = n+l) P(N(t) = n+l) \\ &= \frac{(n+l)!}{n!l!} p^n (1-p)^l \frac{(\lambda t)^{n+l}}{(n+l)!} e^{-\lambda t} \\ &= \frac{(\lambda p t)^n}{n!} e^{-\lambda p t} \frac{(\lambda(1-p)t)^l}{l!} e^{-\lambda(1-p)t} \end{aligned}$$

上式对任意的 $n \geq 0, l \geq 0$ 都成立,因此可得结论: $N_1(t)$ 和 $N_2(t)$ 是两个独立的泊松变