

第 3 章

CHAPTER

IPv6 寻址模式及地址分配

连入 Internet 网络的计算机成千上万,为了能识别连入网络的每一台计算机,为了使每台上网的计算机之间能够相互进行资源共享和信息交换,Internet 给每一台上网的计算机分配了一个二进制数字编号,这个编号就是所谓的 IP 地址。任何一台计算机上的 IP 地址在全世界范围内都是唯一的。

IPv4 的 IP 地址长 32 位,分为 A、B、C、D、E 5 类,其地址分配是以“类”进行的;IPv6 的 IP 地址长 128 位,分为单播地址、组播地址和泛播地址,其地址分配是以“聚合”的原则以及“地址前缀+前缀长度”的策略进行的。

本章在介绍 IPv4 地址结构的基础上,对 IPv6 的地址结构、寻址模式及地址分配方法进行全面的介绍。

本章的主要内容有以下几部分。

- IPv4 地址结构。
- IPv6 地址结构。
- IPv6 寻址模式。
- IPv6 地址分配技术。

3.1 IPv6 地址结构

3.1.1 IPv4 地址结构回顾

1. IP 地址

IPv4 的 IP 地址长 32 位,分为 4 段,每个段称为一个地址节,每个地址节长 8 位。为了书写方便,每个地址节用一个十进制数表示,每个数的取值范围为 0~255,地址节之间用小数点“.”隔开,如贵州大学域名服务器 IP 地址为 210.40.0.33。最小的 IP 地址为 0.0.0.0,最大的 IP 地址为 255.255.255.255。

2. IP 地址的分类

IPv4 的 IP 地址分为 A、B、C、D 和 E 5 类。A 类地址适用于大型网络,

B类地址适用于中型网络,C类地址适用于小型网络,D类地址用于组播,E类地址用于实验。一个单位或部门可拥有多个IP地址,例如可拥有2个B类地址和50个C类地址。地址的类别可从IP地址的最高8位进行判别,如表3-1所示。

表 3-1 IP 地址分类表

IP地址类别	高8位数值范围	最高4位的值
A	0~127	0XXX
B	128~191	10XX
C	192~223	110X
D	224~239	1110
E	240~255	1111

例如,清华大学的IP地址116.111.4.120是A类地址,北京大学的IP地址162.105.129.11是B类地址,贵州大学的IP地址210.40.0.58是C类地址。

IP地址以网络号+主机号的方式来表示,A类地址用高8位表示网络号,其中最高位固定为0(实际只用7位),用低24位表示主机号;B类地址用高16位表示网络号(实际只用14位),低16位表示主机号;C类地址用高24位表示网络号(实际只用21位),用低8位表示主机号。3类IP地址网络号与主机地址的对应关系如图3-1所示。

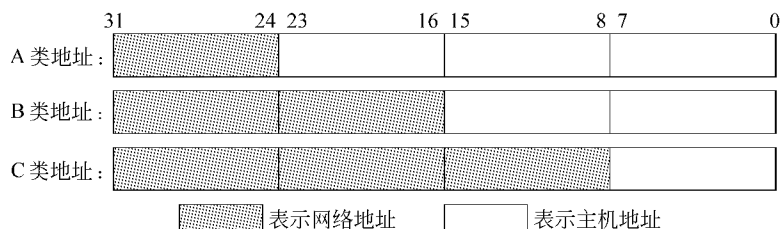


图 3-1 3 类 IP 地址网络号与主机地址

在 Internet 中,各种类别地址所能包含的网络个数是不一样的,A类地址只有128个网络,但每个网络却可连入16 777 216台主机,而C类地址拥有2 097 152个网络,每个网络只能连入256台主机,如表3-2所示。

表 3-2 IP 地址分类表

类别	网络号位数	最大网络数	主机位数	最大主机数	实际主机数
A 类	7	128	24	16 777 216	16 777 214
B 类	14	16 384	16	65 536	65 534
C 类	21	2 097 152	8	256	254

3.1.2 IPv6 地址体系结构

1. IPv6 地址表示方式

(1) IPv4 地址表示方式

IPv4 地址长 32 位,由 4 个地址节组成,每个地址节长 8 位,用十进制书写,每个地址节之间用点“.”分隔,下面是一些合法的 IPv4 地址。

10.5.3.1

127.0.0.1

201.199.244.101

(2) IPv6 地址表示方式

IPv6 地址长度 4 倍于 IPv4 地址,表达起来的复杂程度也是 IPv4 地址的 4 倍。IPv6 地址长 128 位,由 8 个地址节组成,每个地址节长 16 位,用十六进制书写,地址节之间用冒号“:”分隔,其基本表达方式是 X:X:X:X:X:X:X:X,其中 X 是一个 4 位十六进制整数。下面是一些合法的 IPv6 地址。

CDCD:910A:2222:5498:8475:1111:3900:2020

2001:250:2100:2:1::5

1030:0:0:0:C9B4:FF12:48AA:1A2B

2000:0:0:0:0:0:0:1

地址中的每个整数都必须表示出来,但左边的 0 可以不写(上面的第 2 个地址是贵州大学 IPv6 网站的 IP 地址)。

可以看出:IPv4 地址是“点分十进制地址格式”,而 IPv6 地址是“冒分十六进制地址格式”。

这是一种比较标准的 IPv6 地址表达方式,此外还有两种更加清楚和易于使用的方式。

有些 IPv6 地址中有可能包含一长串的 0(如上面的第 3 个和第 4 个地址)。当出现这种情况时,IPv6 地址中允许用简写成双冒号的方式来表示这一长串的 0。例如,地址 2000:0:0:0:0:0:0:1 可以简写成 2000::1。

在这种表示方法中,只有当 16 位组全部为 0 时才会被两个冒号取代,且两个冒号在一个地址中只能出现一次,否则就会产生二义性而导致 IP 地址错误。

在 IPv4 和 IPv6 的混合环境中还有第三种表示方法。IPv6 地址中的最低 32 位可以用于表示 IPv4 地址,该地址可以按照一种混合方式表达,即 X:X:X:X:X:X:d.d.d.d,其中 X 表示一个 16 位整数,而 d 表示一个 8 位十进制整数。

例如,0:0:0:0:0:0:210.0.0.1 就是一个基于 IPv6 网络的 IPv4 地址的表示,该地址也可以表示为::210.0.0.1。

IPv6 地址分为单播地址、组播地址和泛播地址 3 种,将在后面详细介绍。

(3) IPv6 地址前缀

IPv6 地址前缀就是 IPv6 地址中的高位部分,在 128 位地址空间范围之内。地址前缀部分或者有固定的值,或者是路由或子网的标识。其表示方式为“地址/前缀长度”,例

如,12AB:0:0:CD30::/60。

2. IPv6 地址体系结构

IPv4 地址只是一台终端计算机的网络代号,不能表达网络路由结构,而 IPv6 地址则能充分表达网络路由结构信息,即为点对点通信设计了一种具有分级结构的地址,这种地址被称为可聚合全球单点广播地址(又称可聚合全球单播地址)。其地址最开头的 3 个地址位是地址类型前缀,用于区别其他地址类型。其后是 13 位 TLA ID、32 位 NLA ID、16 位 SLA ID 和 64 位主机接口 ID,分别用于标识分级结构中的 TLA (Top Level Aggregator,顶级聚合体)、NLA(Next Level Aggregator,下级聚合体)、SLA(Site Level Aggregator,站点级聚合体)和主机接口。TLA 是与长途服务提供商和电话公司相互连接的公共网络接入点,它从国际互联网注册机构如 IANA 处获得地址。NLA 通常是大型 ISP,它从 TLA 处申请获得地址,并为 SLA 分配地址。SLA 也可称为订户(subscriber),可以是一个机构或一个小型 ISP。SLA 负责为属于它的订户分配地址。SLA 通常为其订户分配由连续地址组成的地址块,以便这些机构可以建立自己的地址分级结构以识别不同的子网。分级结构的最底级是网络主机。

IPv6 地址的体系结构体现在可聚合全球单播地址的分层结构上,IPv6 可聚合全球单播地址具有 3 个层次。

- 公共拓扑(Public Topology): 提供公用 Internet 传送服务的网络提供商和网络交换商群体。
- 站点拓扑(Site Topology): 本地的特定站点或组织,其功能是提供本站点之内的传输服务。
- 网络接口标识(Interface Topology): 用于标识链路上的网络接口。

IPv6 地址的体系结构如图 3-3 所示。

3.2 IPv6 寻址模式

IPv6 的 128 位地址长度形成了一个巨大的地址空间。在可预见的很长时期内,它都能够为所有的网络设备提供一个全球唯一的地址。128 位地址空间包含的准确地址数是 340 282 366 920 938 463 463 374 607 431 768 211 456。这些地址足够为地球上每一粒沙子提供一个独立的 IP 地址。

IPv6 能为主机接口提供不同类型的地址配置。

- 全球地址(globally)。
- 全球单播地址(unicast)。
- 区域地址(on-site)。
- 链路本地地址(link local address)。
- 地区本地地址(site local address)。
- 广播地址(broadcast)。
- 组播群地址(multicast group address)。
- 任播地址(anycast address)。

- 移动地址(mobility)。
- 家乡地址(home address)。
- 转交地址(care-of address)。

IPv6 中 IP 地址有 3 种基本类型：单播地址、组播地址和泛播地址。在 IPv6 中，广播地址已不再有效。IPv6 的 3 种地址类型是在 RFC 2373 中定义的。

3.2.1 单播地址

1. 单播地址的概念

单播地址又叫单目地址，单播表示一个单接口的标识符。送往一个单播地址的数据包将被传送至该地址标识的接口上。

单播地址标识了一个单独的 IPv6 接口。一个结点可以具有多个 IPv6 网络接口。每个接口必须具有一个与之相关的单播地址。单播地址可被认为包含了一段信息，这段信息被包含在 128 位字段中：该地址可以完整地定义一个特定的接口。此外，地址中数据可以被解释为多个小段的信息。

IPv6 地址本身可以为结点提供关于其结构的信息。例如，结点可能只需简单地了解整个 128 位地址是一个全球唯一的标识符，而无须了解结点在网络中是否存在。另一方面，路由器可以通过该地址来决定，地址中的一部分标识了一个特定网络或子网上的一个唯一结点。

例如，一个 IPv6 单播地址可看成是一个两字段实体，其中一个字段用来标识网络，而另一个字段则用来标识该网络上结点的接口。在后面讨论特定的单播地址类型时还会看到，网络标识符可被划分为几部分，分别标识不同的网络部分。IPv6 单播地址功能与 IPv4 地址一样受制于 CIDR，即在一个特定边界上将地址分为两部分，地址的高位部分包含选路用的前缀，而地址的低位部分包含网络接口标识符。

最简单的方法是把 IPv6 地址作为不加区分的一块 128 位的数据，而从格式化的观点来看，可把它分为两段，即接口标识符和子网前缀。RFC 2373 中表示的格式如图 3-2 所示。接口标识符的长度取决于子网前缀的长度。两者的长度是可以变化的，这取决于谁对它进行解释。对于非常靠近寻址的结点接口(远离骨干网)的路由器可用相对较少的位数来标识接口。而离骨干网近的路由器，只需用少量地址位来指定子网前缀，这样，地址的大部分将用来标识接口标识符。

n 位	$128-n$ 位
子网前缀	接口标识符

图 3-2 单播地址格式

在 IPv4 中，是用子网掩码表示网络结构的，在 IPv6 中，没有子网掩码的概念，而是引入了“地址前缀”表示法，用地址前缀来表示地址的层次结构。

2. 单播地址格式

RFC 1884 定义了几种不同类型的 IPv6 单播地址，有可聚合全球单播地址、NSAP 地

址、IPX 地址、链路本地地址、站点本地地址等。

(1) 接口标识符

在 IPv6 寻址体系结构中,任何 IPv6 单播地址都需要一个接口标识符。接口标识符非常像 48 位的介质访问控制(MAC)地址,MAC 地址由硬件编码在网络接口卡中,由厂商熔烧在网卡中,而且 MAC 地址具有全球唯一性,不会有两个网卡具有相同的 MAC 地址。这些地址能用来唯一标识网络链路层上的接口。

IPv6 主机地址的接口标识符基于 IEEE EUI-64 格式。该格式基于已存在的 MAC 地址来创建 64 位接口标识符,这样的标识符在本地和全球范围内都是唯一的。RFC 2373 包括的附录解释了如何创建接口标识符。有关 IEEE EUI-64 标准的更多信息,请访问 IEEE 标准网点 <http://stand-ards.ieee.org/db/oui/tutorials/EUI64.html>。IEEE EUI-64 的创建过程详见“链路本地地址格式”。

这些 64 位接口标识符能在全球范围内逐个编址,并唯一地标识每个网络接口。这意味着理论上可有多达 2^{64} 个不同的物理接口,大约有 1.8×10^{19} 个不同的地址,而且这也只用了 IPv6 地址空间的一半。

(2) 基于供应商的可聚合地址

在 RFC1884 中,地址空间的 1/4 被定义用于两类不同的地址:占 1/8 的基于供应商 ISP 的单播地址和占 1/8 的基于地理位置的单播地址,其地址的分配可以根据网络服务供应商或用户所在的网络物理位置进行。

顾名思义,基于供应商的可聚合地址,要求网络从提供 Internet 接入的供应商那里得到可聚合的 IP 地址。

值得注意的是,这种地址分配方案对于距离远、分支机构多的大型企业来说未必是最佳解决方案,因为在一个大型企业中,部分分支机构的供应商有可能不相同。

(3) 可聚合全球单播地址

可聚合全球单播地址是另一种类型的聚合,它是独立于 ISP 的。基于供应商的可聚合地址必须随着供应商的改变而改变,而基于交换局的地址则由 IPv6 交换实体直接定位,由交换局提供地址块,而用户和供应商为网络接入签订合同。这样的网络接入或者直接由供应商提供,或者通过交换局间接提供,但选路是通过交换局的。这就使得用户改换供应商时,无需重新编址,同时也允许用户使用多个 ISP 来处理单块网络地址。

可聚合全球单播地址包括地址格式的起始 3 位为 001 的所有地址。可聚合全球单播地址格式如图 3-3 所示。

3 位	13 位	8 位	24 位	16 位	64 位
FP	TLA ID	RES	NLA ID	SLA ID	接口标识符

图 3-3 可聚合全球单播地址格式

各字段含义如下:

- FP 字段。IPv6 地址中的格式前缀,3 位长,用来标识该地址在 IPv6 地址空间中属于哪类地址。目前该字段为 001,标识这是可聚合全球单播地址。

- TLA ID 字段。顶级聚合标识符,包含最高级地址选路信息,指的是网络互连中最大的选路信息。该字段为 13 位,最大可得到 8192 个不同的顶级路由。
- RES 字段。该字段为 8 位,保留为将来使用。
- NLA ID 字段。下一级聚合标识符,24 位。该字段又称二级聚合标识,该标识符被机构用于控制顶级聚合以安排地址空间。换句话说,这些机构(可能包括大型 ISP 和其他提供公网接入的机构)能按照自身的寻址分级结构来将此 24 位字段切分开来使用。这样,一个实体可以用 2 位分割成 4 个实体内部的顶级路由,其余的 22 位地址空间分配给其他实体(如规模较小的本地 ISP)。这些实体如果得到足够的地址空间,就可将分配给它们的空间用同样的方法再子分。具体做法是,由具有顶级聚合的组织机构按照自身的地址分级结构来将此 24 位字段再进一步细分。例如,可用 n 位作为第一级 NLA1 ID,其余 $24-n$ 位作为获得该组织服务的站点标识,如图 3-4 所示。

NLA1(n 位)	站点标识 ($24-n$) 位		
NLA1(n 位)	NLA2(m 位)	站点标识 ($24-n-m$) 位	
NLA1(n 位)	NLA2(m 位)	NLA3(p 位)	站点标识 ($24-n-m-p$) 位

图 3-4 二级聚合标识的细分示意图

- SLA ID 字段。站点级聚合标识符,16 位,被用来安排内部的网络结构。每个机构可以用与 IPv4 同样的方法来创建自己内部的分级网络结构。若 16 位字段全部用做平面地址空间,则最多可有 65 536 个不同的子网。如果用前 8 位作为该组织内较高级的选路,那么允许 255 个高级子网,每个高级子网可有多达 255 个子网。也可以像二级聚合标识一样,在站点级聚合标识内部再进行内部层次划分,将 16 位的站点级聚合标识字段划分为两层或多层结构,这样做就可以使站点内部的路由表很小,使网络的处理效率提高。通过建立层次结构的方法来分配站点级聚合标识如图 3-5 所示。

SLA1(n 位)	子网号 ($16-n$) 位	
SLA1(n 位)	SLA2(m 位)	子网号 ($16-n-m$) 位

图 3-5 站点级聚合标识的细分示意图

- 接口标识符字段,是 64 位的 IEEE EUI-64 接口标识符。IPv6 单播地址可包括大量的组合,不论是站点级聚合标识符,还是下一级聚合标识符都提供了大量空间,以便某些网络接入供应商和机构通过分级结构再子分这两个字段来增加附加的拓扑结构。除了网络供应商以外,网络交换商也可以分配网络地址。因此,一个组织也可以通过网络交换商直接接入因特网,还可以通过接入的网络交换商间接地向一个或多个远程网络供应商申请远程网络接入服务。这样,在更改该组织的远程网络供应商时,不需要重新编址。

(4) 特殊地址和保留地址

在第一个 1/256 IPv6 地址空间中,所有地址的第一个 8 位 0000 0000 被保留。大部

分空的地址空间用做特殊地址,这些特殊地址包括以下几项。

- 未指定地址: 这是一个全 0 地址,当没有有效地址时,可采用该地址。例如,当一个主机从网络第一次启动时,它尚未得到一个 IPv6 地址,就可以用这个地址,即当发出配置信息请求时,在 IPv6 包的源地址中填入该地址。该地址可表示为 0:0:0:0:0:0:0:0,如前所述,也可简写成::。
- 回返测试地址: 在 IPv4 中,回返地址定义为 127.0.0.1。任何发送回返地址的包必须通过协议栈到网络接口,但不发送到网络链路上。网络接口本身必须接收这些包,就好像是从外面结点收到的一样,并传回给协议栈。回返功能用来测试软件和配置。IPv6 回返地址除了最低位外全为 0,即回返地址可表示为 0:0:0:0:0:0:0:1 或::1。

(5) 嵌有 IPv4 地址的 IPv6 地址

嵌有 IPv4 地址的 IPv6 地址包含两类地址,这两类地址高 80 位均为 0,低 32 位包含 IPv4 地址。当中间的 16 位被置为全 1 时,则指示该地址为 IPv4 映像的 IPv6 地址(简称为“IPv6 映像地址”),当中间的 16 位被置为全 0 时,则指示该地址为 IPv4 兼容的 IPv6 地址(简称为“IPv6 兼容地址”)。图 3-6 显示了这两类地址结构。

IPv4 兼容地址				
80 位			16 位	32 位
00000000	...	00000000	0000	IPv4 地址

IPv4 映像地址				
80 位			16 位	32 位
00000000	...	00000000	FFFF	IPv4 地址

图 3-6 嵌有 IPv4 地址的 IPv6 地址

IPv4 兼容地址用于访问既能理解 IPv4 又能理解 IPv6 的结点(当前,这类结点主要是指双栈路由器);IPv4 映像地址则被 IPv6 结点用于访问只支持 IPv4 而不支持 IPv6 的结点,须通过 IPv4 路由器以隧道方式传送 IPv6 包。

(6) 链路本地和站点本地地址

链路本地地址和站点本地地址结构如图 3-7 所示。

链路本地地址		
10 位	54 位	64 位
1111111010	0	接口标识符

站点本地地址			
10 位	38 位	16 位	64 位
1111111011	0	子网标识符	接口标识符

图 3-7 链路本地地址和站点本地地址结构图

- 链路本地地址: 链路本地地址用于单个网络链路上给主机编号。

地址前缀的前 10 位为 1111111010 的地址为链路本地地址。链路本地地址是 IPv6 网

络中应用范围受到限制的地址类型,只能在连接到同一本地链路的结点之间使用。路由器在它们的源端和目的端对具有链路本地地址的包不予处理,因此永远也不会转发这些包。该地址的中间 54 位为 0。而 64 位接口标识符如下所述,地址空间的这部分允许个别网络连接多达 $(2^{64}-1)$ 台主机。

从图 3-8 中可以看出,链路本地地址由一个特定的前缀和接口标识符两部分组成:其前缀为 FE80::/64,同时将接口标识符添加在后面作为地址的低 64 比特。该 64 比特接口标识符使用的是 EUI-64 地址格式。

EUI-64 是 IEEE 定义的一种基于 64 比特的扩展标识符。EUI-64 格式是 IEEE 指定的公共 24 比特制造商标识和制造商为产品指定的 40 比特值的组合,如图 3-8 所示。

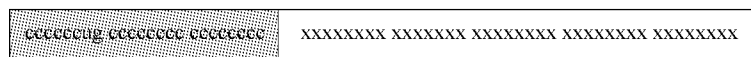


图 3-8 IEEE EUI-64 地址格式

IPv6 地址中的接口 ID 是 64 位,而 MAC 地址是 48 位,因此需要在 MAC 地址的中间插入一个 16 位编码 11111111 11111110,并根据实际情况,设置 U/L 位和 I/G 位的值。

U/L(统一/本地标识):又叫全球/本地标识符,位于图 3-8 中的 u 位,用以指定该地址是统一管理地址还是本地管理地址。U/L=1 表示本地管理地址方式,U/L=0 则表示统一管理地址方式。

I/G(单播/组播标识):位于图 3-8 中的 g 位,用以指定该地址是单播地址还是组播地址。I/G=0 表示单播,I/G=1 表示组播。

例如:

MAC 地址: 0012:3400:ABCD

二进制形式: 00000000 00010010 00110100 00000000 10101011 11001101

插入 FFFE: 00000000 00010010 00110100 11111111 11111110 00000000 10101011 11001101

设 U/L 位: 00000010 00010010 00110100 11111111 11111110 00000000 10101011 11001101

EUI-64 地址: 0212:34FF:FE00:ABCD

其中: U/L 标志设置为 1,表示本地地址管理方式。I/G 标志设置为 0,表示单播地址。

在 EUI-64 地址前面加上链路本地地址前缀 FE80::/64,即得到一个完整的链路本地地址 FE80::0212:34FF:FE00:ABCD。

链路本地地址的配置实例如图 3-9 所示。

- 站点本地地址:如果说链路本地地址只用于单个网络链路,那么站点本地地址则可用于站点。这意味着站点本地地址能用在内联网中传送数据,但不允许从站点直接选路到全球 Internet。站点内的路由器只能在站点内转发包,而不能把包转发到站点外去。站点本地地址的 10 位前缀与链路本地地址的 10 位前缀略有区别,后面紧跟一连串 0。站点本地地址的子网标识符为 16 位,而接口标识符同样是 64 位基于 IEEE 的地址。

与链路本地地址不同的是,站点本地地址不是自动生成的。一个本地站点前缀和地址可以分配给站点内任何结点,包括路由器。

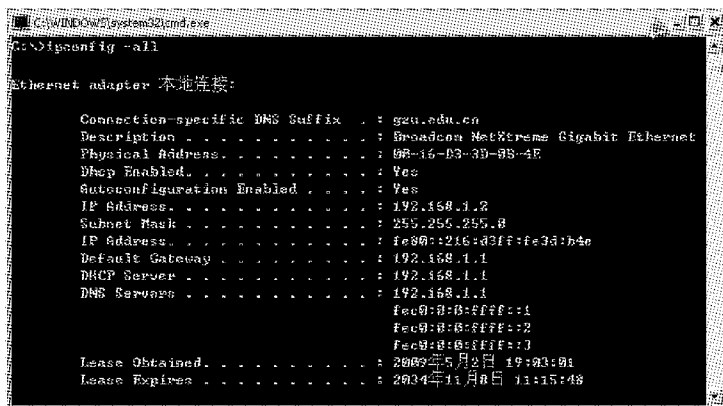


图 3-9 链路本地地址配置实例

站点本地地址是另一种应用范围受限的地址,只能在一个站点内使用。这类似于 IPv4 中的内部私有地址。凡没有申请到可聚合单播地址的组织机构,都可使用站点本地地址来组建局域网。

站点本地地址格式为 FEC0::Subnet ID: Interface ID。

(7) NSAP 和 IPX 地址分配

IPng 的目标之一是要统一整个网络世界,使 IP、IPX 和 OSI 网络间能进行互操作。为了支持这种互操作性,IPv6 为 OSI 和 IPX 各保留了 1/128 的地址空间。关于 NSAP 地址分配的描述详见 RFC 1888(OSI NSAP 和 IPv6)。

NSAP 是以 0000 001 为前缀的地址空间;Novell 的 IPX 是以 0000 010 为前缀的地址空间。

3.2.2 组播地址

1. 组播地址的概念

组播是一组接口(一般属于不同结点)的标识符。送往一个组播地址的包将同时被拥有该标识符的所有网络接口收到。

像 IPv4 广播地址一样,IPv6 组播地址在类似老式以太网的本地网中特别有用,在这种网中,所有结点都能检测出线路上传输的所有数据。每次传输开始时,每个结点检查其目的地址,如果与本结点接口地址一致,结点就接收该传输的其余部分,这使结点接收广播和组播传输相对比较简单。如果是广播,结点只需侦听,无须做任何决定,因此也很简单。对组播来说,稍复杂一些,结点要预订一个组播地址,当检测出目的地址为组播地址时,必须确定是否是结点预定的那个组播地址。

当结点预订组播地址时,它声明要成为组播的一个成员。于是任何本地路由器都将该结点的名称预订组播地址。同一网络上的其他结点要发送信息到该组播地址时,IP 组播包将被封装到链路层组播数据传输单元中。在以太网上,封装的单元指向以太网组播地址;在用点对点电路传输的网络(如 ATM)上,通过某些机制将包发送给订户,通常通过某类服务器将包发送给每个订户。对于从本地网以外来的组播,用同样的方法处理,