

防火墙之后（这时使用 TCP）。

但是分组的丢失并不一定会造成人们想象中的灾难。实际上，取决于语音是如何编码和传输的以及接收方隐藏丢包的方式，1%~20%的丢包率是可以忍受的。例如，前向纠错（FEC）能够有助于隐藏丢包。我们后面可以看到，通过使用 FEC，将冗余信息和初始信息一起传输，以便能够从冗余信息中恢复一些丢失的初始数据。无论如何，如果发送方和接收方之间的一段或多段链路严重拥塞，丢包率超过 10%~20%（例如在无线链路上），那么无论采取何种措施都无法获得可以接受的声音质量了。显然，尽力而为服务有它的局限性。

## 2. 端到端时延

端到端时延（end-to-end delay）是以下因素的总和：路由器中的传输、处理和排队时延，链路中的传播时延和端系统的处理时延。对于实时会话式应用，例如 VoIP，听电话的人对于小于 150ms 的端到端时延是觉察不到的；在 150ms 和 400ms 之间的时延能够接受，但是不够理想；超过 400ms 的时延可能严重妨碍语音谈话的交互性。VoIP 应用程序的接收方通常忽略时延超过特定阈值（例如超过 400ms）的任何分组。因此，时延超过该阈值的分组等效于丢弃。

## 3. 分组时延抖动

端到端时延的一个关键成分是一个分组在网络路由器中经历的变化的排队时延。由于这些可变的时延，从在源中产生分组到它在接收方收到的这段时间，对于不同的分组可能会有波动，如图 7-1 所示。这个现象称为时延抖动（jitter）。举一个例子，考虑在 VoIP 应用中两个连续的分组。发送方在发送第一个分组 20ms 之后发送第二个分组。但是在接收方，这两个分组之间的间隔可能变得大于 20ms。为了解释这一点，假设第一个分组到达路由器的一个几乎为空的队列，但是恰好在第二个分组到达该队列之前，从其他源来的大量分组也到达了相同的队列。因为在这个路由器中第一个分组经受了很小的排队时延，而第二个分组经受了较大的排队时延，这两个连续的分组之间的时间间隔变得大于 20ms 了。两个连续分组的间隔也可能会小于 20ms。为了解释这种情况，再次考虑两个连续的分组。假设第一个分组加入一个有大量分组队列的队尾，并且第二个分组到达这个队列时第一个分组尚未被传输，而且来自其他源的分组尚未到达该队列。在这种情况下，这两个分组发现它们在队列中互相紧挨着。如果在路由器的出链路传输一个分组所需时间小于 20ms，则第一个分组和第二个分组的间隔就变得小于 20ms 了。

这种情况可以与在公路上开车相类比。假设你和你的朋友每人驾驶一辆车从圣地亚哥到凤凰城。并且假设你和朋友有类似的驾驶风格，而且你们都以交通规则允许的 100km/h 的速度驾驶。如果你的朋友在你之前一个小时出发，那么根据干扰车流量的不同，你可能在你的朋友之后一个多小时左右到达凤凰城。

如果接收方忽略了时延抖动的存在，一旦该块到达就开始播放，那么在接收方产生的音频质量很容易变得不可理解。幸运的是，时延抖动通常可以通过使用序号（sequence number）、时间戳（timestamp）和播放时延（playout delay）来消除，如下面所讨论的内容。

### 7.3.2 在接收方消除音频的时延抖动

对于 VoIP 应用，周期性地产生分组，接收方应该存在存在随机网络时延抖动的情况下