

muestra una cola. Si establece una velocidad de llegada de los paquetes lo suficientemente alta como para que la intensidad de tráfico sea mayor que 1, comprobará que la cola aumenta lentamente con el tiempo.

Pérdida de paquetes

En las explicaciones hasta ahora, hemos supuesto que la cola es capaz de almacenar un número infinito de paquetes. En la práctica, una cola para acceder a un enlace tiene una capacidad finita, aunque la capacidad de la cola depende fundamentalmente del diseño y del coste del router. Puesto que la capacidad de cola es finita, los retardos de los paquetes realmente no se aproximan a infinito a medida que la intensidad de tráfico se aproxima a 1. En su lugar, un paquete puede llegar y encontrarse con que la cola está llena. Al no tener sitio para almacenar dicho paquete, el router lo **elimina**; es decir, el paquete se **pierde**. Este desbordamiento de una cola puede verse también en el applet de Java, cuando la intensidad de tráfico es mayor que 1.

Desde el punto de vista de un sistema terminal, un paquete perdido es un paquete que ha sido transmitido al núcleo de la red pero que nunca sale de la red para llegar a su destino. El porcentaje de paquetes perdidos aumenta a medida que crece la intensidad de tráfico. Por tanto, el rendimiento de un nodo suele medirse no solo en función del retardo, sino también en función de la probabilidad de pérdida de paquetes. Como veremos en los siguientes capítulos, un paquete perdido puede retransmitirse de extremo a extremo para garantizar que todos los datos sean transferidos desde el origen hasta el destino.

1.4.3 Retardo extremo a extremo

Hasta el momento nos hemos centrado en el retardo nodal, es decir, el retardo en un único router. Ahora vamos a ocuparnos del retardo total entre el origen y el destino. Para entender este concepto, suponga que hay $N-1$ routers entre el host de origen y el host de destino. Suponga también, por el momento, que la red no está congestionada (por lo que los retardos de cola son despreciables), que el retardo de procesamiento en cada router y en el host de origen es d_{proc} , que la velocidad de transmisión de salida de cada router y del host de origen es de R bits/segundo y que el retardo de propagación en cada enlace es igual a d_{prop} . Los retardos nodales se suman para proporcionar el retardo extremo a extremo, luego

$$d_{\text{extremo-extremo}} = N(d_{\text{proc}} + d_{\text{trans}} + d_{\text{prop}}) \quad (1.2)$$

donde, de nuevo, $d_{\text{trans}} = L/R$, siendo L el tamaño del paquete. Observe que la Ecuación 1.2 es una generalización de la Ecuación 1.1, en la que no se tenían en cuenta los retardos de procesamiento y de propagación. Dejamos para el lector el ejercicio de generalizar esta fórmula para el caso en que los retardos en los nodos sean diferentes y exista un retardo medio de cola en cada nodo.

Traceroute

Para ver el orden de magnitud del retardo extremo a extremo de una red de computadoras, podemos utilizar el programa Traceroute. Se trata de un programa simple que se puede ejecutar en cualquier host de Internet. Cuando el usuario especifica un nombre de host de destino, el programa del host de origen envía al destino varios paquetes especiales. A medida que estos paquetes se dirigen a su destino, pasan a través de una serie de routers. Cuando un router recibe uno de estos paquetes especiales, devuelve al origen un mensaje corto que contiene el nombre y la dirección del router.

Más concretamente, suponga que hay $N-1$ routers entre el origen y el destino. Entonces el origen enviará N paquetes especiales a la red, todos ellos dirigidos al destino final. Estos N paquetes especiales se marcan de 1 (el primero) a N (el último). Cuando el router n -ésimo recibe el paquete n -ésimo marcado como n , el router no reenvía el paquete hacia su destino, sino que devuelve un



Nota de vídeo

Utilización de Traceroute para descubrir rutas de red y medir el retardo de la red.

mensaje al origen. Cuando el host de destino recibe el paquete N -ésimo, también devuelve un mensaje al origen. El origen registra el tiempo transcurrido entre el momento en que envió un paquete y el momento en que recibe el correspondiente mensaje de respuesta; también registra el nombre y la dirección del router (o del host de destino) que devuelve el mensaje. De esta forma, el origen puede reconstruir la ruta seguida por los paquetes que fluyen desde el origen hasta el destino, y puede también determinar los retardos de ida y vuelta para todos los routers que intervienen en el proceso. En la práctica, Traceroute repite el proceso que acabamos de describir tres veces, de modo que el origen realmente envía $3 \cdot N$ paquetes al destino. El documento RFC 1393 describe en detalle el programa Traceroute.

He aquí un ejemplo de la salida proporcionada por el programa Traceroute, en el que se ha trazado la ruta desde el host de origen `gaia.cs.umass.edu` (en la Universidad de Massachusetts) al host `cis.poly.edu` (en la Universidad Politécnica de Brooklyn). La salida consta de seis columnas: la primera de ellas contiene el valor n descrito anteriormente, es decir, el número del router a lo largo de la ruta; la segunda columna especifica el nombre del router; la tercera indica la dirección del router (con el formato `xxx.xxx.xxx.xxx`); las tres últimas columnas especifican los retardos de ida y vuelta correspondientes a los tres experimentos. Si el origen recibe menos de tres mensajes de cualquier router (debido a la pérdida de paquetes en la red), Traceroute incluye un asterisco justo después del número de router y proporciona menos de tres tiempos de ida y vuelta para dicho router.

```

1  cs-gw (128.119.240.254) 1.009 ms 0.899 ms 0.993 ms
2  128.119.3.154 (128.119.3.154) 0.931 ms 0.441 ms 0.651 ms
3  -border4-rt-gi-1-3.gw.umass.edu (128.119.2.194) 1.032 ms 0.484 ms 0.451 ms
4  -acr1-ge-2-1-0.Boston.cw.net (208.172.51.129) 10.006 ms 8.150 ms 8.460 ms
5  -agr4-loopback.NewYork.cw.net (206.24.194.104) 12.272 ms 14.344 ms 13.267 ms
6  -acr2-loopback.NewYork.cw.net (206.24.194.62) 13.225 ms 12.292 ms 12.148 ms
7  -pos10-2.core2.NewYork1.Level3.net (209.244.160.133) 12.218 ms 11.823 ms 11.793 ms
8  -gige9-1-52.hsipaccess1.NewYork1.Level3.net (64.159.17.39) 13.081 ms 11.556 ms 13.297 ms
9  -p0-0.polyu.bbnplanet.net (4.25.109.122) 12.716 ms 13.052 ms 12.786 ms
10 cis.poly.edu (128.238.32.126) 14.080 ms 13.035 ms 12.802 ms

```

Podemos ver en esta traza que existen nueve routers entre el origen y el destino. La mayor parte de estos routers tiene un nombre y todos ellos tienen direcciones. Por ejemplo, el nombre del Router 3 es `border4-rt-gi-1-3.gw.umass.edu` y su dirección es `128.119.2.194`. Si observamos los datos proporcionados para este mismo router, vemos que en la primera de las tres pruebas el retardo de ida y vuelta entre el origen y el router ha sido de 1,03 milisegundos. Los retardos de ida y vuelta para las dos pruebas siguientes han sido 0,48 y 0,45 milisegundos, respectivamente. Estos retardos de ida y vuelta contienen todos los retardos que acabamos de estudiar, incluyendo los retardos de transmisión, de propagación, de procesamiento del router y de cola. Puesto que el retardo de cola varía con el tiempo, el retardo de ida y vuelta del paquete n enviado al router n puede, en ocasiones, ser mayor que el retardo de ida y vuelta del paquete $n + 1$ enviado al router $n + 1$. De hecho, puede observar este fenómeno en el ejemplo anterior: ¡los retardos correspondientes al Router 6 son mayores que los correspondientes al Router 7!

¿Desea probar el programa Traceroute? Le recomendamos *vivamente* que visite el sitio <http://www.traceroute.org>, donde se proporciona una interfaz web a una extensa lista de orígenes para el trazado de rutas. Seleccione un origen y especifique el nombre de host de cualquier destino. El programa Traceroute hará entonces todo el trabajo. Hay disponibles diversos programas software gratuitos que proporcionan una interfaz gráfica para Traceroute; uno de nuestros programas favoritos es PingPlotter [PingPlotter 2016].