

# 支援 QoS 及多點傳送的網路資源預約架構 QoS and Multicast Supported Network Resource Reservation Architecture

馬義程, 廖怡欽, 羅文聰, 黃秀芬, 王益文  
I-Cheng Ma, Yi-Ching Liaw, Winston Lo, I-Wen Wang, Shioh-Fen Hwang

Department of Information Engineering Computer Science  
Feng-Chia University, Taichung, Taiwan  
ycliaw@pine.iecs.fcu.edu.tw

## 摘要

本論文提出一支援多點傳送與服務品質(QoS)保障的網路資源預約架構。為了減少網路頻寬使用量及增加網路資源分配彈性,我們分別加入多媒體資料過濾器(filter)及範圍式 QoS 參數策略。最後我們更推導出兩個數學公式,以估算傳統多點傳送方式及本論文所提架構所需的頻寬使用量。

## Abstract

This paper proposes a QoS and Multicast supported network resource reservation architecture. To reduce the bandwidth requirement and increase the flexibility of network resource allocation, we add the multimedia data filter and the rangeable QoS parameter scheme. Finally, we induct two formulas for estimate the bandwidth utilization of traditional Multicast scheme and our scheme.

## 1. 簡介

網路頻寬及傳輸品質是實現網路多媒體應用(如隨選視訊及遠距教學等)最基本的要求,但是目前的網際網路環境除了頻寬不足外,也無法提供任何服務品質的保證。

要解決網路頻寬不足的問題單從提高可用的網路頻寬是不夠的,因為目前網路頻寬的增加速度遠不及網路頻寬需求量的成長速度。因此除了想辦法提高可用的網路頻寬外,還得更有效率的利用目前可用的少量頻寬。“多點傳送(Multicast)”[5]便是為求更有效率的使用頻寬所發展的一項技術,它可有效減少在群組軟體應用中所需傳送的資料量。因為在有支援多點傳送的环境中,傳送端只需傳送一份出去,該資料便可傳送到所有接收端的手上。這比起傳統單點傳送(Unicast)方式需傳送同樣的資料給每個接收者,顯然有效率的。但是因為多點傳送只能在多個接收端需要相同資料時才能發揮功效,所以當接收端所要求的 QoS 等級不盡相同時,多點傳送所能得到的改善便顯得十分有限了。例如:可供選用的 QoS 等級有三種,

分別為{16,32,64} (單位:Kbps),有 8 個接收端,其分佈情形及選用的 QoS 等級如圖 1 所示,從圖 1 中我們可以看到 link 的最大頻寬使用量為所有 QoS 等級資料的和。

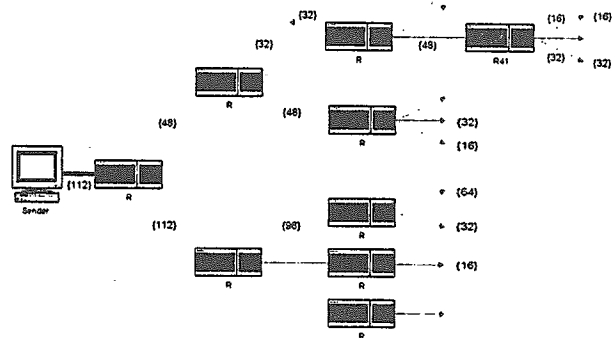


圖 1 傳統多點傳送法傳送不同 QoS 等級資料的例子

要解決此問題,可在 router 上加上多媒體過濾器(filter)[3],利用 filter,發送端只需傳送一份所有接收端要求的 QoS 等級中最高的資料,該資料會在適當的分支處被 filter 過濾成較低等級的資料,最後才送到適當的接收端手中。因此與傳統多點傳送方式相比,發送端只需傳送一份最大 QoS 等級的資料,而不用再傳送每一份 QoS 等級的資料,因此可以減少頻寬的使用量。

對於提供網際網路服務品質保障方面,目前已有許多相關研究及規格出現[1][2][4][6][7][9][10][13][14][15][16][17][18],其中較為人熟知的有 IETF 小組所提出的 RSVP (Resource ReSerVation Protocol) [1][2][15] 及 CIP Working Group 小組所提出的 ST-II (Stream Protocol Version 2) [7][18]。

為了提供網際網路服務品質保障的能力,減少多點傳送方式在傳送多種 QoS 等級資料時所面臨的問題,所以我們參考 RSVP 的架構並加入多媒體資料過濾器(filter),提出一個可支援多點傳送的網路 QoS 架構。為了提高網路資源分配的彈性及增進網路使用率,我們也支援“範圍式(Rangeable)”QoS 參數[8]。

為了比較本論文所提出的網路 QoS 架構與傳統多點傳送用於 QoS 環境上的網路頻寬使用量差異,

本論文提出一數學模型-網路頻寬模型(NBM; Network Bandwidth Model)-以分析整個網路頻寬的使用情形。並依此模型推導出兩個數學的一般解(分別為傳統多點傳送與本論文所提加入過濾器之多點傳送的頻寬耗用情形),可供計算任意個接收端及任意個 QoS 等級時,網路頻寬的使用情形。最後並提供模擬結果,供觀察兩者之間的差異,從模擬結果可以清楚的看到本論文所提出的架構確實可以有效減少網路頻寬使用量。

## 2. 網路 QoS 架構

為提供一個具有網路服務品質保障的環境,本論文提出一個位於應用層、接收端導向(receiver-oriented)且與網路協定無關(protocol independent)之網路 QoS 架構。在此架構中,我們將網路成員分成“接收端”(Receiver)、“路由器”(Router)、以及“發送端”(Sender)三類。其架構如圖 2 所示:

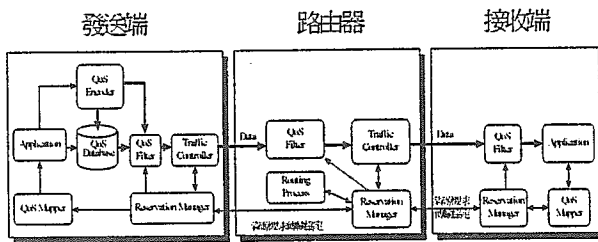


圖 2 網路 QoS 架構

在本節中,我們將分兩小節介紹所提之網路 QoS 架構中各功能模組的功能說明及資源預約管理部份的設計。

### 2.1 功能模組

底下分別說明接收端、路由器、及發送端三者內部各功能模組的功能。

#### ■ 接收端

**Application:** 即要求資源之應用程式,如 VoD 或視訊會議的應用程式,它必須提供使用者設定應用層 QoS 參數的介面,讓使用者設定可容許的 QoS 範圍。

**QoS Mapper:** 負責將應用層的 QoS 參數轉成網路層的 QoS 參數,以要求網路資源。

**Reservation Manager:** 負責管理所負責區域之網路資源,並使用資源要求傳輸協定協調配置應用程式所要求的網路資源。

**QoS Filter:** 在接收端,所收到的資料可能不符合應用程式的 QoS 需求(可能發生於兩個位於共享網路資源之 LAN 上的機器,要求不一樣的 QoS 時),所以必須透過 QoS Filter 將收到之資料轉成適當之 QoS 等級後才能

供應用程式使用。

#### ■ 路由器

**Reservation Manager:** 除了同接收端的功能一樣外,這裏的 Reservation Manager 還必須與 Routing Process 溝通以取得至發送端路徑的下一個路由器。當資源配置完成後,也得通知 QoS Filter 及 Traffic Controller,讓其產生適當的資料及藉以控制交通量。

**Routing Process:** 找尋最符合所要求 QoS 之路徑,並提供給 Reservation Manager,作為資源要求用。

**QoS Filter:** 負責將進來的資料轉成符合各輸出埠所要求之 QoS 的資料,因此一份資料可能產生許多份不同 QoS 的資料(視每個資料連線的要求,及其所在的位置)。

**Traffic Controller:** 負責將 QoS Filter 送進來之資料依資料特性及輸出埠分類,然後再將分類好之資料依照 QoS 等級做工作排程,以提供每個資料連線所要求的服務品質。

#### ■ 發送端

**Reservation Manager:** 除了啟動相對之 Application,提供使用者所需之服務外,其餘則與路由器上的 Reservation Manager 功能一樣。

**Application:** 提供使用者服務的相對應用程式,如 VoD Server、網路 Radio Server、或視訊會議及網路電話程式。

**QoS Mapper:** 將網路層可用的 QoS 轉成應用層 QoS。

**QoS Encoder:** 將資料壓縮並轉成適當格式存入資料庫中或將即時視訊送給接收端。

**QoS Database:** 可提供多媒體資料之資料庫,其資料之儲存格式與 QoS Filter 的設計有關。

**QoS Filter:** 將資料轉換成符合所要求之 QoS 的資料。

**Traffic Controller:** 所負責的工作與路由器上的 Traffic Controller 差不多,負責管理發送端對外的交通量。

### 2.2 資源預約管理 (Reservation Management; RM)

RM 的主要功能為接受連線建立的請求、資源的分配與管理及協調的動作,也就是當一個應用程式送出 QoS 的要求後, RM 必須負責取得整個網路的可用資源,而當應用程式改變 QoS 要求後, RM 也必須為該應用程式重新分配網路資源。另外,為求增加預約機制的彈性,我們在此系統中使用“範圍式(rangeable)”的預約方式,讓使用者設定可接收品質的範圍,以便動態調整接收的品質,增加網路的使用率。我們將 RM 所負責的工作分成 Admission Process、Mergence Process 及 Resource Process 三個

模組。圖 3 為各模組的定義、功能及其間的關係圖。

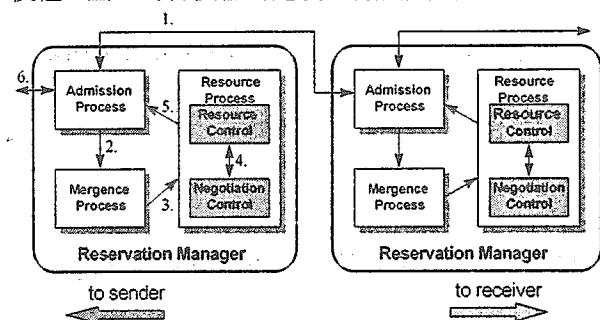


圖 3 Reservation Manager 模組關係圖

### 2.2.1 預約管理的流程

當應用程式對 QoS 系統做出請求時，其 RM 內各模組及 RM 間之關係如圖 3 所示，各功能模組間之運作情形，簡述如下：

1. 接收端經由 Reservation Protocol 向 Admission Process 發出預約訊息。
2. 當請求有重疊時，通知 Mergence Process 做合併動作。
3. 若合併當時資源不足，則須通知 Negotiation Control，來協調降低已連線者的品質。
4. 合併完成向 Resource Control 要求 resource。
5. Resource Process 回應現有網路資源是否滿足接受端的連線請求。
6. 接受請求，循序往上層之 RM 送出請求；反之，沿原預約路徑送出拒絕 (reject) 訊息給原請求者。

### 2.2.2 預約管理的功能模組

- Admission Process：主要功能為協調 RM 內部各模組之運作，收送 reservation message，並依據其他模組之運作結果，決定是否接受接收端之請求。
- Mergence Process：主要功能是将資料來源相同且 QoS 範圍重疊的請求合併，並使用相同的 QoS 等級，以減少網路資源的浪費，並提高網路的使用率。
- Resource Process：此部份又分成兩個模組：
  - Resource Control：負責：
    - (a) 資源管理，
    - (b) 判斷現有資源是否足夠供新請求使用，
    - (c) 紀錄並保留已達成預約者的要求及資源。
  - Negotiation Control：當網路資源不足以完成新連線請求時，便先逐次降低其 QoS 等級，直到完成連線的動作。若 QoS 等級已降至所設定的下限後，仍無法滿足請求時，Negotiation Control 便必須調降已存在使用

者的 QoS 等級，釋放網路資源，以提高新請求達成連線的機會。

### 3. 網路頻寬模型(Network Bandwidth Model;NBM)

在我們的架構下，每個接收端都必須在所有可用的 QoS 等級集合中選取所能接受的最高及最低服務品質等級。因此本論文所提之支援 QoS 的多點傳送架構 (QoS Supported Multicast;QSM) 與傳統多點傳送方式所使用的網路頻寬差異並非常數，所以我們只能求取使用此兩種傳送方式時網路頻寬使用量的上限及下限。要求網路頻寬使用量的下限我們假設實際網路為如圖 4 所示的網路模型。

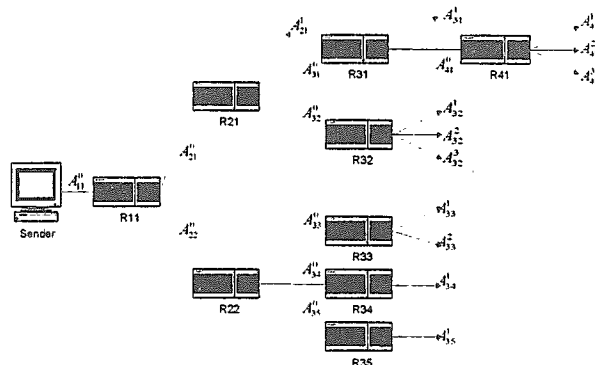


圖 4 網路模型

在圖 4 中“R”代表 router， $A_{ij}^k$  表 Router 對外連線所要求之最低服務品質，其中  $i$  為此 router 距 sender 的層數 (第一個 router 為 1)，最多  $s$  層； $j$  表 router 在該層中的順序 (由上而下，分別為  $1 \sim \ell_i$ )， $k$  表 router 所接到的 receiver 編號。 $A_{ij}^0$  表該 router 所有其它連線所要求之最低服務品質的集合，例如圖 4 中之  $A_{32}^0$  表示與第 3 階第 2 個 router 相接的 3 個 receiver 要求之最低服務品質的集合。因此我們可以使用式子(1)來表示每個 router 跟上層要求之最低服務品質的集合。

$$A_{ij}^0 = \left( \bigcup_{k=1}^{n_{ij}} A_{ij}^k \right) \cup \left( \bigcup_{j=1}^{\ell_{i+1}} A_{(i+1),j}^0 \right) \dots \dots \dots (1)$$

其中  $n_{ij}$  表直接接到該 router 的 receiver 個數。同理，我們也可以使用式子(2)來表示每個 Router 跟上層要求之最高服務品質的集合。

$$B_{ij}^0 = \left( \bigcup_{k=1}^{n_{ij}} B_{ij}^k \right) \cup \left( \bigcup_{j=1}^{\ell_{i+1}} B_{(i+1),j}^0 \right) \dots \dots \dots (2)$$

在傳統多點傳送的做法上，會把不同的 QoS 等級視為不一樣的資料，故會傳送多份資料；但本論文所提之 QSM，僅須傳送一份具有最大服務品質等級之資料即可。因此，每一 router 在兩種多點傳送方式

下與上層 router 或 sender 連線所需的頻寬下限(Lower Bound)與上限(Upper Bound)分別 爲：

■ 傳統多點傳送：

$$L_{ij}^{Trad} = \sum_{X \in A_{ij}^0} X, U_{ij}^{Trad} = \sum_{X \in B_{ij}^0} X$$

■ QSM：

$$L_{ij}^{QSM} = \max_{X \in A_{ij}^0} X, U_{ij}^{QSM} = \max_{X \in B_{ij}^0} X$$

而整個主幹網路 (Backbone, 意即所有 router 與上層 router 或 sender 之間連線所使用的頻寬總和) 所需的最小與最大頻寬則爲：

■ 傳統多點傳送：

$$L^{Trad} = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^{\ell_i} L_{ij}^{Trad} + C, U^{Trad} = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^{\ell_i} U_{ij}^{Trad} + C$$

■ QSM：

$$L^{QSM} = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^{\ell_i} L_{ij}^{QSM} + C, U^{QSM} = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^{\ell_i} U_{ij}^{QSM} + C$$

所以, 使用 QSM 多點傳送方式所得的最低及最高服務品質增益量各爲：

$$G(L) = L^{Trad} - L^{QSM}, G(U) = U^{Trad} - U^{QSM}$$

當我們使用集合的方式來表示下游接收端要求的服務品質時, 會發現  $A_{ij}^0$  或  $B_{ij}^0$  是匯集下游所有接收端所要求之 QoS 等級所成的集合, 所以會有一良好的特性: 即不論  $A_{ij}^0$  或  $B_{ij}^0$  下游連接了多少個接收端, 或是這些接收端離發送端多遠 (意即須跨越多少個 routers), 皆可由  $A_{ij}^0$  或  $B_{ij}^0$  來求得當時單一 link 所需的頻寬大小。也就是說, 單一 link 所需的頻寬與此 link 下游所連接之接收端需跨越 router 的階數是無關的。我們以圖 4 之  $A_{ij}^0$  來表現 NMB 的特性。

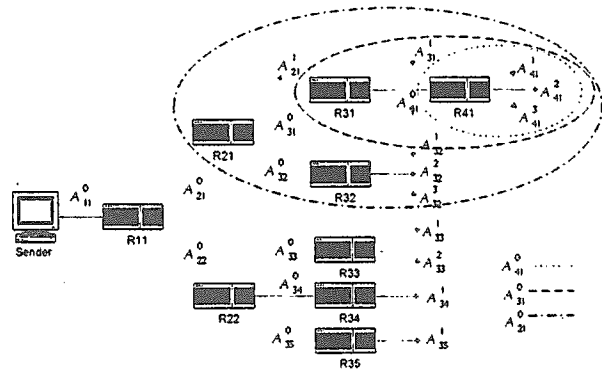


圖 4  $A_{ij}^0$  所轉範圍圖

### 3.1 傳統多點傳送之頻寬使用量公式

由 NBM, 我們可以推得一數學式來表示傳統多點傳送在有  $m$  種 QoS 等級、 $n$  個接收端, 而且恰好只有  $k$  個 QoS 等級被選到時, 網路頻寬使用量之期望值。其式如下：

$$f_n(k) = \frac{1}{m^n} \left[ a_k^{(n)} \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq m} (X_{i_1} + X_{i_2} + \dots + X_{i_k}) \right], \forall 1 \leq k \leq m \dots (3)$$

$$\text{其中 } \begin{cases} a_1^{(n)} = 1 \\ a_k^{(n)} = k^n - \binom{k-1}{1} a_{k-1}^{(n)} - \binom{k-2}{2} a_{k-2}^{(n)} - \dots - \binom{k-1}{k-1} a_1^{(n)} \end{cases}$$

$X_{i_1}, X_{i_2}, \dots$  至  $X_{i_m}$ , 表示每一個 QoS 的等級值。運用組合數學的方法, 可將式子(3)之部份項化簡如下：

$$\sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq m} (X_{i_1} + X_{i_2} + \dots + X_{i_k}) = \binom{m-1}{k-1} \sum_{i=1}^m X_i$$

接著, 我們把式子 (3) 的  $a_k^{(n)}$  逐項展開, 可得下式：

$$a_k^{(n)} = k^n - \binom{k}{1} (k-1)^n + \binom{k}{2} (k-2)^n + \dots + (-1)^{k-1} \binom{k}{k-1} * 1^n$$

所以  $m$  種 QoS 等級、 $n$  個接收端所耗用網路頻寬的期望值即爲：

$$E(X) = \sum_{k=1}^m f_n(k) = \frac{1}{m^n} \sum_{i=1}^m X_i \sum_{k=1}^m \binom{m-1}{k-1} * \left[ k^n - \binom{k}{1} (k-1)^n + \binom{k}{2} (k-2)^n + \dots + (-1)^{k-1} \binom{k}{k-1} * 1^n \right] \dots (4)$$

其中,

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^m \binom{m-1}{k-1} \left[ k^n - \binom{k}{1} (k-1)^n + \binom{k}{2} (k-2)^n + \dots + (-1)^{k-1} \binom{k}{k-1} * 1^n \right] \\ &= \left[ \sum_{j=0}^{m-1} (-1)^j \binom{m-1}{j} \binom{j+1}{j+1} \right] * 1^n + \\ & \left[ \sum_{j=1}^{m-1} (-1)^{j-1} \binom{m-1}{j} \binom{j+1}{j+1} \right] * 2^n + \dots + \\ & \left[ \sum_{j=r-1}^{m-1} (-1)^{j-r+1} \binom{m-1}{j} \binom{j+1}{r} \right] * r^n + \dots + \\ & \left[ \sum_{j=m-2}^{m-1} (-1)^{j-m+2} \binom{m-1}{j} \binom{j+1}{j+1} \right] * (m-1)^n + \\ & \left[ \sum_{j=m-1}^{m-1} (-1)^{j-m+1} \binom{m-1}{j} \binom{j+1}{j+1} \right] * m^n \end{aligned}$$

且,

$$\sum_{j=r-1}^{m-1} (-1)^{j-r+1} \binom{m-1}{j} = (-1)^{r+1} \left[ (-1)^{m-1} \binom{m-1}{r-m+1} \right] = \begin{cases} 1, & r=m \\ -1, & r=m-1 \\ 0, & r \leq m-2 \end{cases} \quad (5)$$

(式子(5), 可參考 [13]P.169 之(5.24)式)  
所以,

$$\sum_{k=1}^m \binom{m-1}{k-1} \left[ k^n - \binom{k}{1} (k-1)^n + \binom{k}{2} (k-2)^n + \dots + (-1)^{k-1} \binom{k-1}{k-1} 1^n \right] = (-1)(m-1)^n + m^n \quad \dots \dots \dots (6)$$

利用(6)可將(4)化簡成如(7)之一般式:

$$E(X) = \frac{1}{m^n} \sum_{i=1}^m X_i \left[ m^n - (m-1)^n \right] = \left[ 1 - \left( \frac{m-1}{m} \right)^n \right] \sum_{i=1}^m X_i \quad (7)$$

### 3.2 QSM 之頻寬使用量公式

同理, 我們可推得公式(8), 可用來求 QSM 在  $m$  種 QoS 等級,  $n$  個接收端時, 網路頻寬使用量之期望值。

$$E(X) = \frac{1}{m^n} \left[ \binom{n}{1} X_1 + \binom{n}{2} X_2 + \dots + \binom{n}{m-1} X_{m-1} + \binom{n}{m} X_m \right] = \frac{1}{m^n} \sum_{i=1}^m \left[ i^n - (i-1)^n \right] X_i \quad \dots \dots \dots (8)$$

在 (8) 式中  $X_i$  表示某一 QoS 等級值, 而其係數表示  $X_i$  被選為最大 QoS 等級時的次數。

## 4. 實驗結果

在這一節我們模擬兩種多點傳送方式的行為, 以得到其網路頻寬的使用情形, 並將結果與利用前一節推出之公式所求得的结果比對。

### 4.1 假設

在對本論文所提之網路頻寬數學模型模擬之前, 我們做了底下的假設:

- 以網路頻寬當成 QoS 的考量參數。
- 所傳送的多媒體資料是可分割的。
- Routers 內的 filter 過濾資料的速度夠快, 不致影響整體效能。
- 網路底層提供適當尋徑機制之支援。

### 4.2 系統模擬

本模擬所採用的 QoS 等級為參考 ISO 11172-3 [11] 所建議之 6 個聲音品質等級 {8, 16, 32, 64, 96, 128} (單位: Kbps)。因此接收端可有以下 15 種選擇: {8, 16}, {8, 32}, {8, 64}, {8, 96}, {8, 128}, {16, 32}, {16, 64}, {16, 96}, {16, 128}, {32, 64}, {32, 96}, {32, 128}, {64, 96}, {64, 128}, {96, 128}。實驗中, 我們假設每一種

組合被選到的機會均等。所模擬的接收端個數分別為 2、3、5、10、20、30 及 50 個。

為了清楚了解本論文所提出之 QSM 與傳統多點傳送方法之頻寬使用量的差異, 我們分別取得 2、3、5、10、20、30 及 50 個接收端向單一發送端做 QoS 請求並取得可用頻寬後的網路頻寬分配情形。然後計算使用傳統多點傳送方法以及 QSM 時 sender 所需送出的資料量。圖 5 即為重複上述步驟 100 次後所得的結果。其中 Trad Min 及 Trad Max 分別是使用傳統多點傳送法模擬時, 所得到的最小值跟最大值; 而 QSM Min 及 QSM Max 則分別是使用 QSM 模擬時所得到的最小值及最大值。

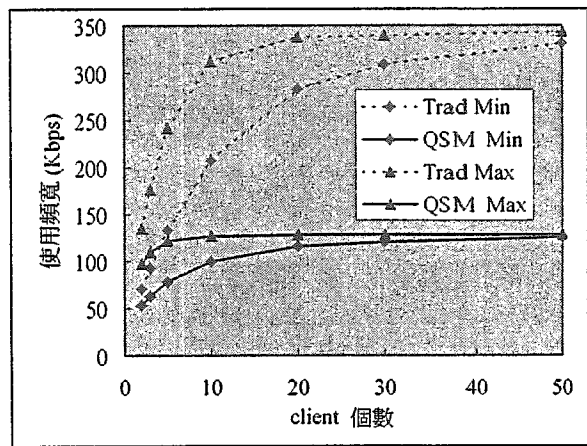


圖 5 傳統多點傳送與 QSM 方式之頻寬使用曲線

由上圖可知本論文所提出的方法確實可減少網路頻寬的使用量及 sender 的負擔, 且當接收端的個數越多時, 增益愈大。

圖 6 及圖 7 分別為傳統多點傳送與 QSM 的模擬結果與理論值之對照。圖中實線為依第 3 節所推出之公式計算得到的值, 虛線則為模擬結果。從圖中可以看到期望期與模擬結果的上限很接近, 且介於上下限之間。

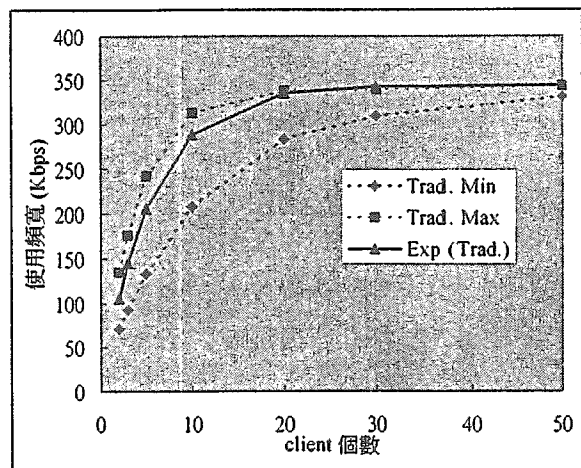


圖 6 傳統多點傳送法頻寬使用曲線之期望值與模擬結果比較

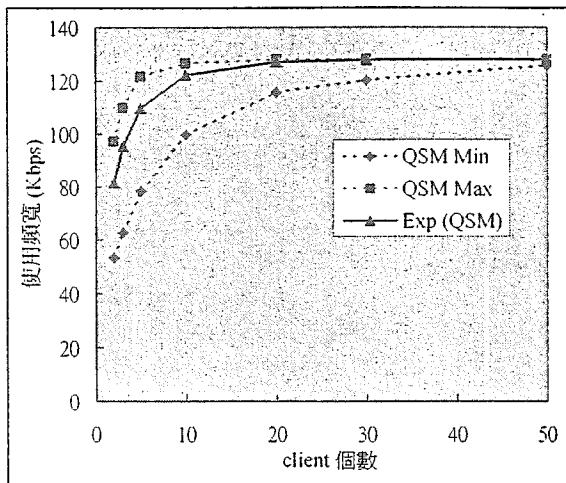


圖 7 QSM 頻寬使用曲線之期望值與模擬結果比較

### 5. 結論

在網路頻寬不足的情況下，要傳送多媒體資料實有其困難，故提供一個穩定且有保障的服務品質傳輸環境是有必要的。為此，本論文提出一個網路 QoS 架構，以提供資源預約的能力，保障資料傳輸時的品質，並在 router 內加入 filter 的機制，使其可依每個接收端所要求的品質等級過濾，以減少網路資源的浪費。接著，本論文提出一數學模型--網路頻寬模型 (NBM)，以求取傳統多點傳送與 QSM 傳送方式之頻寬使用量。NBM 有著與 hop 數無關的良好特性，每個 link 都可依當時下游接收端所要求的 QoS 等級值，透過 NBM 的公式計算其負載。為了方便了解 QoS 參數的等級數與接收端個數與頻寬使用量的關係，我們更推導出兩個數學解，可用來計算傳統多點傳送方式及加入多媒體資料過濾器之方式的頻寬使用量，方便網路及應用程式設計者估算。

最後，我們使用 ISO 11172-3 所建議的 6 個聲音品質，對網路頻寬使用情形作簡單的模擬，由實驗數據發現，接收端數目越多，QSM 所得到的增益也會越大。

### 參考資料

[1] J. Wroclawski, "The Use of RSVP with IETF Integrated Services," Online. Internet. Internet RFC 2210, Sep. 1997.

[2] R. Braden, Ed., L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, S. Jamin, "Resource ReSerVation Protocol (RSVP) - Version 1 Functional Specification," Online. Internet. Internet RFC 2205, Sep. 1997.

[3] N. Yeadon, F. Garcia, D. Hutchison, and D. Shepherd, "Filter: QoS support mechanisms for multi-peer communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Commun.* vol. 14, no. 7, Sept. 1996, pp. 1245-1262.

[4] Francisco Garcia, David Hutchison, Andreas Mauthe and Nicholas Yeadon "QoS Support for Distributed Multimedia Communications," *Proceedings of IFIP/IEEE International Conference on Distributed Platforms*, Dresden, Germany, Feb 1996.

[5] Vinay Kumar, *MBone: Interactive Multimedia on the Internet*, New Riders, 1996.

[6] A. Hafid and R. Dssouli, "A Negotiation Model for Distributed Multimedia Applications," *Proc. of the 1st IEEE International Conference on Multimedia Networkings*, Aizu, Japan, October 1995.

[7] L. Delgrossi and L. Berger, Editors, "Internet Stream Protocol Version 2 (ST2) Protocol Specification - Version ST2+," Online. Internet. Internet RFC 1819, Aug. 1995.

[8] Jen-Shun Yang, "Dynamic Grouping For Multicast Protocols," A Thesis of Electrical Engineering and Computer Engineering and Science, June 1995.

[9] Klara Nahrstedt and Ralf Steinmetz, "Resource Management in Networked Multimedia Systems," *IEEE Computer*, May 1995.

[10] Klara Nahrstedt and Jonathan M. Smith, "The QoS Broker," *IEEE Multimedia*, Spring 1995.

[11] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 11172-3, *Coding of Moving Pictures and Associated Audio*, Nov. 1994.

[12] Ronald L. Graham, Donald E Kunth and Oren Patashnik, *Concrete Mathematics: A Foundation for Computer Science*, 2nd ed., Addison-Wesley, 1994.

[13] C. Parris, H. Zhang, and D. Ferrari, "Dynamic Management of Guaranteed Performance Connections," *Proc. Infocom 94*, Vol. 2 IEEE CS. Press, Calif., 1994.

[14] A. Campbell, G. Coulson and D. Hutchison, "A Quality of Service Architecture," *ACM Computer Comm-unications Review*, Volume 24, Number 2, 1994.

[15] L. Zhang, S. Deering, D. Estrin, S. shenker, and D. Zappala, "RSVP: A New Resource ReSerVation Protocol," *IEEE Network*, Sept. 1993.

[16] ISO IEC JTC 1/SC21, "Basic QoS framework," Sept. 1995, Online. Internet. Available by anonymous ftp from ftp.comp.lancs.ac.uk in directory pub/ISO\_QOSF/ps.format/21N9303.ps.

[17] A. Campbell, G. Coulson, F. Garcia, D. Hutchinson, and H. Leopold, "Integrated Quality of Service for Multimedia Communications," *IEEE INFOCOM*, 1993.

[18] L. Delgrossi, R.G. Herrtwich, and F.O. Hoffmann, "An Implementation of ST-II for the Heidelberg Transport System," *Proc. IEEE Globcomm 92*, CS Press Los Alamitos, Calif., 1992.