

WiMAX-MPLS 異質網路下的標籤交換協議設計

談偉華
長庚大學電機工程學系
博士候選人
e-mail :
twu0107@gmail.com

陳仁暉¹
長庚大學資訊工程學系
副教授
e-mail :
jhchen@mail.cgu.edu.tw

李建德
長庚大學電機工程學系
教授
e-mail :
jdlee@mail.cgu.edu.tw

摘要

做為無線網路存取方案，WiMAX 與多協定標籤交換(MPLS)網路間之整合(簡稱為 WiMPLS)網路，為一趨勢。其中基地台(BS)扮演著兩個異質網路間封包與路由交換的重要角色，然而至今相關標準內，仍無有效解決方案。本文因此提出一跨層(網路層與 MAC 層間)的 ELSP(end-to-end label switching protocol)協定以補其不足。此協定乃由用戶端(SS)以 IEEE 802.16 延伸子標頭攜帶 MPLS 標籤(M-label)的方式，達成分散 BS 封包與路由交換的負擔，直接由 MAC 層進行交換。模擬結果顯示其效能可與硬體加速器系統相當。

關鍵詞：跨層、標籤交換、MPLS、協定、WiMAX。

Abstract

The integration of WiMAX networks and multi-protocol label switching (MPLS) networks, called WiMPLS networks, is a solution for nomadic Internet access to the backhaul network. The base station (BS) in such heterogeneous networks will play the role of bridge and router between the IEEE 802.16 subscriber stations (SSs) and MPLS networks. However, there is no such integrated solution so far. This paper, therefore, adopts a cross-layer fashion (from network layer to MAC layer) to design the (ELSP) for filling this gap. ELSP provides the mechanism of switching transfer by assigning the SS with the MPLS labels (M-labels). The M-label can be carried by the IEEE 802.16e extended subheader within the MAC protocol data unit (MPDU), which is fully compliant with the IEEE 802.16 standard. Simulation results show that ELSP efficiently improves can be as low as

hardware-accelerated IP lookup mechanism.

Keywords: Cross-layer, label switching, MPLS, protocol, WiMAX.

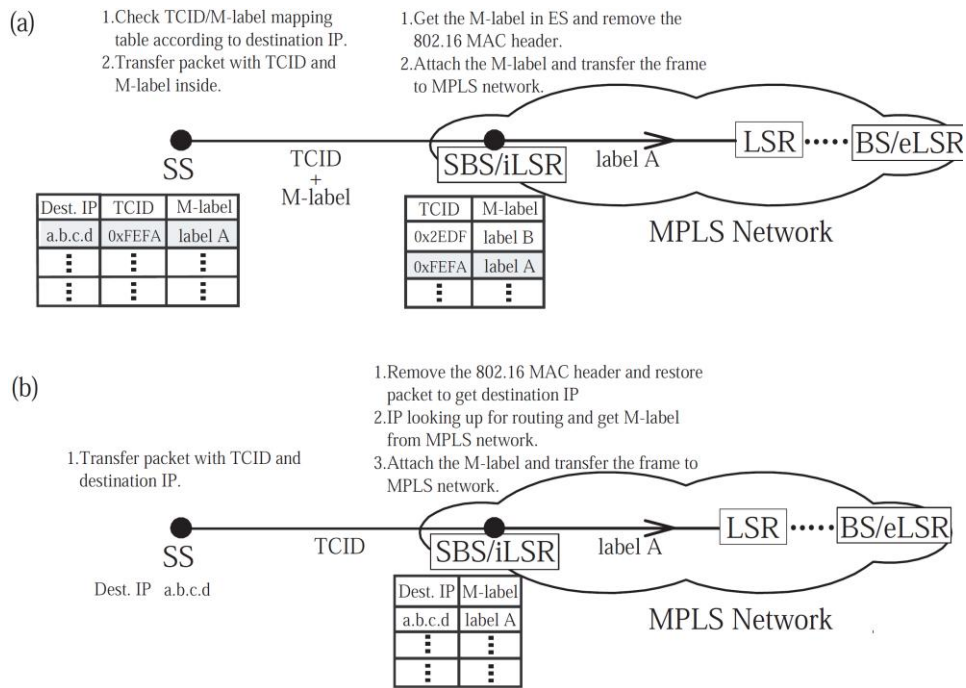
1. 前言

多協定標籤交換(MPLS)技術之提出，主要是用於支援骨幹網路之各種差異性服務(service differentiation)和流量工程 traffic engineering [1]、[2]。近年來，在移動通訊之無線接入網路上，對於 MPLS 的需求亦大幅提提升[3]，[4]。與此同時，一項新興的寬帶無線接入技術，亦即 IEEE 802.16 e/2009 標準[5]，[6]，做為一種支援移動用戶在城域網(MAN)中之無線存取技術，也稱為 WiMAX(全球互通微波存取)網路。然而，此一標準並未提供 WiMAX 和 MPLS 網路間整合的相關機制。

在 WiMAX 網路中，基地台(BS)扮演著路由器/閘道器的作用，做為用戶端(SS)到有線網路間之數據封包傳遞[7]。因此，BS 需要發揮在 WiMAX 網路與 MPLS 網路間，封包格式轉換的橋樑作用。雖然 Chen and Wang 為了為縮短封包處理之延遲，提出了一種跨層直通的交換機制 CCSM[8]，然而這種機制只能在 WiMAX 的局域網(LAN)內運用，但無法擴展到 MPLS 網路，因為 MPLS 使用標籤交換路徑(LSP)標籤來傳送封包[1]，[9]。因此，如何在 WiMAX 和 MPLS 網路(簡稱為 WiMPLS 網路)間進行有效整合，從而提升整體效能，至今仍無有效方案[10]，[11]。所幸在 IEEE 802.16-2009 標準中，提供了一個延伸子標頭(ES, extended subheader)，其功能在用於執行額外的或擴展的特定信息操作。本文的動機是，如果 MPLS 標籤(M-label)可由 SS 知悉，SS 則可以使用 ES 來攜帶 M-label，而由 BS 在 MAC 層中提前就數據訊框(data frame)與 MPLS 主幹網路直接進

¹ 通信作者

本論文經費來源由國科會計畫 NSC101-2221-E-182-032 所提供。



圖一 ELSP 與 MPLS 網路之封包交換示意圖(a)ELSP(b)傳統方式。

行交換，而達成 WiMPLS 網路終端對終端 (end-to-end) 的整合性網路傳輸。在這種方式下，SS 將分擔 BS 的一些路由封包之產生，而 BS 只需從 ES 中提取 M-label，然後依 label 所示，將封包轉送到下一個 M-label 交換路由器 (LSR)，而不會產生太大的延遲。為了實現這一目標，我們進行研究並提出一個由 SS 發起，運用跨層技術(從網路層 L3 到 MAC 層 L2 之間)終端到終端的標籤交換協議(ELSP, end-to-end label switching protocol)，使 BS 有能力直接執行 WiMPLS 整合網路內，終端至終端的封包傳遞。圖一顯示 ELSP 的概念，和現行 WiMAX 與 MPLS 網路間整合傳輸方式之比較。在示意圖中，BS 擔任的，是最初一英里或最後一英里由 WiMAX 網路進行無線接收時的閘道器角色。這種方式，封包可以在這兩種類型的網路間，快速的從一個終端傳遞到另一個終端。此架構特別適合於多媒體流 (multimedia streaming) 之應用，如 VoIP 或移動視訊會議等。

2. 主要內容

在兩種異質網路間傳遞封包，除了透過兩個不同類型 MAC 層的配置外，尚需經過網路 IP 層的查詢，以確定來源與目的地之位置。而在 WiMPLS 整合網路中，BS 擔任著介接的角色，其 MAC 層，擔任無線端的 IEEE 802.16 系統與有線端 MPLS 系統的中間介接，完成有無線電網路間之相互傳遞的功能。而 IEEE

802.16-2009 標準中使用的 ES，更提供了該協定延伸使用的擴充功能。

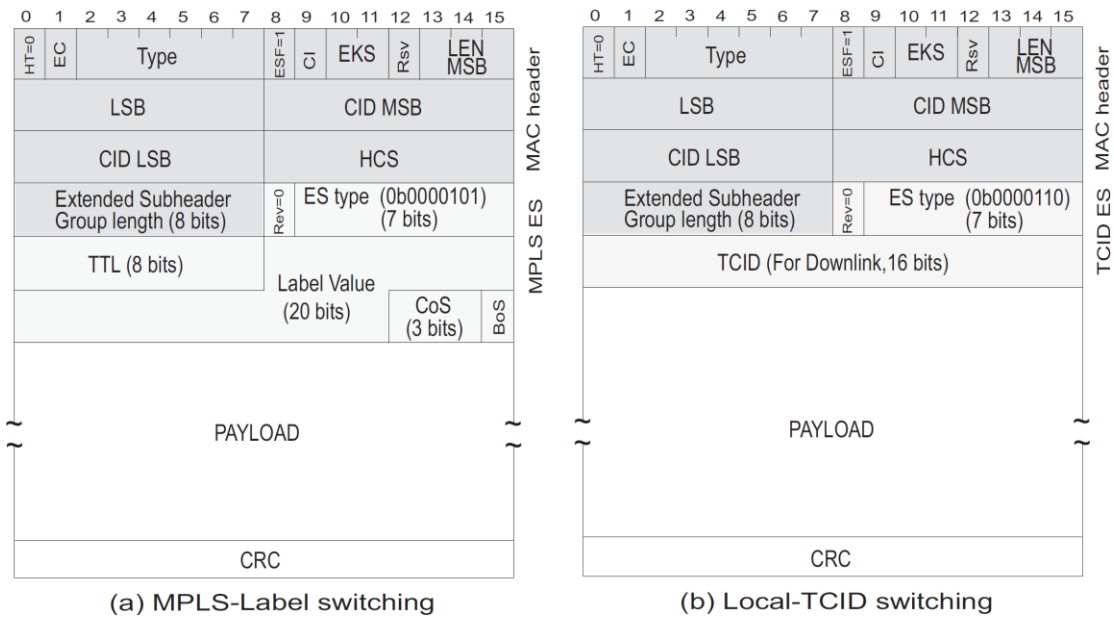
2.1 終端到終端的標籤交換協議(ELSP)

首先，在 IEEE 802.16 協議的一側，在 data frame 傳送時，是藉由 TCID 作為識別 ID。而另一方面，在 LSP 的一側，所述 data frame 則是藉由 M-label 進行傳送與交換[12]。因此首先，BS 必須能夠識別所接收的 data frame 是流出的(outgoing)流量²或本地(local)流量³。ELSP 使用 MAC header 中 ES 的兩個保留類型 [5]，做為上述流出或本地流量之識別用。如圖二所示，為本文所提二種不同的 ES 格式的細部說明。要啟動 ES 功能，必需在 MAC 標頭(header)第九個位元 ES 欄(ESF)設為 1 的情況，若 ESF 設為 0，則此項功能無法啟動。

從 SS 發送到 BS 的封包，依其流量方向，可以劃分為三類：1) 封包流量指向非 IEEE 802.16 系統服務的 Internet 區域，2) 封包流量指向由 IEEE 802.16 系統服務的 Internet 區域，以及 3) 本地流量。由於前兩種是流出流量，將被視為相同的處理程序。因此，在本文中，

² 此流量為 SS 對 BS 以外地區的通訊需求，亦即對 Internet。

³ 對內部，亦即對 BS 所轄範圍內其他 SS 的通訊需求。



圖二 IEEE 802.16 具延伸子標頭之 data frame 標頭格式(a)新延伸子標頭攜帶 M-label 之 ES 類型碼 0b0000101(b)新延伸子標頭攜帶本地 TCID 之 ES 類型碼 0b0000110。

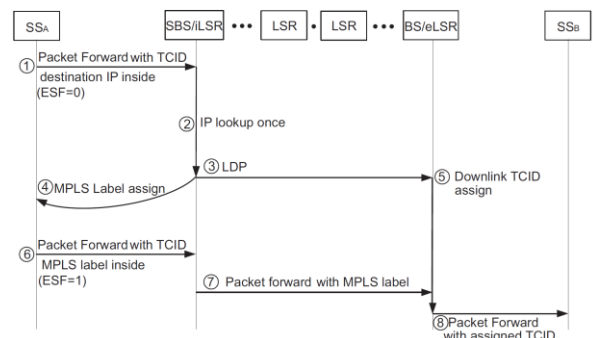
ELSP 將集中在兩種流量類別。第一類是兩個終端為 WiMAX 網路，中間透過 MPLS 網路進行標籤交換的方式。第二類為同屬一個 WiMAX 網路下之本地流量，兩種流量之討論，分述如後。

2.1.1 流出流量

當 SS 有封包要發送到 Internet，它首先會發送一個帶有識別用 TCID 之頻寬請求 (BR) 到 BS 以獲取發送 data 所需的頻寬。在這個階段內，SS 必須等待 BS 的回應，才能進行後面的傳送。從 SS 接收到了 BR 訊框之後，BS 必須透過允入控制 (CAC) 以決定是否接受該頻寬請求。如果該請求最終被接受，BS 將發出一個頻寬賦予訊框 (grant frame) 回給 SS。在接收到頻寬賦予訊框後，SS 即開始發送帶有 TCID 的 MAC 協議數據單元 (MPDU) 至 BS。當 BS 接收到來自 SS 的 MPDU 後，首先它將確定這些 MPDU 是本地流量或流出流量。為了完成此一動作，BS 必須將這些 MAC 層的 MPDU 先行還原為最初的封包，再將其轉送到第三層網路層進行 IP 查詢過程。圖三即為，當 SS 傳送封包至 Internet 時，ELSP 所執行的程序。

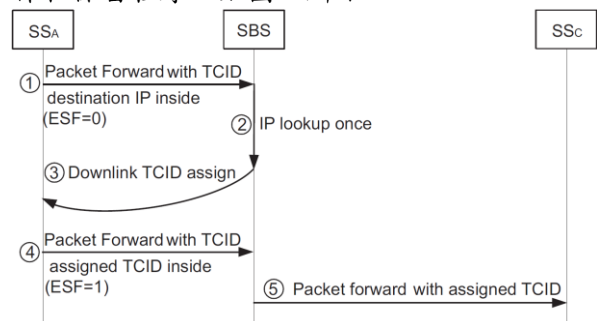
2.1.2 本地流量

為了縮短在同一個 BS 服務區內的各終端至終端間的封包傳輸，ELSP 採用了快速跨層交換的概念[8]以減少區域內封包傳輸的延遲。這種機制是通過讓 SS 發送的 MPDU



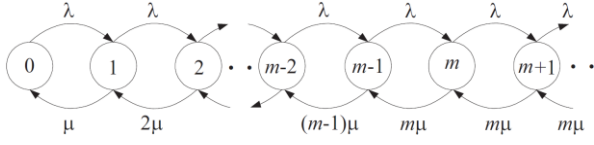
圖三 SS 至 Internet 進行流出流量時，ELSP 之執行程序。

中攜帶自己被分配到的 TCID 和下一個經由 BS 下行鏈路 (downlink) 所傳送到目的地的相關 TCID 所組成。需注意的是，每個 SS 皆維護著一個 IP 與 TCID 間的對應表。每當 SS 改變新的目的 IP 位址而對應表中無相關對應值時，SS 即會向 BS 進行 IP 查詢，並將所得到的新 IP 與 TCID 對應值記入對應表中。其對應表之製作和保留程序，如圖四所示。



圖四 SS 進行本地流量時，ELSP 之執行程序。

2.2 系統模型



圖五 系統之 $M/M/m$ 佇列模型示意圖。

本章就 ELSP 之系統操作延遲 (processing delay) 與總處理量 (throughput) 做一模型探討與效能分析。此模型基於馬可夫鏈 (Markov chain) 的 $M/M/m$ 佇列模型 (queueing model)，而探討重點在於 BS 對 SS 端的上行鏈路 (uplink) 傳遞延遲與流出之總處理量的探討。

而 BS 對於其服務區內之所有 SS 採集中控管方式，同一時間可允許多個 SS 進行通連，每一個 SS 皆可有多個連線 (connection)。圖五即為系統之 $M/M/m$ 佇列模型示意圖，其中，到達率 λ (每個訊框平均之連入需求數) 遵循 Poisson 分佈，有 m 個伺服器 (server)，亦即每個 frame 有 m 個 burst，且每一個的運作皆為 iid (independently and identically distributed)，平均服務時間為 $1/\mu$ (亦即每個 request 所需的平均處理訊框數)，每一個 SS 所需求的頻寬成指數分佈 (exponential distribution)，期望值為 $N_s = k/\mu$ (slots)， k 為每個 SS 平均每個訊框所獲得的 slot 數。 C 為每個訊框所提供之 uplink 容量，單位為 slot。因為有 CAC 機制，故 $C \geq mk$ 。令 $r = \lambda/\mu$ 為系統所提供之工作量 (work load rate)， $\rho = r/m = \lambda/m\mu$ 為一個伺服的平均工作量。依 [13] 所示之 birth-death 過程可求得 MAC 之平均佇列大小 L_q

$$L_q = \left(\frac{r^m \rho}{m!(1-\rho)^2} \right) p_0 \quad (1)$$

其中 p_0 代表無 SS 進入系統之機率，其值為 $1/\left(r^m/m!(1-\rho) + \sum_{n=0}^{m-1} r^n/n!\right)$ ，其中 $\rho < 1$ 。MAC 層存取平均等待時間 T_M ，佇列延遲時間 T_q ，依 Little 公式所示 [14]， $L = \lambda T$ 、 $L_q = \lambda T_q$ ，其中 L 與 L_q 分別代表需求與佇列的數目，我們可求得 $T_M = 1/\mu + T_q = 1/\mu + L_q/\lambda$ ，因此

$$T_M = \frac{1}{\mu} + \frac{r^m}{m!(m\mu)(1-\rho)^2} \left(\frac{r^m}{m!(1-\rho)} + \sum_{n=0}^{m-1} \frac{r^n}{n!} \right)^{-1} \quad (2)$$

2.2.1 軟硬體整合之 IP 查詢延遲

在 BS 的 IP 查詢過程可由 $M/M/1$ 模型描述，由於 $M/M/m$ 佇列的輸出與其輸入相同 [15]。假設某次服務請求的每個封包長度呈指數分佈，且平均長度 ℓ 。令一次服務請求所包含的封包數量 $h = k/\ell\mu$ ，則從 MAC 層執行 IP 查詢的平均封包到達率 $\lambda_p = \lambda h = \lambda k/\ell\mu$ ，則進行 IP 查詢的封包到達率 $\lambda' = \lambda_p + \lambda_i$ ，其中 λ_i 為來自 Internet 的平均封包到達率，若 μ_s 為軟硬體整合的平均服務率 (每個訊框內的封包數)，則 $\rho' = \lambda'/\mu_s$ 為到達 IP 查詢伺服器佇列的工作量，而軟硬體整合之處理延遲

$$t_s = \frac{L'}{\lambda'} = \frac{\rho'}{\lambda'(1-\rho')} = \frac{1}{\mu_s - \lambda'} \quad (3)$$

其中 $L' = \rho'/(1-\rho')$ 。若 M-label 查詢之處理延遲為 t_m ，則軟硬體整合之系統處理延遲時間

$$T_S = t_m + t_s + T_M = t_m + \frac{\mu + \mu_s - \lambda'}{\mu\mu_s - \mu\lambda'} + \frac{\frac{r^m}{m!(m\mu)(1-\rho)^2}}{\left(\frac{r^m}{m!(1-\rho)} + \sum_{n=0}^{m-1} \frac{r^n}{n!}\right)} \quad (4)$$

2.2.2 硬體之 IP 查詢延遲

硬體加速之 IP 查詢處理延遲 T_H 求法近似 T_S ，若 μ_H 為硬體 IP 查詢之處理率，則 IP 查詢處理延遲 $t_H = 1/(\mu_H - \lambda')$ ，同 (4) 式，可得 $T_H = t_m + t_H + T_M$

$$T_H = t_m + \frac{\mu + \mu_H - \lambda'}{\mu\mu_H - \mu\lambda'} + \frac{\frac{r^m}{m!(m\mu)(1-\rho)^2}}{\left(\frac{r^m}{m!(1-\rho)} + \sum_{n=0}^{m-1} \frac{r^n}{n!}\right)} \quad (5)$$

2.2.3 ELSP 之延遲

在一個連續的服務要求中，包含持續的封包傳送，而在 ELSP，只有在第一次尚未建立 TCID 與 M-label 對應表時需進行 IP 查詢，後續由於來源-目的之 IP 皆相同，就不必再進行 IP 查詢。因此，對於 ELSP 而言，IP 查詢之工

作量 $\rho_E = \lambda/\mu_E$ ，且單次的 IP 查詢處理延遲

$$t_E = \frac{L_E}{\lambda} = \frac{\rho_E}{\lambda(1-\rho_E)} = \frac{1}{\mu_E - \lambda}, \quad (6)$$

其中 μ_E 為 ELSP 的 IP 查詢處理率， $L_E = \rho_E/(1-\rho_E)$ ，由於針對相同的目的 IP 僅需進行一次 M-table 的查詢， t_m 可省略，故

$$T_E = t_E + T_M$$

$$= \frac{\mu + \mu_E - \lambda}{\mu\mu_E - \mu\lambda} + \frac{r^m}{\left(\frac{r^m}{m!(1-\rho)} + \sum_{n=0}^{m-1} \frac{r^n}{n!}\right)}. \quad (7)$$

2.2.4 總處理量之計算

系統的總處理量，我們主要著眼於在 uplink 時所進行 IP 查詢之總處理量，其值與所用之調變與編碼率有關。在 ELSP、軟硬體整合系統與硬體加速系統中，其值分別為 $1/T_E$ 、 $1/T_S$ 、 $1/T_H$ 。對 uplink 而言，ELSP 之總處理量 S_E 為

$$S_E = \frac{\lambda k}{\ell \mu T_E} \ell N_b N_f = \frac{\lambda k}{\mu T_E} N_b N_f, \quad (8)$$

N_f 為每秒鐘之訊框數， N_b 為每個 slot 之位元數， N_b 隨著調變編碼率而不同，其時為 $3N_d r_m r_c$ ，其中 N_d 為每個 slot 所含之資料傳送子載波(subcarrier)數， r_m 為每個子載波所帶之位元數，其值與所用之調變方式有關， r_c 為編碼率(如 1/2, 2/3)。相同的，對於軟硬體整合系統而言，其總處理量

$$S_S = \frac{\lambda k}{\mu T_S} N_b N_f, \quad (9)$$

而硬體加速系統之總處理量為

$$S_H = \frac{\lambda k}{\mu T_H} N_b N_f. \quad (10)$$

2.3 數值結果

本節將針對平均處理延遲、所需的頻寬、伺服之數目，以及在不同的 μ 、 N_s 、 m 和 N_b

下之總處理量進行探討，通過用不同的參數如： T_S 、 T_E 、 T_H 、 S_S 、 S_E 和 S_H 進行估測。在下面的分析中，我們採用 FIPL

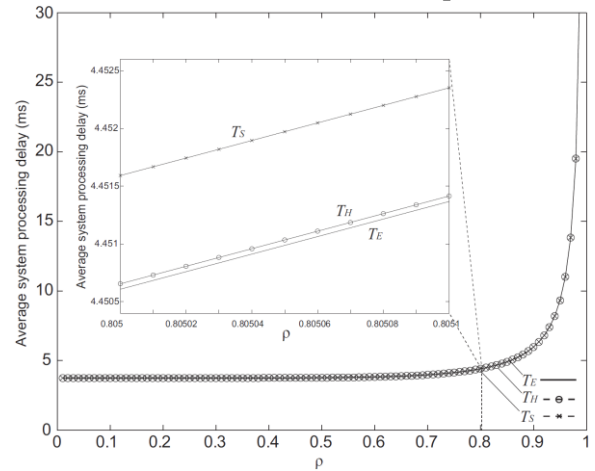
[16]作為 IP 查詢處理機制中軟硬體整合系統之代表，由公式(4)求得 T_S 。而硬體 IP 查詢處理機制，我們採用 TCAM[17]為代表以求得延遲 T_H 。其中，FIPL 的 IP 查詢處理速度為 1 MHz (每秒一百萬次查詢)

[16]或 $\mu_S = 5000$ 次查尋/訊框 (每次查詢費時 1 μ s)。而 TCAM 的 IP 查詢過程的速度是 133 MHz[17]或 $\mu_H = 66666$ 查尋/訊框 (每次查詢費時 75 ns)。

表 1 數值分析參數表

Parameter	Value		
Request Length (Bytes)	625	1250	2500
No. of Slots N_s	18	36	72
μ ($m = 11, k = 24$)	24/18	24/36	24/72
μ ($m = 22, k = 12$)	12/18	12/36	12/72
μ ($m = 44, k = 6$)	6/18	6/36	6/72

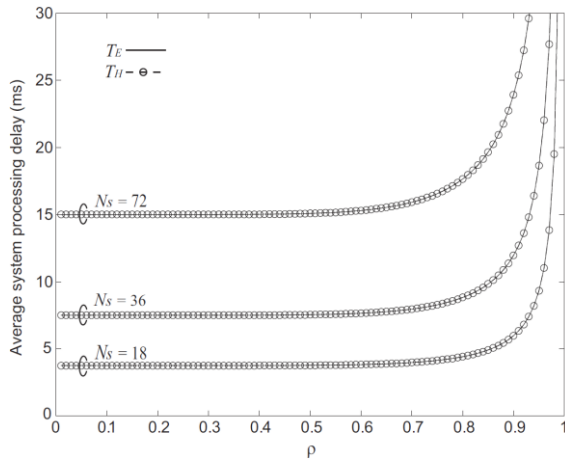
根據 IEEE802.16 標準，在 uplink 通道中一個通道有 35 個子通道(subchannel)，每個子通道皆包含 24 個 OFDMA (orthogonal frequency-division multiple access) 的數據符元 (data symbol)。考慮到穩定狀態時 $\rho < 1$ ，每訊框內平均服務請求到達率 $\lambda = \rho m \mu$ ， $\rho < 1$ 。一個 slot 的容量由所採用調變和編碼方式決定，規格如表 1 所示。假設在每個訊框中的 uplink 的部分



圖六 在 $m=11$ 、 $k=24$ 、 $\ell=18$ 、 $\mu=1.33$ 及傳輸率為 16-QAM 1/2 時，不同工作量下之平均處理延遲。

，除了 2 個子通道被保留為 initial ranging 和 頻寬競爭之用，而允許每個服務請求的頻寬為 $k=24$ slot/frame(基於 QoS 策略)。則共有 264 個 slot 可用於數據傳輸，而當 $k=24$ 時系統中每個通道最大之伺服數為 $m=264/k=11$ 。

圖六所示，依公式(4)、(5)、(7)所得，雖然三條線的距離很近，此乃由於大多數的延遲時間皆發生在 M-label 的查詢延遲 T_M 上，且 $T_M \gg T_E$ 、 T_S 與 T_H ，此表示對於 IP 查詢而言，所耗的時間遠小於 MAC 層的查詢時間。然而將刻度放大後，仍可發現 ELSP 的整體處理延遲，與 TCAM 系統相近，遠優於 FIPL 系統。



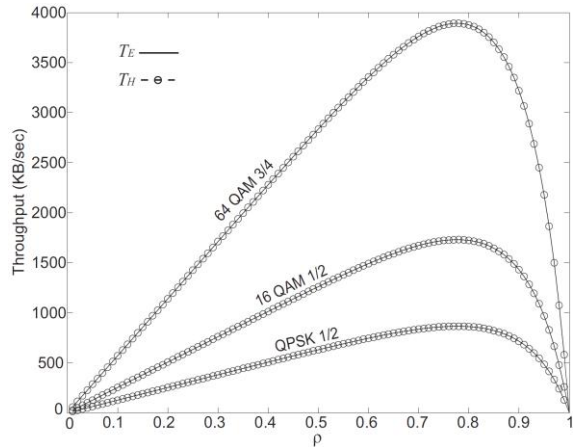
圖七 在 $N_s=18、36、72$ slot/frame 時 $\mu=24/18、24/36、24/72$ ， $k=24、m=11$ 時，不同工作量下之平均處理延遲。

在圖七中，顯示當每個服務請求所含的 slot 數 N_s 分別為 18、36、72 slot/frame 時， T_E 與 T_H 隨著 ρ 值的增加而成指數上升。因為在系統接近飽合的情況下，封包進行查詢的頻率增加，造成系統整體處理延遲時間亦增加，此情況下，ELSP 仍較 TCAM 有較佳的表現，原因仍是因為 ELSP 因為只有在第一次尚未建立 TCID 與 M-label 對應表時需進行 IP 查詢，後續由於來源-目的之 IP 確定後，就不必再進行 IP 查詢，故可得較佳之效能。

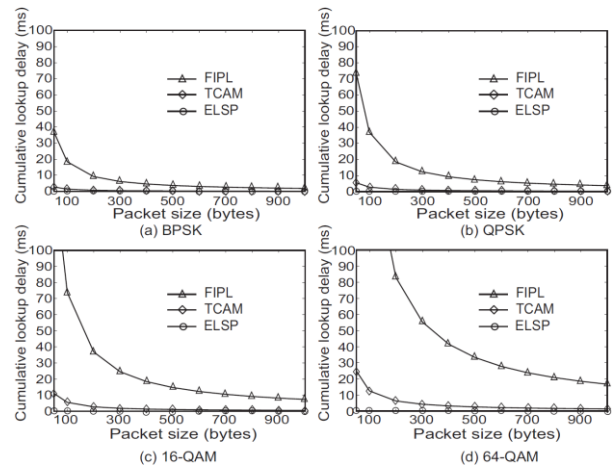
在圖八中，顯示在不同的調變編碼架構如：QPSK 1/2、16-QAM 1/2 及 64-QAM 3/4 下，TCAM 與 ELSP 在不同的工作量下之總處理量變化情形，由圖中可得知，在 QPSK 1/2、16-QAM 1/2 及 64-QAM 3/4 時，TCAM 與 ELSP 的總處理量分別可達 865 KB/sec、1730 KB/sec、以及 3892 KB/sec，此時的系統工作量 $\rho=0.79$ 。

圖九討論在最壞的情況下，亦即系統飽合情況下對於最小封包與最大速率情況下之 IP

查詢處理延遲的路由/轉發引擎處理延遲。所計



圖八 當 $k=24、m=11、N_s=18、\mu=24/18$ 時，不同工作量下之總處理量。



圖九 在不同調變模式下，不同封包大小對累計查詢延遲時間的關係。

算之累計時間是 BS 在一秒鐘內針對 FIPL、TCAM 與 ELSP 三種系統下，IP 查詢之累計處理時間。圖中顯示了不同封包大小對於轉發的 IP 查詢所造成的延遲影響。從圖中不難看出，在所有的方案中，ELSP 仍能獲得相對較低的延遲時間。顯而易見的，在飽和條件下，當 IP 查詢的封包大小變小時，則表示所需處理的封包數目變大，這將造成系統一個沉重的 IP 查詢負擔。因此，產生一個較長的 IP 查詢的延遲時間。但是，由結果我們可以發現，ELSP 的效能總是優於其他兩種方法，因為 ELSP 的 IP 查詢次數，能透過跨層標籤交換機制而使次數減少的原因。

3. 結論

在本文中，我們研究了 WiMAX 網路和 MPLS 骨幹網的整合性解決方案。提出 ELSP 使用軟體架構的方式，協助 BS 能夠達成 1)

直接在 L2 層進行本地和對外之數據封包進行交換，2) 扮演 MPLS 網路中之 ELSR 的角色，和 3) 提供了終端對終端兩個 SS 間直接的 L2 層標籤交換。ELSP 對於 BS 在系統的接取延遲、總處理量和終端到終端的傳輸延遲，終端到終端的總傳輸量等之效能方面，相較於現行 TCAM 和 FIPL 系統，都有極佳的表現。尤其是 ELSP 能達成終端至終端的 L2 傳輸交換，更是適合於時下越來越多的多媒體串流之應用需求。

參考文獻

- [1] F. Le Faucheur, "IETF Multiprotocol Label Switching (MPLS) Architecture," in *Proc. ICATM-98*, pp. 6–15, June 1998.
- [2] R. Nagarajan and E. Ekici, "An Efficient and Flexible MPLS Signaling Framework for Mobile Networks," *Wirel. Netw.*, vol. 14, no. 6, pp. 859–875, Dec. 2008.
- [3] R. Langar, S. Tohme, and N. Bouabdallah, "Mobility Management Support and Performance Analysis for Wireless MPLS Networks," *ACM Wiley Int. J. Netw. Manag.*, vol. 16, no. 4, pp. 279–294, July 2006.
- [4] R. Langar, N. Bouabdallah, R. Boutaba, and B. Sericola, "Proposal and analysis of adaptive mobility management in ip-based mobile networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 8, no. 7, pp. 3608–3619, July 2009.
- [5] IEEE 802.16 Working Group, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems," *IEEE Std. 802.16e-2005*, Feb. 2006.
- [6] IEEE 802.16 Working Group, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems," *IEEE Std. 802.16-2009*, May 2009.
- [7] J. Chen, A.-C. Pang, S.-T. Sheu, and H.-W. Tseng, "High Performance Wireless Switch Protocol for IEEE 802.11 Wireless Networks," *Mobile Netw. Appl.*, vol. 10, no. 5, pp. 741–751, Oct. 2005.
- [8] J. Chen and C.-C. Wang, "Cross-Layer Cut-Through Switching Mechanism for IEEE 802.16d/e Wireless Networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 13, no. 10, pp. 779–781, Oct. 2009.
- [9] C. Metz, "Layer 2 over IP/MPLS," *IEEE Internet Computing*, vol. 5, no. 4, pp. 77–82, July-Aug. 2001.
- [10] J.-W. Dai and L.-F. Chiang, "Hierarchical Wireless Mobile MPLS Mechanism Using Foreign Tracking Agent Based on M/G/1 with Capacity C Queueing Model," *IET Commun.*, vol. 1, no. 5, pp. 903–908, Oct. 2007.
- [11] F. L. Facheur, et. al., "Requirements for Support of DiffServ-Aware MPLS Traffic Engineering," *IETF RFC 3270*, May 2002.
- [12] R. Langar, N. Bouabdallah, and R. Boutaba, "A Comprehensive Analysis of Mobility Management in MPLS-Based Wireless Access Networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 16, no. 4, pp. 918–931, Aug. 2008.
- [13] D. Gross, J. F. Shortle, J. M. Thompson, and C. M. Harris, *Fundamentals of Queueing Theory*, 4th ed., Wiley, Hoboken, NJ, 2008.
- [14] F. Beutler, "Mean Sojourn Times in Markov Queueing Networks: Little's Formula Revisited," *IEICE Trans. Information Theory*, vol. 29, no. 2, pp. 233–241, May 1983.
- [15] P. J. Burke, "The Output of A Queueing System," *Operations Research*, vol. 4, pp. 699–714, 1956.
- [16] D. E. Taylor, J. S. Turner, J. W. Lockwood, T. S. Sproull, and D. B. Parlour, "Scalable IP Lookup for Internet Routers," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 21, no. 4, pp. 522–534, May 2003.
- [17] K. Zheng, C. Hu, H. Lu, and B. Liu, "A TCAM-Based Distributed Parallel IP Lookup Scheme and Performance Analysis," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 14, no. 4, pp. 863–875, Aug. 2006.