

IEEE 802.16 系統上下行雙向鏈路之省電效能提升

談偉華	陳仁暉*	李建德
長庚大學電機工程學系	長庚大學資訊工程學系	長庚大學電機工程學系
博士候選人	副教授	教授
e-mail :	e-mail :	e-mail :
twu0107@gmail.com	jhchen@mail.cgu.edu.tw	jdlee@mail.cgu.edu.tw

摘要

本文主要針對在 IEEE 802.16 系統 PSC type I 的睡眠模式中，上行鏈路(UL)與下行鏈路(DL)由於不同步，造成省電效能的降低進行研究。在睡眠模式下，若有 UL 封包等待傳送，將使得 MS 須立即中止睡眠模式，若 UL 與 DL 的封包接續到達，將造成 MS 無法進入睡眠模式或睡眠時間過短的情況。藉此，我們提出了雙向式的省電機制(BPSS)進行改善。模擬結果發現，BPSS 機制，將可提升在 PSC type I 下的省電效能，尤其在 UL 封包量大於 DL 封包的情況。

關鍵詞：IEEE 802.16、雙向鏈路、省電機制、睡眠模式。

Abstract

This study shows the problem of power saving mechanism (PSM) that sleep intervals of uplink (UL) connections do not synchronize with sleep intervals of downlink (DL) connections. That is, the energy of a mobile station (MS) is not really saved if the DL connections are in the sleep mode while the UL connections are in normal mode, and vice versa. To avoid the asynchronism of power saving (PS) between UL and DL connections, we invent a mechanism of binary regulating UL connections, called **bidirectional power saving scheme (BPSS)**, to improve the energy efficiency for PS. Numerical experiments show that BPSS improves the energy conservation significantly when UL traffic is greater than DL traffic.

Keywords: IEEE 802.16, bidirectional power saving scheme, PSM, sleep mode.

1. 前言

在 IEEE 802.16 系統中，移動終端(MS)在登錄基地台(BS)後，主要可區分為工作模式(active mode)與睡眠模式(sleep mode)兩種狀態，當 MS 處於工作模式時，可依據排程與 BS 間進行資料之傳送與接收；而在 sleep mode 下，MS 將關閉無線電收發裝置(radio transceiver)以進行省電，只有在與 BS 先行約定之特定時間(即 listening window)，才會打開 radio transceiver 進行接聽，以確認是否有 BS 通知接收下行鏈路封包(DL packets)之訊息。而對於上行鏈路(UL, uplink)由於事先並未與 BS 約定，故仍由 MS 依競爭模式進行頻寬獲得與封包傳送之程序。

在 IEEE 802.16-2009 標準[1]中，共有三種省電機制，稱為 PSC (power saving class)，PSC type I 主要是對於非及時性(NRT, non-real-time)及 BE (best effort)服務之省電；PSC type II 則是針對及時性可變動位元率(RT-VBR, real-time variable bit rate)服務之省電；PSC type III 則是針對多點群播(multicast)與系統管理連線之省電之用。

在 PSC type I 機制中，當 MS 經過 T_0 的 idle time 而無 DL 或 UL 封包，透過 MOB_SLP-REQ 訊息向 BS 要求進入 sleep mode，經 BS 以 MOB_SLP-RSP 回覆最小睡眠時間、最大睡眠時間與 listening window 等相關參數後，即進入 sleep mode。在 sleep mode 中，每個睡眠週期(sleep cycle)包含一個 sleep window 與一個 listening window，在 sleep window 中，MS 將關閉 radio transceiver 以進行省電，而在 listening window 時打開 radio transceiver 進行接聽，當在 listening window 中未接收到 BS 有 DL packet 的接收訊息，則將再次進入下一個 sleep cycle。sleep window 的大小，自 T_{min} 開始，每經一個 sleep cycle 即增加兩倍，直到 T_{max} 為

* 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。

止。

鑒於省電機制對於MS電池之工作時間有直接的影響，近來許多研究皆針對省電機制 (PSM, power saving mechanism) 進行研究改良。如文獻[2]到[8]，分別提出之最大睡眠時間 (MUI, maximum unavailability interval) [2]、適應性省電機制 (adaptive PSM) [3]、排程式省電機制 (scheduled power-saving mechanism) [4]、同質網路下省電機制效能分析 [5]、基於QoS限制下的省電機制 [6]、統計式之睡眠時間控制 (SSWC, statistical sleep window control) [7]、省電機制建模與效能分析 [8] 等，然而上述諸多方法，僅考慮單一DL之鏈路方向，而忽略了另一個方向之連接情況。僅考慮單一方向連接，最壞的情況是：當DL將進入 sleep mode 時，UL 剛好要進入 active mode。此一情況，MS 將停止進入 sleep mode。我們所設計之BPSS (DL and UL alignment) 機制，即為解決此一問題。

2. 主要內容

2.1 系統模型

在 IEEE 802.16-2009 標準中，當 MS 在一段時間 T_0 內沒有任何 UL 或 DL 的封包傳遞時，亦即系統處於閒置 (idle)，在 PSC type I 將會以每次增加兩倍之睡眠時間的方式開始進入 sleep mode，此睡眠時間我們可表為

$$T_n = \begin{cases} T_{\min}, & n = 1 \\ \min(2^{n-1}T_{\min}, T_{\max}), & n > 1, \end{cases} \quad (1)$$

其中 T_n 表示第 n 個 sleep window， T_{\min} 與 T_{\max} 分別為最小與最大 sleep window 時間， W_n 為第 n 個 sleep cycle， T_L 為 listening window。則

$$W_n = T_n + T_L. \quad (2)$$

當 MS 進入 listening window 後，將接聽來自 BS 之 MOB_TRF-IND 訊息，若告知有封包等待接收，則 MS 將進入 active mode 準備接收 DL 封包，反之，則 MS 將再次進入下一個 sleep cycle。

假設

$$Z_{n-1} = \sum_{i=1}^{n-1} W_i = \sum_{i=1}^{n-1} (T_i + T_L) \quad (3)$$

為自 sleep mode 開始至 W_{n-1} 結束所經之時間，若 DL 與 UL 封包流量依循 Poisson process，其中 DL 與 UL 之封包到達率分別為 λ_d 與 λ_u ，則在 MS 端之總封包到達率 $\lambda = \lambda_d + \lambda_u$ [9]，則在一段時間 T 內無任何封包到達的機率

$$p_0(T) = e^{-\Lambda T}, \text{ 其中 } \Lambda \text{ 可為 } \lambda_d \text{ 或 } \lambda_u.$$

2.2 BPSS

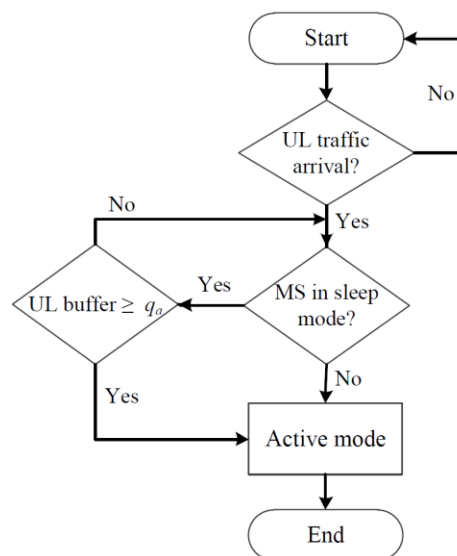
在現行 IEEE 802.16 PSM 中，當 UL 封包進入 MS 之 buffer 後，MS 將自動回到 active mode 以進行獲取頻寬之程序，造成 sleep mode 之中斷。為避免 UL 與 DL 封包到達時間不同步 (asynchronous) 造成之 sleep mode 持續時間變短，所提之 BPSS 機制，只要確認 MS 正處於 sleep mode 中，會暫時將進入之 UL 封包存於 MS 之 buffer 中，以獲取 DL 與 UL 封包到達時間之最大同步，獲取最長之省電時間。但由於 UL 並不能無限期的暫存於 buffer，我們依 MS 之 buffer 大小為 q ，設定一個安全門限值 q_a ，而令

$$q_a = \alpha q, \quad (4)$$

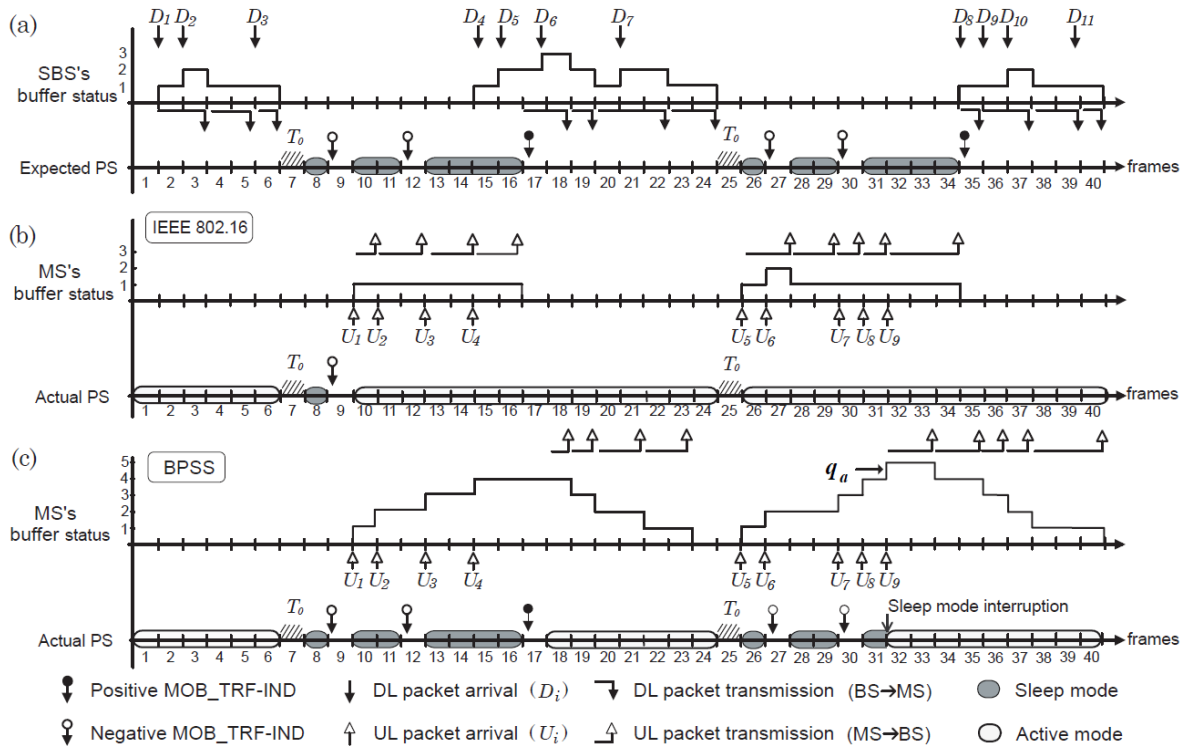
其中 $\alpha = [0,1]$ ， $\alpha \in R$ ， α 可依實際情況進行調整。依據 q_a 與 λ_u ，假設封包平均長度為 ℓ ，我們可估算最長的暫存時間

$$T_E = \frac{q_a}{\lambda_u \ell} = \frac{\alpha q}{\lambda_u \ell}. \quad (5)$$

依據圖一所示 BPSS 演算法，當 MS 進入 sleep mode 後，並接收到 UL 封包，立即確認此時 MS 是否處於 DL 的 sleep mode，若不是，則直接進行頻寬獲得與封包傳送程序，若是，則將 UL 封包暫存於 buffer，並累計儲存時間，若 DL 仍在 sleep mode 而累計時間超過 T_E ，則進入頻寬獲得與封包傳送程序，反之，則封包繼續儲存在 buffer 中，且 MS 維持在 sleep mode，



圖一 BPSS 機制演算法。



圖二 BS 與 MS 之 buffer 狀態示意圖。

以獲得更大之省電效能。為了深入瞭解 UL 與 DL 封包不同步對於 PSM 效能之影響，圖二中以示意圖之方式，顯示在傳統 IEEE 802.16 PSM 及 BPSS 下在 BS 端與 MS 端 buffer 之狀態與實際進入 sleep mode 之情況。圖中 X 軸為所經過之時間，單位為 frame，在圖二(a)中，Y 軸為 BS 針對 MS 之 DL 的 buffer 狀態， D_i 表示 DL 之封包， $i = 1, 2, \dots$ 。當 MS 經過 T_0 之 idle 時間，則進入 sleep mode，只有在 listening window 中，MS 才能接收 BS 來的 MOB_TRF-IND 訊息，若為 positive MOB_TRF-IND 則 MS 離開 sleep mode 進入 active mode 進行接收，若為 negative MOB_TRF-IND，則 MS 進入下一個 sleep cycle。在圖二(b)中為 MS 端 UL 的 buffer 情況， U_i 表示 UL 之封包， $i = 1, 2, \dots$ ，當 UL 與 DL 呈交錯出現的情況，將使得 MS 幾乎無法進入 sleep mode(圖二(b)只有 frame 8 進入 sleep mode)。而在 BPSS 機制下，由於透過 UL 封包之暫存於 MS 之 buffer，使得 UL 與 DL 封包之同步性獲得提升，讓 MS 進入 sleep mode 的時間大幅增加(圖二(c)中 frame 8, 10, 11, 13~16, 26, 28, 29, 31 進入 sleep mode)。

2.3 效能分析

為了就 BPSS 之效能進行分析，本文依據

實際情況歸納分為三種實例：

Case 1：第一個 UL 封包在第 n 個 sleep window (T_n)內到達，而稍後 DL 封包在第 m 個 sleep window (T_m)內到達，為了使 UL 與 DL 達成同步，UL 封包暫時儲存於 MS 之 buffer 內。

Case 2：第一個 UL 封包在第 n 個 sleep window (T_n)內到達，而暫存於 MS buffer 內之 UL 總量大於安全門限值 q_a ，MS 由 sleep mode 回到 active mode。

Case 3：DL 封包在第 n 個 sleep window (T_n)內到達後存於 BS，而 BS 在稍後之 listening window 叫醒 MS 進行接收。

各個實例之細部討論如後：

Case 1：

如圖三， $X_{u,n}$ 為自 MS 進入 sleep mode 至第一個 UL 封包到達之間的時間間隔，為一隨機變數，若 $X_{u,n}$ 落在第 $n-1$ 個 sleep cycle (W_{n-1})之 listening window 與第 n 個 sleep window (T_n)內， $X_{d,m}$ 表稍後 DL 封包在第 $m-1$ 個 listening window 到第 m 個 sleep window (T_m)間到達，其中 $m \geq n$ 且 $Z_{m-1} + T_m \geq Z_{n-1} - T_L + T_E$ 。故第一個 DL 封包到達的時間可能落於

T_n, T_{n+1}, \dots, T_k 內，其中 T_k 為 MS 儲放 UL 封包之 buffer 值到達安全門限 q_a 前最大的一個 sleep window，故可推知

$$T_L + 2T_n + T_L + 2^2T_n + \dots + T_L + 2^{k-n}T < T_E, \quad (6)$$

經整理得

$$(k-n)T_L + 2(2^{k-n}-1)T_n < T_E, \quad (7)$$

由於 $(k-n)T_L \ll 2(2^{k-n}-1)T_n$ ，我們簡化(7)式可得

$$2(2^{k-n}-1)T_n < T_E \quad (8)$$

整理(8)式並將(9)式兩邊取 \log_2 可得

$$k < n-1 + \log_2 \left(\frac{T_E}{T_n} + 2 \right), \quad (9)$$

因為 $k=0, 1, \dots$ 為正整數，故 k 最大值为

$$k = \left\lfloor n-1 + \log_2 \left(\frac{q_a}{\lambda_u \ell T_n} + 2 \right) \right\rfloor. \quad (10)$$

由於 $m=n, n+1, \dots, k$ ，我們求 UL 封包在第 n 個 sleep window (T_n) 內到達，而稍後 DL 封包在第 m 個 sleep window (T_m) 內到達的機率 $p_{nm}^{(1)}$ 為

$$\begin{aligned} p_{nm}^{(1)} &= \Pr\{ Z_{n-1} - T_L < X_{u,n} \leq Z_{n-1} + T_n \} \\ &\quad \cdot \Pr\{ Z_{m-1} - T_L < X_{d,m} \leq Z_{m-1} + T_m \} \\ &= \left(\int_0^{Z_{n-1}+T_n} \lambda_u e^{-\lambda_u x} dx - \int_0^{Z_{n-1}-T_L} \lambda_u e^{-\lambda_u x} dx \right) \\ &\quad \cdot \left(\int_0^{Z_{m-1}+T_m} \lambda_d e^{-\lambda_d x} dx - \int_0^{Z_{m-1}-T_L} \lambda_d e^{-\lambda_d x} dx \right) \\ &= e^{-\lambda_u(Z_{n-1}-T_L)} (1 - e^{-\lambda_u W_n}) \\ &\quad \cdot e^{-\lambda_d(Z_{m-1}-T_L)} (1 - e^{-\lambda_d W_m}), \end{aligned} \quad (11)$$

其中須滿足條件

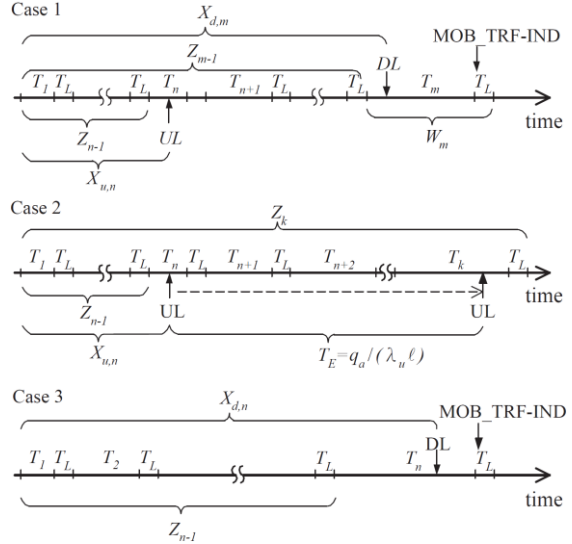
$$Z_{m-1} + T_m < X_{u,n} + T_E, \quad (12)$$

因為 $X_n^u = (Z_{n-1} - T_L, Z_{n-1} + T_n]$ ，故 case 1 之總耗電

$$E_{nm} = \sum_{i=1}^m T_i E_S + (m-1)T_L E_L, \quad (13)$$

其中 E_S 為 sleep window 下之平均單位時間耗電， E_L 為 listening window 下之平均單位時間耗電。則 case 1 之平均耗電

$$\begin{aligned} E_n^{(1)} &= p_{nn}^{(1)} E_{nn} + p_{n(n+1)}^{(1)} E_{n(n+1)} + \dots + p_{nk}^{(1)} E_{nk} \\ &= \sum_{i=n}^k p_{ni}^{(1)} E_{ni}, \end{aligned} \quad (14)$$



圖三 上下行封包到達的三種情況示意圖。

Case 2 :

第一個 UL 封包在第 n 個 sleep window (T_n) 內到達後，一直到 MS buffer 內之 UL 總量大於安全門限值 q_a 前，皆沒有 DL 封包到達，則 MS 還是直接進入 active mode。則 UL 到達的平均時間 $\overline{X_{u,n}}$ 為

$$\begin{aligned} \overline{X_{u,n}} &= E[X_{u,n} | Z_{n-1} - T_L < X_{u,n} \leq Z_{n-1} - T_L] \\ &= e^{-\lambda_u Z_{n-1}} \left[e^{\lambda_u T_L} (Z_{n-1} - T_L + 1/\lambda_u) \right. \\ &\quad \left. - e^{-\lambda_u T_n} (Z_{n-1} + T_n + 1/\lambda_u) \right] \\ &\quad \cdot \left\{ e^{-\lambda_u(Z_{n-1}-T_L)} - e^{-\lambda_u(Z_{n-1}+T_n)} \right\}^{-1}. \end{aligned} \quad (15)$$

由於 UL 在第 k 個 sleep cycle 內進入 active mode，故 case 2 的總耗電為

$$\begin{aligned} E_n^{(2)} &= \sum_{i=1}^{k-1} T_i E_S + (k-1)T_L E_L \\ &\quad + (\overline{X_{u,n}} + T_E - Z_{k-1}) E_S, \end{aligned} \quad (16)$$

而 case 2 的機率為

$$\begin{aligned} p_{n,k}^{(2)} &= \Pr\{ Z_{n-1} - T_L < X_{u,n} \leq Z_{n-1} + T_n \} e^{-\lambda_d(\overline{X_{u,n}} + T_E)} \\ &= \left(\int_0^{Z_{n-1}+T_n} \lambda_u e^{-\lambda_u x} dx - \int_0^{Z_{n-1}-T_L} \lambda_u e^{-\lambda_u x} dx \right) \\ &\quad \cdot e^{-\lambda_d(\overline{X_{u,n}} + T_E)} \\ &= e^{-\lambda_u(Z_{n-1}-T_L)} (1 - e^{-\lambda_u W_n}) e^{-\lambda_d(\overline{X_{u,n}} + T_E)}. \end{aligned} \quad (17)$$

Case 3 :

DL 封包在第 n 個 sleep window (T_n) 內到達後存於 BS，而 BS 在稍後之 listening window 叫醒 MS 進入 active mode，故

表 1 系統模擬參數

參數	數值
Frame length	5 ms
DL/UL ratio	8:2
T_{\min}	4
T_{\max}	512
Packet size	625 Bytes
MS buffer size	2000 packets

在數值分析部份，我們分別以不同之 T_{\min} 與 T_{\max} 以及不同之 λ_u / λ_d 比值進行分析，

$$E_n^{(3)} = \sum_{i=1}^n T_i E_S + (n-1) T_L E_L, \quad (18)$$

而 case 3 出現之機率為

$$\begin{aligned} p_{n,n}^{(3)} &= \Pr \left\{ Z_{n-1} - T_L < X_{d,n} \leq Z_{n-1} + T_n \right\} e^{-\lambda_u(Z_{n-1} + T_n)} \\ &= \left(\int_0^{Z_{n-1} + T_n} \lambda_d e^{-\lambda_d x} dx - \int_0^{Z_{n-1} - T_L} \lambda_d e^{-\lambda_d x} dx \right) \\ &\quad \cdot e^{-\lambda_u(Z_{n-1} + T_n)} \\ &= e^{-\lambda Z_{n-1}} \left(1 - e^{-\lambda_d T_n} \right) e^{-\lambda_u T_n}, \end{aligned} \quad (19)$$

依據(14)、(16)、(17)、(18)、(19)，我們可求出 BPSS 在 sleep mode 下之總耗電

$$E_{S_{BPSS}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(E_n^{(1)} + E_n^{(2)} p_{n,k}^{(2)} + E_n^{(3)} p_{n,n}^{(3)} \right), \quad (20)$$

由(11)、(17)、(19)可得知 MS 在 sleep mode 的機率 $P_{S_{BPSS}}$ ，則

$$P_{S_{BPSS}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{i=n}^k p_{n,i}^{(1)} + p_{n,k}^{(2)} + p_{n,n}^{(3)} \right), \quad (21)$$

若 E_A 為 active mode 下單位時間的耗電，則 BPSS 平均總耗電為

$$E_{BPSS} = (1 - P_{S_{BPSS}}) E_A + E_{S_{BPSS}}, \quad (22)$$

為了比較需求，相同方式求得傳統 IEEE 802.16 的睡眠時間耗電與總耗電[10]分別為

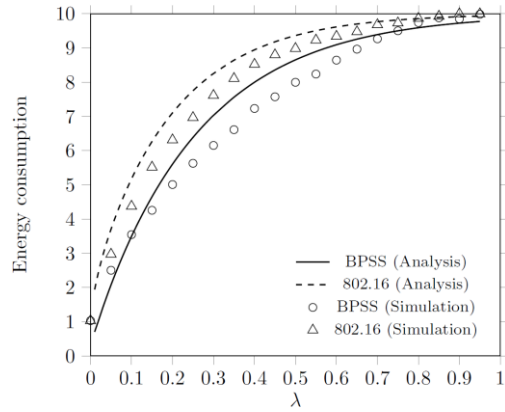
$$E_{S_{16}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(E_n^{(1)} p_n^{(1)} + E_n^{(2)} p_n^{(2)} + E_n^{(3)} p_n^{(3)} \right), \quad (23)$$

$$P_{S_{16}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(p_n^{(1)} + p_n^{(2)} + p_n^{(3)} \right), \quad (24)$$

$$E_{BPSS} = (1 - P_{S_{16}}) E_A + E_{S_{16}}. \quad (25)$$

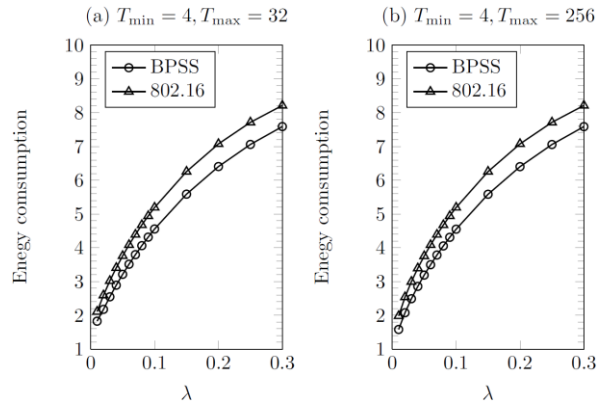
2.4 數值模擬

針對 BPSS 的效能，我們設計了一連串驗證步驟，針對 IEEE 802.16 與 BPSS 的省電效能進行驗證。表 1 為相關驗證所採用之模擬參數，本模擬中，我們相關的系統假設，皆依據 2.1、2.2、2.3 節的內容，而 DL 與 UL 封包到達率 λ_d 與 λ_u 皆依據 Poisson process，為了達成對 PSM 效能的公平比較，我們假設 MS 由 sleep mode 醒來後，皆可獲得足夠之頻寬進行封包傳送，不會造成額外的延遲。 $E_S = 1$ ， $E_L = E_A = 10$ ， $q_a / \ell = 1600$ ，其中 $q_a = 1$ Mbytes， $\ell = 625$ bytes[11]。所得的結果如圖四，模擬結果顯示與數值分析之結果相近。

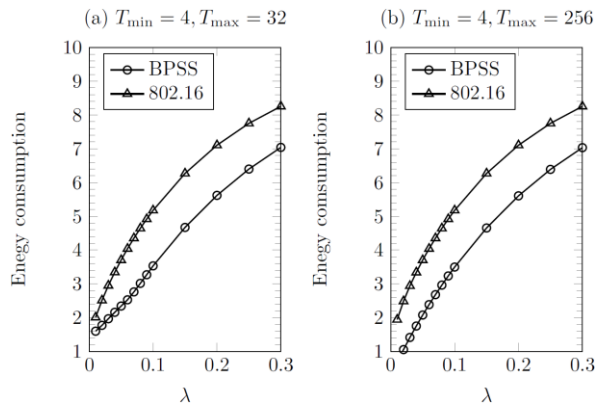


圖四 BPSS 與 IEEE 802.16 之平均耗電。

依圖五及圖六之結果顯示，BPSS 在省電效能上，皆可較傳統 IEEE 802.16 系統有較佳的表現，尤其是當 UL 的封包較 DL 封包為多的情況，原因是因為 BPSS 主要為調整 UL 的封包傳送時間以配合 DL 封包的到達，當 UL 封包較 DL 封包多的情況下，BPSS 可透過時間調整，以獲得更多的睡眠時間，故省電效能自然提升。提升效率約可自 8.57% 提升至 15.71%。



圖五 $\lambda_u / \lambda_d = 1/4$ 下，BPSS 與 IEEE 802.16 之平均耗電。



圖六 $\lambda_u/\lambda_d=4/1$ 下，BPSS 與 IEEE 802.16 之平均耗電。

3. 結論

本文主要針對 DL 與 UL 封包同時考量的情況下，對於省電效能的影響進行研究，依研究結果發現，在 PSC type I 的機制下，若採用 UL 封包調整以配合 DL 封包之機制，除可降低因上下行封包不同步造成的電能浪費外，在一些 UL 封包多的非及時性通信環境下，如智能電表、感測裝置上，將可獲得更好的省電效能。

參考文獻

- [1] 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.
- [2] Chen, T.-C., Chen, Y.-Y., and Chen, J.-C., "An Efficient Energy Saving Mechanism for IEEE 802.16e Wireless MANs," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 10, pp. 3708 – 3712, Oct. 2008.
- [3] Kim, M.-G., Choi, J., and Kang, M., "Adaptive Power Saving Mechanism Considering the Request Period of Each Initiation of Awakening in the IEEE 802.16e System," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 2, pp. 106 – 108, Feb. 2008.
- [4] Kim, M.-G., Choi, J., and Kang, M., "Scheduled Power-Saving Mechanism to Minimize Energy Consumption in IEEE 802.16e Systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 12, pp. 874 – 876, Dec. 2008.
- [5] Jin, S. and Choi, M., "Performance Analysis of IEEE 802.16m Sleep Mode for Heterogeneous Traffic," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 14, no. 5, pp. 405 – 407, May 2010.
- [6] Cicconetti, C., Lenzini, L., Mingozzi, E., and Vallati, C., "Reducing Power Consumption with QoS Constraints in IEEE 802.16e Wireless Networks," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 9, no. 7, pp. 1008 – 1021, July 2010.
- [7] Hsu, C.-H., Feng, K.-T., and Chang, C.-J., "Statistical Control Approach for Sleep-Mode Operations in IEEE 802.16m Systems," *IEEE Trans Veh. Tech.*, vol. 59, no. 9, pp. 4453 – 4466, Nov. 2010.
- [8] Jin, S., Chen, X., and Qiao, D., "Analytical Modeling of Inactivity Timer in IEEE 802.16m Sleep Mode," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 5, pp. 650 – 653, May 2012.
- [9] Chen, J., Tarn, W.-H., Hsu, W.-H., and Wang, C.-C., "Cross-Layer End-to-End Label Switching Protocol for WiMAX-MPLS Heterogeneous Networks," *Journal of Systems and Software*, vol. 85, no. 11, pp. 2459 – 2469, Nov. 2012.
- [10] Zhang, Y., and Fujise, M., "Energy Management in the IEEE 802.16e MAC," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 10, no. 4, pp. 311 – 313, April 2006.
- [11] CAIDA, "Packet Size Distribution Comparison between Internet Links in 1998 and 2008," June 2010. Available: <http://www.caida.org/research/traffic-analysis/>.