

分散式無線網路中正規化餘額擴展資源分配機制

A Normalized Residual Scaling Resource Allocation Mechanism in Distributed Wireless Network

張書馨 蘇奕宇 呂坤憲

Shu-Hsin Chang, Yi-Yu Su, Kun-Hsien Lu

中文摘要

本論文基於權重最大-最小公平準則提出正規化餘額擴展 (Normalized Residual Scaling, NRS) 資源分配方法，適用於無線網路節點分散式資料傳輸排程，以實現上行頻寬分配等相關應用。本方法藉由控制平均傳輸週期長度及調適個別節點的頻寬用量，顯著提升網路頻寬使用率、降低節點處理控制訊息的負擔、保障各節點傳輸資料的最長潛伏期，並且透過正規化資源位準的概念改進演算法，降低系統資源分配的計算複雜度。透過系統模擬與效能分析，本方法在輪詢頻率及頻寬使用率皆有良好的效能。

Abstract

This paper proposes a weighted max-min fairness resource allocation method, called Normalized Residual Scaling (NRS), for sharing uplink bandwidth in distributed wireless networks. By controlling average length of transmission period and adapting bandwidth utilization of each node, NRS significantly increases network bandwidth utilization, reduces the overhead of processing control messages, and limits the latency upper bound for data transmission. We also introduce a novel normalized resource level concept to reduce the computational complexity. Performance evaluation demonstrates that the proposed mechanism improves performances of polling frequency and bandwidth utilization.

關鍵詞(Key Words)

權重最大-最小公平 (Weighted Max-Min Fairness)

水壩注程序 (Water-Filling Procedure)

無線令牌環通訊協定 (Wireless Token Ring Protocol ; WTRP)

1 · 前言

隨著網路建設與行動裝置的普及，使用行動裝置透過無線網路進行各項應用與娛樂，已成為很多人日常生活的一部份[1]；因應物聯網[2]及感測網路的應用與裝置不斷增加，這些感測裝置與輕量化終端裝置必須透過各式的無線網路，將其資料傳輸至後端的服務系統。因此，無線網路已是現今與未來各項應用與服務的重要基礎，學者們持續投入研究以提升無線網路

的各項效能；在4G/LTE網路中，網路存取資源分配的排程機制負責在正確的時機挑選適當的頻道，並於多基站的環境下滿足基本的服務品質(Quality of Service, QoS)需求，方法設計中常見的參數如傳輸佇列的狀態、頻道品質、資源分配的歷史紀錄、暫存空間的狀態以及傳輸所需的品質等，最終於機制的複雜度、頻段使用率、存取公平性以及QoS等重要的效能指標之間取得較佳的平衡[3]。在無線感測網路中，感

測區域通常被佈署大量的小型感測節點進行如週邊環境的資料收集等任務，並透過互相合作方式將資料回傳至管理節點。由於感測節點的資源如處理速度、記憶體與電池等有較大的限制，如何有效節省與管理電量以延長整體網路的存活時間是一項重要的議題[4]；一般而言，感測節點傳送與接收資料的無線通訊動作為最主要的電量消耗來源，因此必須有良好的感測節點佈署架構、以及有效且公平的節點媒體存取控制與資源分配排程方式[5-8]，以降低：(1)資料封包傳輸碰撞而導致資料封包重傳；(2)感測節點接收到非目的節點之資料封包或相關資訊；(3)節點時常閒置於等待接收資料的狀態；(4)多餘的控制封包傳輸等情形發生，進而有效提升節點電量使用效率並延長網路存活時間。

本論文提出一應用於無線網路中的分散式權重最大-最小公平準則的資源分配方法，本方法藉由控制平均傳輸週期及調適個別節點的頻寬用量，將各節點讓出的系統資源按照權重比例即時地分配給網路中的全部節點，使系統整體資源的分配方式達成權重最大-最小公平準則。本方法具有以下優點：(1)可彈性調整服務週期，有效提升資源使用率，(2)能保障各網路節點對於最小頻寬的品質要求，(3)資源使用時間計算複雜度低，(4)可簡化資源管理，避免控制訊息過長而造成額外的成本。本論文其餘章節如下，第二章介紹相關技術，第三章說明分散式無線網路頻寬分配方法，第四章說明系統模擬環境與效能分析結果，第五章為結論。

2. 相關技術

2.1 最大-最小公平資源分配

最大-最小公平 (Max-Min Fairness) 是分時多工系統中被廣泛採用的資源分配模型[9]，其定義如下：

給定一 N 維實數序列集合 $X \subset R^N$ ，若且唯若 \bar{x} 滿足下面條件時，其對於 X 集合而言為最大-最小公平：對於任意 N 維實數序列 $\bar{y} \in X$ ，若存在 $y_s > x_s$ ，其中 $s \in \{1, \dots, N\}$ ，則必存在 $t \in \{1, \dots, N\}$ ，使得 $y_t < x_t \leq x_s$ 。

依據此定義：在固定有限資源的條件下，假設 N 維實數序列 \bar{x} 滿足最大-最小公平資源分

配，則對於其他任何分配方式 \bar{y} ，任一使用者 s 如果能在 \bar{y} 中獲得較多的資源，必定犧牲其他使用者 t ，使得 $y_t < x_t$ ；且在原來的分配方式 \bar{x} 中，使用者 t 獲得的資源比 s 還要少。

因此，最大-最小公平準則優先保障資源需求量最低的使用者。一種達成最大-最小公平的分配方法稱為水挹注程序 (Water-Filling Procedure)，該程序包含下列三個步驟：

- 步驟1: 初始狀態令全部使用者擁有資源量均為0。
- 步驟2: 等量增加各使用者的資源，直到任一使用者獲得的資源等於需求量，將其資源量凍結起來。
- 步驟3: 重複步驟2繼續分配資源給予未凍結的使用者，直到全部資源分配完畢，或當全部使用者均已滿足。

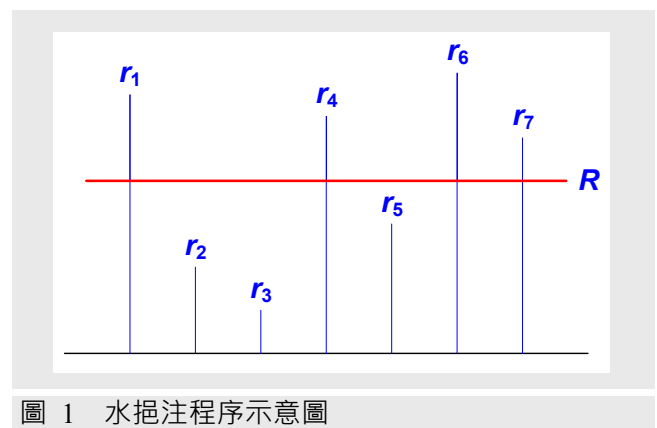


圖 1 水挹注程序示意圖

如圖1所示，重複上述三個步驟， r_3 、 r_2 、及 r_5 的需求量依序在步驟2獲得滿足，當全部資源分配完成時，所有未滿足的使用者所獲得的資源量均為 R 。

2.2 無線令牌環通訊協定

無線令牌環通訊協定 (Wireless Token Ring Protocol, WTRP) 是支援分散式無線網路頻寬分配的通訊協定之一[10]，藉由令牌傳遞來同步各節點的頻寬使用時間。其作法係將系統節點在邏輯上組成一環狀結構，如圖2所示，所有節點於此結構單向傳遞一令牌，持有令牌的節點擁有頻寬使用權，且必須在MTRT (Maximum Token Rotation Time) 到期之前將

令牌傳遞給下一節點。令牌環封包和資料的傳輸區間需保留一傳遞時間。此通訊協定實施一有限狀態機，用以處理網路運作過程中可能發生的各種事件，包括：節點加入、節點離開、環修復、環重建、令牌同步。

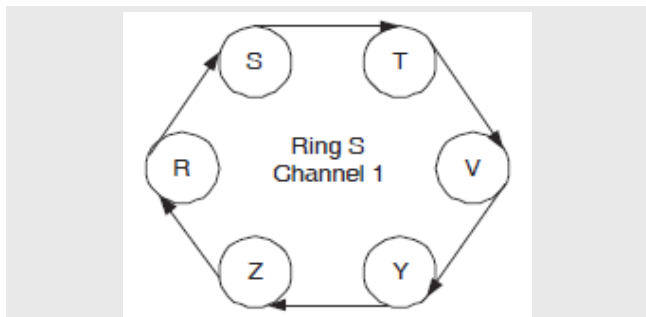


圖 2 WTRP拓樸示意圖

3 · 分散式無線網路頻寬分配

3.1 分散式無線網路傳輸架構

以下先說明一般分散式無線網路之傳輸架構，假設一無線網路包括 N 個節點，依序為 n_1, n_2, \dots, n_N ，輪流使用網路頻寬，每一節點 n_i 對應一權重 w_i ，當節點接收控制訊息獲得頻寬使用權時，計算本次允許的頻寬使用時間，利用這段時間進行資料傳輸；當使用權到期時，發送控制訊息將使用權傳遞給下一節點。其中，頻寬使用權的傳遞方式可為 WTRP，或任何支援網路節點協同運作的傳輸協定。輪詢規則容許在一個週期內多次拜訪同一實體節點，依節點對於資料延遲的敏感度和傳輸量而彈性設計，但在頻寬資源分配過程是將一週期內的每一節點在邏輯上視為不同節點。

3.2 頻寬分配規則原型設計

一種達成權重最大-最小公平的頻寬分配方法稱為加權輪詢 (Weighted Round Robin, WRR)，此方法限制每一節點 n_i 的最長傳輸時間 t_i^{\max} ，其中 $t_i^{\max}/t_j^{\max} = w_i/w_j$ ，對於任意 i 與 j 。節點 n_i 在第 k 週期的傳輸時間定義為：

$$s_i^k = \min \{q_i^k, t_i^{\max}\}$$

其中 q_i^k 表示節點在第 k 週期傳輸資料的需求時

間。此方法透過輪流排程確保每個節點可得到一定的傳輸時間，並藉由縮短傳輸週期回收剩餘頻寬再重新分配給未滿足的節點，以改善頻寬資源的使用率；但縮短週期使系統花費過高的時間比例在切換節點的頻寬使用權，導致真正用於傳輸資料的頻寬效能不佳，且過量的控制訊息將增加無線網路的維護負擔以及收發器的耗電量。

如圖3所示，假設無線網路傳輸資料的過程中，節點 n_1 和節點 n_2 的需求量為 0，節點 n_3 持續最大的傳輸需求， D_i 表示資料傳輸時間， T_i 表示控制訊息收發處理時間，此方法在多數網路節點為沉默的情況下無法有效利用頻寬資源。

為提升系統頻寬使用率，且令各節點的頻寬用量滿足權重最大-最小公平資源分配，我們回歸水挹注程序的基本概念，重新設計頻寬分配規則原型。假設每一節點 n_i 對應權重給定一基本傳輸時間 t_i (簡稱基本量)，在節點輪流使用頻寬的過程中，若節點傳輸資料所需時間 q_i (簡稱需求量) 低於基本量，除將資源配額凍結之外，可將剩餘資源 (簡稱剩餘量) 依權重比例累加至其他未凍結的節點，因而需求量較低節點所節省的時間可公平轉移至需求量較高的節點，避免傳輸週期縮減導致頻寬使用率下降。

圖4舉例說明彈性調適傳輸週期的資源分配概念。其中，圖4(a)為標準傳輸時序，圖4(b)為依節點需求配置的頻寬使用時序。從第二週期開始，節點 n_1 的需求量持續為 0，則每次 n_1 讓出的頻寬時間 t_1 立即被重新分配給當時處於活化狀態的節點 n_2 與 n_3 ，按照其權重比例，兩者額外獲得的頻寬時間 (簡稱優惠量) 分別為 $t_1 \times w_2 / (w_2 + w_3)$ 與 $t_1 \times w_3 / (w_2 + w_3)$ ，其中， n_1 讓出的頻寬時間可在一週期內完全轉移至其他節點。換言之，此頻寬分配規則確保傳輸週期的平均長度固定且依節點需求量的變化而彈性伸縮。

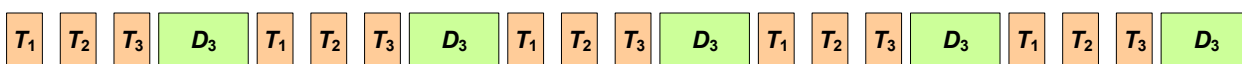


圖3 WRR資源分配時序圖案例

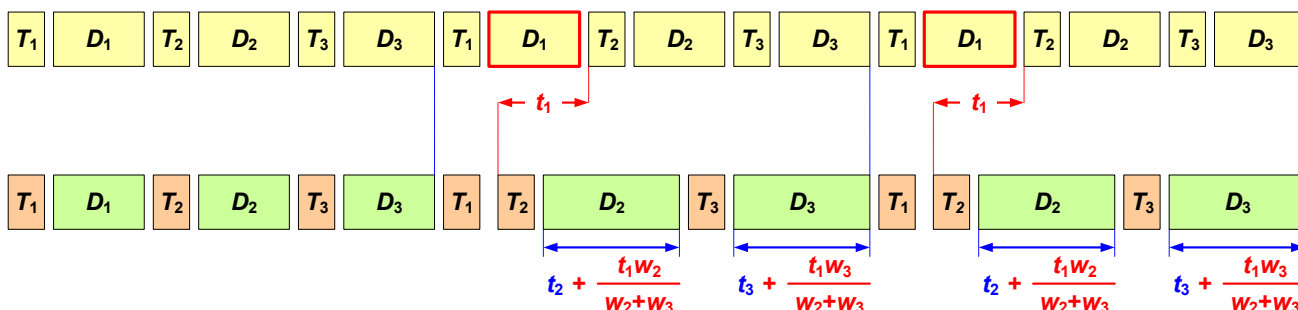


圖4 彈性週期資源分配時序圖案例

本規則所使用的變數定義如下：

$W(x)$	系統頻寬在第 x 次被使用後，狀態為活化(active)的所有節點的權重總和
$q_i(k)$	節點 n_i 在第 k 輪使用頻寬時的需求量
$e_i(k)$	節點 n_i 在第 k 輪使用頻寬後讓出的剩餘量
$a_i(k)$	節點 n_i 在第 k 輪使用頻寬後的狀態
$p_i(k)$	節點 n_i 在第 k 輪獲得的優惠量
$d_i(k)$	節點 n_i 在第 k 輪獲得的分配量
$s_i(k)$	節點 n_i 在第 k 輪獲得的頻寬使用量，亦即資料傳輸時間

頻寬分配規則原型之計算過程如下：

$$p_i(k) = a_i(k-1) \times \left(\frac{w_i e_i(k-1)}{W(N \times (k-2) + i)} + \dots + \frac{w_i e_N(k-1)}{W(N \times (k-1))} + \frac{w_i e_1(k)}{W(N \times (k-1) + 1)} + \dots + \frac{w_i e_{i-1}(k)}{W(N \times (k-1) + i - 1)} \right)$$

$$d_i(k) = t_i + p_i(k)$$

$$s_i(k) = \min \{q_i(k), d_i(k)\}$$

$$e_i(k) = d_i(k) - s_i(k)$$

$$a_i(k) = \begin{cases} 1, & \text{if } q_i(k) > t_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$W(N \times (k-1) + i) = W(N \times (k-1) + i - 1) + w_i \times (a_i(k) - a_i(k-1))$$

依據上述計算，節點 n_i 在第 k 週期獲得的頻寬使用量 $s_i(k)$ 是由需求量 $q_i(k)$ 和分配量 $d_i(k)$ 決定，而分配量為基本量 t_i 與優惠量 $p_i(k)$ 的總和，優惠量則是節點在此次使用頻寬的前一週期內，所有節點釋放的剩餘量依權重比例平均分配的累加值，其中，剩餘量 $e_i(k)$ 是分配量與使用量的差值。意即當節點被分配的可用頻寬高於實際使用頻寬時，多餘的頻寬依據權重比例被分配到當時狀態為1（即active）的所有節點。

表1以實例說明上述頻寬分配原型方法。假設無線網路四個節點 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 共用頻寬，其權重分別為 $w_1 = 1$ 、 $w_2 = 2$ 、 $w_3 = 3$ 與 $w_4 = 4$ ，對應的基本量為 $t_1 = 10$ 、 $t_2 = 20$ 、 $t_3 = 30$ 與 $t_4 = 40$ 。系統初始設定全部節點狀態皆為1，系統權重和為10。

以節點 n_4 在第一傳輸週期的頻寬分配為例，其需求量 $q_4(1)$ 為45，累積的優惠量 $p_4(1)$ 為12，依據公式，分配量 $d_4(1) = 52$ ，使用量 $s_4(1) = 45$ ，剩餘量 $e_4(1) = 7$ ，狀態 $a_4(1)$ 維持1，系統權重和 $W(4)$ 維持7，剩餘量按照權重比例均分給當時狀態為1的所有節點 n_1 、 n_2 與 n_4 ，其各別的優惠量分別累加1、2、4。

表1 原型方法資源分配數值案例

節點 ID	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
基本量	10	20	30	40	10	20	30	40				
需求量	15	25	9	45	15	21	35	30				
分配量	10	20	30	52	14	28	30	48				
使用量	10	20	9	45	14	21	30	30				
剩餘量	0	0	21	7	0	7	0	18				
狀態	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
權重和	優惠量											
10	(0)	+0	+0	+0	+0							
10		(0)	+0	+0	+0	+0						
7			(21)	+12	+3	+6	+0					
7				(7)	+1	+2	+0	+4				
7					(0)	+0	+0	+0	+0			
7						(7)	+0	+4	+1	+2		
10							(0)	+0	+0	+0	+0	
6								(18)	+3	+6	+9	+0

同理，以節點 n_4 在第二傳輸週期的資源分配為例，其需求量 $q_4(2)$ 為 30，累積的優惠量 $p_4(2)$ 為 8，依據公式，分配量 $d_4(2)=48$ ，使用量 $s_4(2)=30$ ，剩餘量 $e_4(2)=18$ ，狀態 $a_4(2)$ 由 1 變為 0，系統權重 $W(8)$ 和由 10 調整為 6，剩餘量按照權重比例均分給當時狀態為 1 的所有節點 n_1 、 n_2 與 n_3 ，其各別的優惠量分別累加 3、6、9。

3.3 頻寬分配演算法設計

上述頻寬分配原型提供一種理想的資源配置規則，其應用於分散式無線網路節點共享頻寬的情境時，尚有下列缺點：(1)控制訊息的成本隨著節點數量線性增加：當頻寬使用權轉移時，傳遞的控制訊息須記錄所有節點的權重、狀態、以及累積的優惠量，下一節點方能計算頻寬使用量；(2)分配頻寬的複雜度隨著節點數量線性增加：當節點均分過剩頻寬時，須依據網路所有節點的權重個別計算及累加其優惠量。

本論文目標為發展實用的無線網路頻寬資

源分配方法，滿足權重最大-最小公平分配準則，且同時解決頻寬使用率、計算複雜度等效能問題。為了在實現演算法時克服上述缺點，我們採用了「資源位準」的構想，提出正規化剩餘額擴展 (Normalized Residual Scaling, NRS) 資源分配方法。除沿用前述定義，本方法另外基於正規化位準之概念引入下列變數：

$B(x)$	系統頻寬在第 x 次被使用前的系統優惠位準
$b_i(k)$	節點 n_i 在第 k 輪使用頻寬前的個體優惠基準

NRS方法將各節點讓出的剩餘量經過正規化後累加至系統優惠位準。並且定義傳輸節點獲得的優惠量等於系統優惠位準在一週期內的增量、乘以該節點的權重。其中，系統優惠位準在一週期內的增量為節點本次傳輸和上次傳輸時的系統優惠位準的差額，本次傳輸時的系統優惠位準 $B(x)$ 可透過控制訊息傳遞，而上次的系統優惠位準即個體優惠基準 $b_i(k)$ ，則藉由節點在上一週期所儲存的當時的系統優惠位準

得來。NRS頻寬分配演算法計算過程如下：

$$p_i(k) = a_i(k-1) \times w_i \times (B(N \times (k-1) + i) - b_i(k)) \cdot$$

$$d_i(k) = t_i + p_i(k) \cdot$$

$$s_i(k) = \min \{q_i(k), d_i(k)\} \cdot$$

$$e_i(k) = d_i(k) - s_i(k) \cdot$$

$$a_i(k) = \begin{cases} 1, & \text{if } q_i(t) > t_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \cdot$$

$$W(N \times (k-1) + i) = W(N \times (k-1) + i - 1) + w_i \times (a_i(k) - a_i(k-1)) \cdot$$

$$b_i(k+1) = B(N \times (k-1) + i) \cdot$$

$$B(N \times (k-1) + i + 1) = B(N \times (k-1) + i) + e_i(k) / W(N \times (k-1) + i)$$

依上述方法，當節點獲得頻寬使用權時，從控制訊息中擷取系統優惠位準 $B(x)$ 及活化節點的權重總和 $W(x)$ ，藉由系統優惠位準及節點本身擁有的個體優惠基準 $b_i(k)$ 和需求量 $q_i(k)$ 資訊，依序計算優惠量、分配量，以決定頻寬使用量 $S_i(k)$ ；接著，將個體優惠基準更新為本週期的系統優惠位準，以供下一週期計算頻寬使用量；並且依據節點的狀態轉換來更新活化節點的權重總和、以及依據頻寬剩餘量 $e_i(k)$ 來更新系統優惠位準，其中，系統優惠位準的增量係為一正規化的剩餘量；最後，於傳輸時間到期時，將頻寬使用權傳遞給下一節點，此控

制訊息包含更新後的系統優惠位準以及活化節點的權重總和。

表2以實例說明NRS資源分配程序。採用前述頻寬分配原型案例相同的假設條件，以節點 n_4 在第一傳輸週期的資源分配為例，其權重為4，基本量為40，需求量為45。依據公式，則優惠量 $p_4(1) = 12$ ，分配量 $d_4(1) = 52$ ，使用量 $s_4(1) = 45$ ，剩餘量 $e_4(1) = 7$ ，狀態 $a_4(1)$ 維持1，系統權重和 $W(4)$ 維持7，儲存個體優惠基準 $b_4(2) =$ 目前的系統優惠位準 $B(4) = 3$ ，調整系統優惠位準 $B(5)$ ，其增量為 $e_4(1) / W(4) = 1$ 。同理，以節點 n_4 在第二傳輸週期的資源分配為例，其需求量為30，依據公式，優惠量 $p_4(2) = 8$ ，分配量 $d_4(2) = 48$ ，使用量 $s_4(2) = 30$ ，剩餘量 $e_4(2) = 18$ ，狀態 $a_4(2)$ 由1變為0，系統權重和 $W(8)$ 由10調整為6，儲存個體優惠基準 $b_4(3) =$ 目前的系統優惠位準 $B(8) = 5$ ，調整系統優惠位準 $B(9)$ ，其增量為 $e_4(2) / W(8) = 3$ 。

經由前面實例可知本論文所提的NRS方法與原型方法計算所得的分配結果完全相同，下面更通過數學證明來加以驗證。由前述計算步驟可知，兩者的主要差異在於優惠量 $p_i(k)$ 之定義。若將系統頻寬在第 x 次被使用後的剩餘量標示為 $e(x)$ ，則 $e_i(k) = e(N \times (k-1) + i)$ 。

表2 NRS方法資源分配數值案例

節點 ID		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
權重		1	2	3	4	1	2	3	4		
基本量		10	20	30	40	10	20	30	40		
需求量		15	25	9	45	15	21	35	30		
分配前	狀態	1	1	1	1	1	1	0	1		
	個體優惠基準	0	0	0	0	0	0	0	3		
	系統優惠位準	0	0	0	3	4	4	5	5		
分配後	優惠量	0	0	0	12	4	8	0	8		
	分配量	10	20	30	52	14	28	30	48		
	使用量	10	20	9	45	14	21	30	30		
	剩餘量	0	0	21	7	0	7	0	18		
	狀態	1	1	0	1	1	1	1	0		
	權重和	10	10	7	7	7	7	10	6		

個體優惠基準	0	0	0	3	4	4	5	5		
系統優惠位準	0	0	3	4	4	5	5	8		

頻寬分配原型的優惠量可表示為：

$$p_i(k) = a_i(k-1) \times \left(\frac{w_i e^{N \times (k-2) + i}}{W(N \times (k-2) + i)} + \dots + \frac{w_i e^{N \times (k-1)}}{W(N \times (k-1))} \right. \\ \left. + \frac{w_i e^{N \times (k-1) + 1}}{W(N \times (k-1) + 1)} + \dots + \frac{w_i e^{N \times (k-1) + i - 1}}{W(N \times (k-1) + i - 1)} \right) \\ = a_i(k-1) \times w_i \times \sum_{x=N \times (k-2) + i}^{N \times (k-1) + i - 1} \frac{e(x)}{W(x)}$$

依據系統優惠位準和個體優惠基準的定義，可進一步簡化公式為：

$$p_i(k) = a_i(k-1) \times w_i \times \left(\sum_{x=1}^{N \times (k-1) + i - 1} \frac{e(x)}{W(x)} - \sum_{x=1}^{N \times (k-2) + i - 1} \frac{e(x)}{W(x)} \right) \\ = a_i(k-1) \times w_i \times (B(N \times (k-1) + i) - B(N \times (k-2) + i)) \\ = a_i(k-1) \times w_i \times (B(N \times (k-1) + i) - b_i(k))$$

NRS方法藉由傳輸節點協同維護系統優惠位準以及活化節點權重總和，可將節點讓出的頻寬剩餘量按權重比例即時地分配給所有的需求節點，相較於前述所提的頻寬分配原型，節點在單一週期內計算頻寬使用量的複雜度由 $O(N)$ 降為 $O(1)$ 。且因兩者的頻寬分配結果完全相同，故NRS方法可保證網路節點的頻寬用量滿足權重最大-最小公平準則，相較於WRR方法則提升了系統頻寬使用率。

從頻寬分配規則的原型設計可知，NRS頻寬分配時序在一個傳輸週期內可由原本超前時間 L 轉為對齊標準時序，在此情況下，節點等待資料傳輸的最長潛伏期為一個標準週期長度 $+L$ 。為了保障節點的傳輸潛伏期，NRS方法可額外維護 $L(x)$ ，代表系統頻寬在第 x 次被使用前的傳輸進度超前量，並且限制此超前量不高於 L_{\max} 。依據此限制，NRS方法的頻寬使用量更改為：

$$s_i(k) = \max \{ \min \{ q_i(k), d_i(k) \}, t_i + L(kN - N + i) - L_{\max} \}$$

並且於計算 $s_i(k)$ 之後更新進度超前量：

$$L(kN - N + i + 1) = L(kN - N + i) + t_i - s_i(k)$$

當頻寬使用期滿時，則將更新後的進度超前量連同系統優惠位準與活化節點權重總和傳

遞至下一節點。

由計算公式可知，進度超前量是各節點使用量低於基本量的差額累計值，因此，當節點評估本次頻寬讓予將使得進度超前量高於 L_{\max} 時，則依據超前量的限制來決定使用量。藉由此機制，NRS可調整傳輸週期彈性伸縮的最大範圍，並且仍確保平均週期與標準週期長度相等。

4. 系統模擬與效能分析

我們使用C++模擬WTRP網路傳輸系統，實作WRR與NRS頻寬分配演算法。系統模擬參數如表3示。

表 3 WTRP網路系統模擬參數

參數名稱	參數值
模擬系統時間	10 sec
節點數量	20
總頻寬	100 Mbps
輪詢標準週期	10 msec
傳遞間隔	50 usec
控制訊息長度	59 bytes

假設全部節點的權重皆為1。其中 n 個負載節點持續要求最大頻寬，另外 $(20-n)$ 個沉默節點的頻寬需求為0。改變負載節點數量從2, 4, 6, ..., 至20，模擬分析下列各項效能指標：

- 輪詢頻率：節點平均每秒獲得頻寬使用權的次數。
- 頻寬使用率：系統傳送資料所使用的頻寬佔總頻寬的比例。
- 最長潛伏期：資料進入空佇列到開始傳送的最長時間間隔。

各項效能指標的模擬結果數據如下圖5至圖7所示。

依據模擬結果可知，NRS方法藉由保持傳輸週期平均長度而大幅降低節點輪詢頻率，如圖5所示，以節省收發器耗電量及網路維護的負

擔；並且藉由彈性調適個別節點的頻寬用量，保障系統維持穩定的頻寬使用率，如圖6所示，因而有效提升負載節點的資料傳輸量。本方法付出的代價是些微地增加了節點等待傳輸的最長潛伏期，如圖7所示，但理論上潛伏期達到此最大值的發生機率非常微小。

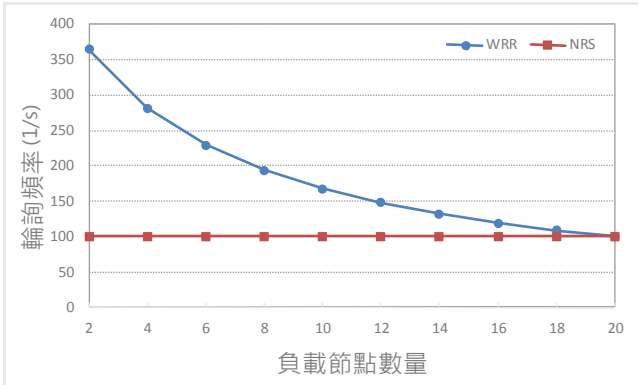


圖 5 輪詢頻率比較分析圖

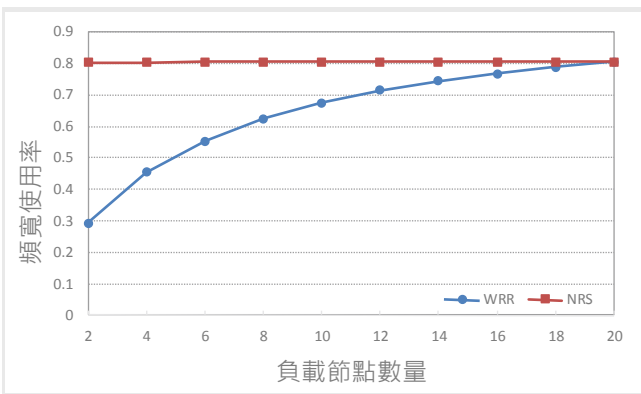


圖 6 頻寬使用率比較分析圖

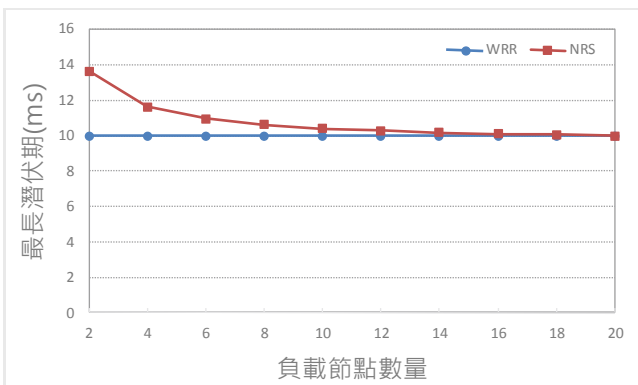


圖 7 最長潛伏期比較分析圖

本方法適用於多節點及間歇性的即時資料傳輸應用。在此情境中的任意時間點，無線網路節點多數為沉默狀態，僅由非固定的少數節

點提出傳輸大量突發資料的需求。本方法可大幅改善系統頻寬使用率與耗電量等特性，並且使得傳輸節點的頻寬用量滿足最大-最小資源分配準則。

5 · 結論

本論文基於水挾注程序概念提出NRS權重最大-最小資源分配方法，依據節點需求而彈性調整傳輸週期的長度，並且基於公用資源位準的概念提出正規化餘額的加權運算方法，將計算節點頻寬使用量的複雜度由 $O(N)$ 降為 $O(1)$ 。藉由網路傳輸節點協同維護公用變數，可即時回收剩餘的頻寬資源並按照權重比例分配給所有的需求節點。經由實驗模擬驗證，NRS方法可顯著提升網路系統頻寬使用率及降低節點輪詢頻率，在多節點間歇性即時資料傳輸的應用情境下，可大幅改善系統效能。

參考文獻

- [1] Osseiran, A.; Boccardi, F.; Braun, V.; Kusume, K.; Marsch, P.; Maternia, M.; Queseth, O.; Schellmann, M.; Schotten, H.; Taoka, H.; Tullberg, H.; Uusitalo, M.A.; Timus, B.; Fallgren, M., "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project," IEEE Communications Magazine, vol.52, no.5, pp.26-35, May 2014
- [2] Li Da Xu; Wu He; Shancang Li, "Internet of Things in Industries: A Survey," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol.10, no.4, pp.2233-2243, Nov. 2014
- [3] Capozzi, F.; Piro, G.; Grieco, L.A.; Boggia, G.; Camarda, P., "Downlink Packet Scheduling in LTE Cellular Networks: Key Design Issues and a Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.15, no.2, pp.678-700, Second Quarter 2013
- [4] T. Rault, A. Bouabdallah, Y. Challal, "Energy efficiency in wireless sensor

networks: A top-down survey,” Computer Networks, Vo. 67, pp. 104-122, 2014.

- [5] Urmila A. Patil, Smita V. Modi, Suma B. J., “A Survey: MAC Layer Protocol for Wireless Sensor Networks,” International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 3, No. 9, 2013.
- [6] Neha Trivedi, G. Kuamr, Teena Raikwar, “Survey on MAC Protocol for Wireless Sensor Network,” International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol 3, No 2, 2013.
- [7] Pei Huang, Li Xiao, Soroor Soltani, Matt W. Mutka, and Ning Xi, “The Evolution of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 15, No. 1, pp. 101-120, 2013.
- [8] Akansha Verma, M P Singh, Jyoti Prakash Singh, and Prabhat Kumar, “Survey of MAC protocol for wireless sensor networks,” The 2nd International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering, pp. 92-97, 2015.
- [9] Ronasi, K.; Wong, V.W.S.; Gopalakrishnan, S., “Distributed Scheduling in Multihop Wireless Networks with Maxmin Fairness Provisioning,” IEEE Transactions on Wireless Communications, , vol.11, no.5, pp.1753-1763, May 2012
- [10] Ergen, M.; Duke Lee; Sengupta, Raja; Varaiya, P., “WTRP - wireless token ring protocol,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.53, no.6, pp.1863-1881, Nov. 2004

作者簡介

張書馨



現任工業技術研究院資訊與通訊研究所影音匯流系統技術部資深工程師，專長為網路服務品質、系統資源分配與工作排程。

蘇奕宇



現任工業技術研究院資訊與通訊研究所影音匯流系統技術部技術副理，專長為無線網路、P2P網路與影音串流傳輸技術。目前從事影音串流系統與視訊內容處理平台設計開發。

呂坤憲



現任工業技術研究院資訊與通訊研究所影音匯流系統技術部資深工程師，專長為無線感測網路、無線隨意網路。目前從事P2P網路技術與視訊內容處理平台技術開發。