

Parallel MAC Protocol Based on Geographical Location Information and Power Control in Ad Hoc Networks

Lei LEI, Zongze XU

College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronaut and Astronaut, Nanjing 210016, China

Abstract: The conflict interference produced by the parallel transmission of the exposed nodes was investigated, and a parallel MAC protocol based on geographical location information and power control in ad hoc networks was proposed. This protocol identified the exposed nodes by their geographical location information and introduced the power control mechanism into the parallel transmission of the exposed nodes. When the probability of the successful parallel transmission was low, the protocol reduced the parallel transmissions by using the random backoff mechanism, thus avoided the interference caused by the failed parallel transmission and the energy consumption of the nodes. The simulation results show that, compared with the DCF protocol, this new protocol can improve the average throughput of the network significantly and save the average energy consumption of the nodes simultaneously, thus prolong the lifetime of the nodes and the network.

Keywords: ad hoc networks, MAC protocol, parallel transmission, exposed node

1 引言

Ad hoc 網路是一種新型的無線網路，它由一系列地位完全平等的移動節點組成，在通道訪問控制 (MAC) 協議的控制下，各個節點通過多跳共用的方式共用無線廣播通道。當 ad hoc 網路中的一個節點發送信號時，只有它傳輸範圍內的鄰居節點可以接收該信號，而傳輸範圍外的節點卻無法正確接收，甚至無法感知該信號。這種獨特的通道共用方式極大地提高了 ad hoc 網路的頻率空間複用度，但多跳傳輸的特性又使得網路中信號的衝突與節點所處的地理位置直接相關，而且一次衝突並不能被網路中所有的節點同時感知，這就帶來了隱終端和暴露終端問題^[1-3]。

基於載波檢測多點接入 (CSMA) 機制的 MAC 協議，比如 MACA^[1]、MACAW^[2]、IEEE 802.11 DCF^[4] 等，一直是 ad hoc 網路 MAC 協定研究的熱點。其中，DCF 協定的應用最為廣泛，目前已成為事實上的 ad hoc 網路 MAC 協定規範。該協定通過 RTS-CTS 控制握手機制部分地解決了隱終端問題，卻並沒有為暴露終端提供一種平行傳輸機制，因而限制了網路吞吐量的提高^[5]。目前，研究人員已經在 DCF 協議的框架內提出了幾種允許暴露終端平行傳輸的改進方案。本文將允許暴露終端並行發起傳輸的 MAC 協定簡稱為並行 MAC 協定。

文獻^[6]提出的 MACA-P 協定把搶先佔用通道的收

發節點之間的傳輸稱為“首傳輸”，在首傳輸的 RTS-CTS 幀交互和 Data-ACK 幀交互之間引入了一個“控制間隙”。首傳輸收/發節點傳輸範圍內的其他收/發節點可以在這個間隙內完成“次傳輸”的 RTS-CTS 幀交互，並將次傳輸和首傳輸中資料幀和 ACK 幀的發送時間對齊，使得它們能同步並行完成傳輸，從而提高網路的平均吞吐量。次傳輸中的 RTS-CTS 握手機制提高了次傳輸發送成功的概率，但由於只有能在首傳輸的控制間隙時段內完成 RTS-CTS 幀交互的收/發節點對才可能發起次傳輸，所以控制間隙的長度限制了與首傳輸併發的次傳輸的數量。同時，該協議也缺乏合理的衝突避免機制，仿真結果證明，在某些發送節點密度較大的情況下，該協定還會引起網路平均吞吐量的嚴重下降。

文獻^[7]將所有節點發送的資料幀分成大小相同的片段。在搶先佔用通道的某一收/發節點對的第 1 個資料幀片段發送過程中，該收/發節點傳輸範圍內的其他收/發節點對並行發起 RTS-CTS 幀或 PRTS-CTS 幀交互。當該收/發節點對發起第 2 個資料幀片段的傳輸時，成功完成了 RTS-CTS 幀或 PRTS-CTS 幀交互的收/發節點對就能同時發起各自的資料幀片段的傳輸。由於每個節點的資料幀片段大小相等，所以這些收/發節點對的傳輸都是同步的。該方法能提高網路平均吞吐量，但過多的分片將造成較大的開銷，影響網路的整體性能。文獻^[8]指出，只有當資料幀大於一定

門限時，DCF 協定才應該使用資料幀分片的策略。

文獻^[9]提出的SB-FSMA/CA 協定僅適用於靜態 ad hoc 網路。該協定沒有採用暴露發送終端與普通發送節點同步完成傳輸的策略，它要求網路中的每個節點通過偵聽 MAC 幀獲取鄰居節點的位址資訊，並將這些資訊轉發給該節點單跳傳輸範圍內的其餘節點，從而保證節點獲知兩跳傳輸範圍內發起傳輸的收/發節點的位址資訊。根據該位址資訊，暴露發送終端即可計算出發起的平行傳輸和兩跳傳輸範圍內現有傳輸之間的會話相關係數 (DCC)。DCC 是一個基於信號接收判決門限的性能指標，它的值越大，則說明暴露終端發起的平行傳輸對兩跳傳輸範圍內現有傳輸的影響越大。SB-FSMA/CA 協定規定，只有當暴露終端計算出的 DCC 的值低於某一門限時，才允許暴露終端發起平行傳輸，從而避免衝突。然而，由 2.1 節中的分析可知，當多個暴露終端同時並行向接收節點發送信號時，接收節點受到的干擾功率則應該是多個暴露終端產生的干擾信號功率之和。因此，僅僅根據某一個暴露終端發起的平行傳輸與現有傳輸之間的 DCC 的值判斷暴露終端是否能發起該平行傳輸，仍然會導致接收節點發生衝突。而且在網路中發送節點數目較多的情況下，這種衝突將更加嚴重。同時，由於僅適用於靜態 ad hoc 網路，因而 SB-FSMA/CA 協定具有較大的局限性。

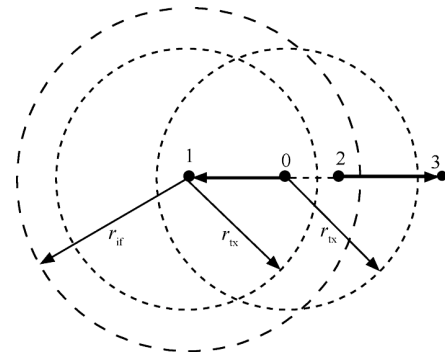
同時，上述幾種並行 MAC 協議雖然能在一定程度上提高 ad hoc 網路的平均吞吐量，但它們都沒有考慮暴露終端平行傳輸機制對節點能耗的影響。事實上，普通發送節點的傳輸與暴露終端的平行傳輸將產生相互干擾，在 2.1 節的分析中指出，如果 MAC 協議中缺乏合理的功率控制機制，資料幀則有可能因為衝突干擾而無法被接收節點正確接收，並導致節點產生不必要的能耗。由於 ad hoc 網路中的移動節點大多依靠壽命非常有限的電池供電^[10]，能量是非常寶貴的資源，所以在並行 MAC 協議的設計中，還必須同時考慮暴露終端平行傳輸對節點能耗的影響。

本文從理論上對暴露終端平行傳輸的相關問題進行了分析，並在 DCF 協議的載波檢測機制及資料幀 4 次握手傳輸機制的框架內，提出了一種基於地理位置資訊和功率控制的 ad hoc 網路並行 MAC 協定 (GLPCB-PMAC)。在多種不同節點密度的網路拓撲下仿真證明，該協定在顯著提高 ad hoc 網路無線通道利用率和吞吐量的同時，還能有效節省移動節點的能耗，從而延長節點的工作時間和網路的生存時間。

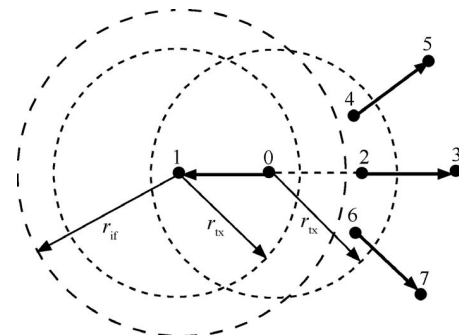
2 暴露終端的平行傳輸

2.1 暴露終端平行傳輸產生的干擾問題

根據現有文獻中的定義，當發送節點向接收節點發送信號時，處於發送節點傳輸範圍之內、接收節點傳輸範圍之外的節點稱為暴露終端^[1,2]。由於在 ad hoc 網路中，各個節點具有相同的地位，因此在網路中存在多個發送節點並同時競爭通道的情况下，各個發送節點都有可能處於暴露終端的地位。在圖 1(a)和圖 1(b)所示的網路拓撲中， r_{tx} 為節點的傳輸半徑，當節點 0 向節點 1 發送資料幀時，節點 2、節點 4 和節點 6 即為暴露終端。文獻^[6]中的分析指出，當節點 0 向節點 1 發送信號時，其他節點發送給暴露終端的信號會與節點 0 發送的信號發生衝突，導致暴露終端無法接收其他節點發送的信號；但是，由於暴露終端在接收節點 1 的傳輸範圍之外，所以各個暴露終端能與發送節點 0 並行發送信號。



(a) 接收節點的衝突干擾範圍記憶體在一個暴露終端
(a) Receiving nodes has one exposed terminal in the conflict & interference range



(b) 接收節點的衝突干擾範圍外存在多個暴露終端
(b) Receiving nodes has multiple exposed terminals out of the conflict & interference range

圖 1. 暴露終端問題
Figure 1. Exposed terminal Problems

然而，對於基於載波檢測的無線網路，發送信號的功率隨傳播距離的增大而衰減，節點的衝突干擾範圍通常大於傳輸範圍。考慮無線信號傳播模型採用自由空間（free space）模型或雙線地面反射（two-ray）模型的情況，接收信號功率 P_{rx} 可由式

(1) 計算得出^[11]

$$\begin{cases} P_{rx} = \frac{P_{tx} G_t G_r c^2}{(4\pi f d)^2}, & d \leq \frac{4\pi h_t h_r c}{f} \quad (\text{freespace}) \\ P_{rx} = \frac{P_{tx} h_t^2 h_r^2 G_t G_r}{d^4}, & d > \frac{4\pi h_t h_r c}{f} \quad (\text{two-ray}) \end{cases} \quad (1)$$

其中， P_{tx} 為信號的發射功率， G_t 和 G_r 分別為發送節點和接收節點的天線增益， h_t 和 h_r 分別為發送節點和接收節點的天線高度， f 為頻率， c 為光速， d 為發送節點和接收節點之間的距離。

在圖 1(a)所示的網路拓撲中，假設節點 0 和節點 2 的發射功率分別為 P_{mtx} 和 P_{stx} ，採用雙線地面反射傳播模型，並忽略熱雜訊的影響。當節點 0 向節點 1 發送信號時，節點 2 即為暴露終端。當暴露終端 2 同步並行發送信號時，節點 1 接收到的信號功率與干擾信號功率之比為

$$SINR_{nodel} = \frac{P_{mtx}}{P_{stx}} \left(\frac{d_{21}}{d_{01}} \right)^4 \quad (2)$$

其中， d_{21} 和 d_{01} 分別為節點 2 和節點 0 到節點 1 的距離。假設節點 1 接收到的節點 0 的信號功率大於信號接收門限 Th_{rx} ，而節點判決信號是否能被正確接收的信號雜訊干擾比門限為 $SINR_{rx}$ ，則只有在滿足

$$SINR_{nodel} \geq SINR_{rx} \quad (3)$$

的條件時，節點 0 發送的信號才能被節點 1 正確接收。由式(2)、式(3)即可得出暴露終端 2 與節點 0 並行發送信號時，接收節點 1 的衝突干擾範圍 r_{if} 為

$$r_{if} = d_{01} \sqrt[4]{\frac{SINR_{rx} P_{stx}}{P_{mtx}}} \quad (4)$$

其中， $SINR_{rx}$ 的值通常取 10。因此，如果節點 0 和節點 2 以相同的功率發射信號，則當 $d_{01} > 0.56r_{tx}$ 時，節點 1 的衝突干擾範圍 r_{if} 將大於傳輸範圍 r_{tx} 。在這種情況下，接收節點 1 衝突干擾範圍內的暴露終端發起的平行傳輸將導致節點 1 發生衝突。

在接收節點 1 的衝突干擾範圍外存在多個暴露終端的情況下，如圖 1(b)所示，當節點 0 向節點 1 發送

信號時，如果多個暴露終端同時並行向接收節點發送信號，接收節點 1 受到的干擾功率則應該是多個暴露終端產生的干擾信號功率之和。在這種情況下，雖然各個暴露終端都在接收節點 1 的衝突干擾範圍之外，但多個暴露終端的平行傳輸仍然可能導致接收節點 1 發生衝突。

因此，針對文獻^[6]中的分析，本文給出以下 2 點結論：

1) 在單通道的條件下，當發送節點向接收節點發送信號時，雖然接收節點在暴露終端的傳輸範圍之外，但是暴露終端發起的平行傳輸仍然可能導致接收節點發生衝突，並產生不必要的能耗。

2) 由式(4)可知，在 $SINR_{rx}$ 、 P_{mtx} 、 d_{01} 的值均保持不變的情況下，如果允許暴露終端與發送節點並行發起傳輸，則只有通過功率控制機制設置合理的暴露終端發送功率 P_{stx} ，才能有效避免暴露終端並行發送引起的衝突干擾。

2.2 暴露終端平行傳輸提高網路的平均吞吐量

在 DCF 協議中，載波檢測機制阻止了發送節點傳輸範圍內所有鄰居節點發送或接收信號，從而保證了收/發節點之間的資料發送成功^[4]。但由於 DCF 協定沒有為暴露終端提供一種有效的平行傳輸機制，所以該協議並沒有獲得最佳的無線通道利用率和網路平均吞吐量。考慮在圖 1(a)所示的網路拓撲中，節點 0 和節點 2 同時分別向節點 1 和節點 3 發送資料幀，假定節點 0 和節點 2 發送的資料幀長度分別為 x 和 y 位元組。其中，資料幀長度即為發送節點網路層發送佇列中資料包的長度。由於發送節點 0 和節點 2 都在對方的傳輸範圍內，所以 DCF 協議能通過載波檢測機制保證流 0→1 和流 2→3 公平地佔用無線通道帶寬^[12]，2 個發送節點成功佔用通道的概率相等。假定在長度為 t 的時間內，2 個發送節點成功發送資料幀的次數均為 τ ，則在這段時間內，2 個發送節點成功發送的資料比特數之和為 $8\tau(x+y)$ 。因此，在 t 時間內，網路的平均吞吐量即為 $8\tau(x+y)/t(\text{bit/s})$ 。

由於當節點 0 佔用通道，向節點 1 發送資料幀時，節點 2 為暴露終端；而當節點 2 佔用通道，向節點 3 發送資料幀時，節點 0 則為暴露終端。因此，如果 MAC 協議能通過合理的功率控制機制，在保證一個流的發送節點成功向接收節點發送資料幀的同時，允許處於暴露終端地位的另一個流的發送節點並行向接收節點發送資料幀，則網路的平均吞吐量將大大提高。

1) 假設 $x \neq y$ 。此即為文獻[5]中考慮的情況。為了

保證節點 0 和節點 2 同步接收節點 1 和節點 3 應答的 ACK 幀，所以只能允許暴露終端並行發送長度較小的資料幀。假定 $x > y$ ，則在時間 t 內，網路的平均吞吐量將提高為 $8\tau(x+2y)/t(\text{bit/s})$ 。假如 x 取 1024 位元組， y 取 920 位元組，與前面的分析比較可知，該拓撲下的網路平均吞吐量將在理論上提高 47%。

2) 假設 $x = y$ 。則無論當發送節點 0 或節點 2 佔用通道，向接收節點發送資料幀時，處於暴露終端地位的另一個發送節點均能同步並行發起資料幀傳輸。在時間 t 內，網路的平均吞吐量將提高為 $8\tau(2x+2y)/t(\text{bit/s})$ 。與前面的分析比較可知，該拓撲下的網路平均吞吐量將在理論上提高 100%。

3 GLPCB-PMAC協議的基本思想

本文在 DCF 協定的載波檢測機制及資料幀 4 次握手傳輸機制的基礎上，提出了一種基於地理位置資訊和功率控制的 ad hoc 網路並行 MAC 協定 (GLPCB-PMAC)。

3.1 獲取節點的地理位置資訊

隨著小型、廉價、低功耗的全球衛星定位系統 (GPS) 接收機^[13]的普及和本地定位技術的發展，地理位置資訊在無線 ad hoc 網路協定棧設計中的應用越來越廣泛^[14-16]。本文提出的 GLPCB-PMAC 協定正是基於地理位置資訊設計的，因而假定網路中的節點都配置了 GPS 接收機，每個節點都能獲知當前的地理位置資訊。

3.2 引入節點位置轉發幀

字節	2	2	6	6	12	12	4
	幀控制欄位	發送持續時間欄位	接收節點地址	發送節點地址	接收節點地址	發送節點地址	幀檢驗序列

圖 2. NLF 幀格式
Figure 2. NLF frame format

字節	2	2	6	12	4
	幀控制欄位	發送持續時間欄位	接收節點位置	節點位置	幀檢驗序列

圖 3. 修改後的 CTS 幀格式
Figure 3. Revised CTS frame format

GLPCB-PMAC 協議引入了節點位置轉發幀 (NLF)，幀格式如圖 2 所示。其中，發送持續時間 (duration) 欄位用於存放本次數據發送仍需持續的時長，發送節點位置 (SNL) 欄位和接收節點位置 (DNL)

欄位用於存放該次資料傳輸過程中發送節點和接收節點的地理位置資訊。同時，在 CTS 幀中增加了一個節點位置 (NL) 欄位，用於存放發送該 CTS 幀的節點的地理位置資訊，修改後的 CTS 幀格式如圖 3 所示。

3.3 基於地理位置資訊的暴露終端識別

發送節點完成發送前的隨機退避過程^[4]後，便向接收節點發送 RTS 幀。接收節點收到 RTS 幀後，將自己的地理位置資訊存放在 CTS 幀的 NL 欄位中，並向發送節點發送該 CTS 幀。發送節點收到接收節點應答的 CTS 幀後，將 CTS 幀中的 NL 欄位和自己的地理位置資訊分別存放在 NLF 幀的 DNL 和 SNL 欄位中，並向周圍鄰居節點廣播該 NLF 幀。

由於 ad hoc 網路中各個節點的配置完全一致，因此各個節點具有相等的標準信號發射功率 P_{mtx} 及相同的標準信號傳輸範圍 r_{mtx} 。發送節點傳輸範圍內的其他節點接收到 NLF 幀後，則可以根據自己的地理位置資訊及 NLF 幀中的 DNL 欄位獲知該節點到接收節點的距離 d_{si} 。如果 $d_{si} > r_{mtx}$ ，則該節點在接收節點的傳輸範圍外。因此，當發送節點向接收節點發送資料幀時，該節點即為暴露終端。

3.4 暴露終端並行發起從傳輸

在發送節點的資料幀傳輸期間，GLPCB-PMAC 協定允許暴露終端直接並行發起資料幀傳輸，從而提高網路的平均吞吐量。在本文後面的敘述中，將發送節點和接收節點之間通過 RTS-CTS 控制幀握手機制預約通道發起的傳輸稱為“主傳輸”；將主傳輸資料幀發送過程中，暴露終端不需採用 RTS-CTS 控制幀握手機制預約通道，直接並行發起的資料幀傳輸稱為“從傳輸”。

主傳輸或從傳輸的接收節點正確接收到發送節點的資料幀後，都需要向發送節點應答 ACK 幀。在規定的等待時間內，如果主傳輸的發送節點沒有收到 ACK 幀，那麼發送節點將重發該幀；如果從傳輸的發送節點沒有收到 ACK 幀，那麼該發送節點將重新按照 IEEE 802.11 DCF 協議的規定，與主傳輸的發送節點一起競爭通道^[4]。為了保證發送節點能正確收到 ACK 應答幀，從傳輸的資料幀傳輸則必須在主傳輸的資料幀傳輸期間完成，從而使得主傳輸和從傳輸的接收節點能同步並行向發送節點應答長度相同的 ACK 幀。因此，GLPCB-PMAC 協定規定，暴露終端只能在從傳輸中並行發送長度小於或等於主傳輸資料幀長度的資料幀。

主傳輸發送節點周圍的暴露終端接收到 NLF 幀後，即可由 NLF 幀中的發送持續時間欄位獲知主傳輸資料幀的傳輸時間 T_{mtx} ；同時根據網路層佇列首部資料幀的長度及通道的傳輸速率可以得出該資料幀的傳輸時間 T_{stx} 。如果 $T_{mtx} \geq T_{stx}$ ，則該暴露終端可以在時間 $\tau = T_{mtx} - T_{stx}$ 後發起從傳輸，主傳輸和從傳輸的資料幀發送將同時完成；如果 $T_{mtx} < T_{stx}$ ，則在本次主傳輸期間，該暴露終端不能發起從傳輸。在本文後面的敘述中，將暴露終端成功接收到廣播 NLF 幀，且網路層佇列首部資料幀的長度不大於主傳輸資料幀長度的情況，稱為該暴露終端收到一個有效的廣播 NLF 幀。

3.5 基於功率控制的從傳輸發送/應答機制

由 2.1 節中的分析可知，在允許暴露終端與發送節點並行發起資料幀傳輸的情況下，必須通過功率控制機制設置合理的暴露終端發送功率 P_{stx} ，才能有效避免暴露終端並行發送引起的衝突干擾。因此，GLPCB-PMAC 協議採用了一種基於功率控制的從傳輸發送/應答機制。假設主傳輸接收節點接收到的發送節點信號功率為 P_{mrx} ，熱雜訊功率為 P_n ，接收到的所有從傳輸發送節點干擾信號功率之和為 P_{sp} ，則由式(3)可知，當主傳輸發送節點採用標準信號發射功率 P_{mtx} 發送資料幀時，為了避免從傳輸的發送導致主傳輸發生衝突，則必須要求暴露終端以適當的發射功率 P_{stx} 發起從傳輸，從而使得主傳輸接收節點接收到的信號功率滿足

$$P_{mrx} \geq (P_{si} + P_n)SINR_{rx} \quad (5)$$

同時，根據式(1)可以得到以分貝形式表示的信號功率衰落運算式

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{\text{freespace}} = P_{\text{txdBm}} - P_{\text{rxdBm}} \\ = 201g\left(\frac{d^2}{h_t h_r}\right) - G_{\text{tdB}} - G_{\text{rdB}}, \\ = 201g\left(\frac{4\pi f d}{c}\right) - G_{\text{tdB}} - G_{\text{rdB}}, \quad d \leq \frac{4\pi h_t h_r c}{f} \\ l_{\text{TwoRay}} = P_{\text{txdBm}} - P_{\text{rxdBm}} \\ = 201g\left(\frac{d^2}{h_t h_r}\right) - G_{\text{tdB}} - G_{\text{rdB}}, \quad d > \frac{4\pi h_t h_r c}{f} \end{array} \right. \quad (6)$$

其中， G_{tdB} 和 G_{rdB} 分別為發送節點和接收節點的天線分貝增益。

主傳輸發送節點周圍的暴露終端接收到廣播 NLF

幀後，可以根據自己的地理位置資訊及 NLF 幀中的 SNL 欄位和 DNL 欄位獲知主傳輸收/發節點之間的距離 d_{mx} 以及該暴露終端與主傳輸接收節點之間的距離 d_{si} ，由式(6)即可得到主傳輸收/發節點之間信號衰落值 l_{mx} 以及從傳輸發送節點與主傳輸接收節點之間信號衰落值 l_{si} 。再由式(5)即可推出 P_{stx} （單位為 mW）的計算運算式為

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{stxdBm}} = a \left[101g\left[\frac{10^{\frac{P_{\text{mrxdBm}} - l_{\text{mrxdB}}}{10}}}{SINR_{rx}} - P_n\right] + l_{\text{sidB}} \right] a \in (0,1) \\ P_{\text{stx}} = 10^{\frac{P_{\text{stxdBm}}}{10}} \end{array} \right. \quad (7)$$

在忽略熱雜訊影響的情況下，式(7)可簡化為

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{stxdBm}} = a \left[P_{\text{mrxdBm}} - l_{\text{mrxdB}} + l_{\text{sidB}} - 102gSINR_{rx} \right] \\ P_{\text{stx}} = 10^{\frac{P_{\text{stxdBm}}}{10}} \end{array} \right. \quad (8)$$

其中，參數 a 為不大於 1 的正數，當網路中發送節點密度較大，主傳輸發送節點傳輸範圍內並行發起的從傳輸較多時， a 應取較小的值，從而降低從傳輸對主傳輸的干擾；反之，當網路中發送節點密度較小，主傳輸發送節點傳輸範圍內並行發起的從傳輸較少時， a 應取較大的值，從而增大暴露終端的發射功率，提高從傳輸的吞吐量。參數 a 的取值對網路性能的影響將在第 4 節中詳細討論。

主傳輸和從傳輸的接收節點收到資料幀後，將同步並行向各自的發送節點應答 ACK 幀。因此，從傳輸接收節點發送的 ACK 幀也可能對主傳輸的發送節點產生衝突干擾，導致主傳輸的發送節點無法正確接收 ACK 幀。為了避免這種衝突，GLPCB-PMAC 協議在從傳輸的接收節點應答過程中也採用了與從傳輸發送過程類似的功率控制機制。從傳輸資料幀發送完畢後，將主傳輸發送節點和接收節點的地理位置資訊存放在 NLF 幀的 SNL 和 DNL 欄位，並以發送資料幀相同的功率向接收節點發送該 NLF 幀。從傳輸的接收節點收到該 NLF 幀後，可以根據自己的地理位置資訊及 NLF 幀中的 SNL 欄位和 DNL 欄位獲知主傳輸收/發節點之間的距離以及該節點與主傳輸發送節點之間的距離，再由式(6)、式(7)即可計算出在保證主傳輸 ACK 幀發送成功的前提下，從傳輸 ACK 幀的發射功率，從傳輸的接收節點即以該功率向發送節點應答 ACK

幀。在這種情況下，為了保證主傳輸和從傳輸的接收節點同步向發送節點應答 ACK 幀，主傳輸資料幀發送完畢後，發送節點等待接收節點應答 ACK 幀的超時時長應設置為從傳輸中暴露終端等待 ACK 幀的超時時長與 NLF 幀的傳輸時間之和。

在圖 1(a)所示的網路拓撲中，在發送節點 0 與接收節點 1 成功發起主傳輸，暴露終端 2 與接收節點 3 成功發起從傳輸的情況下，圖 4 給出了完整的主傳輸和從傳輸 MAC 幀收/發時序，圖 4 中的注 1：假設節點 0 隨機選擇退避 5 個時隙，退避結束後發射 RTS 幀；注 2：假設節點 2 隨機選擇退避 7 個時隙，退避到第 5 個時隙時檢測到通道變忙，中止退避；注 3：節點 2 接收到節點 0 廣播的 NLF 幀後，與節點 0 同步平行傳輸長度相等的資料幀；注 4：接收節點 1 和節點 3 同步並行向發送節點應答 ACK 幀。

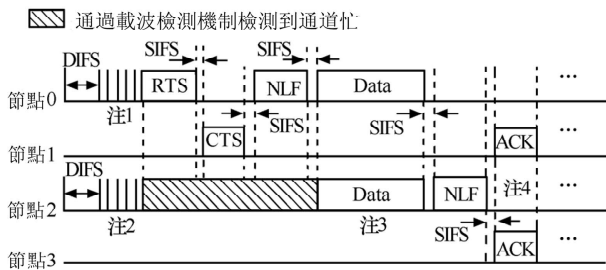


圖 4. GLPCB-PMAC 協議 MAC 幀收/發時序

Figure 4. MAC frame dispatcher timing for GLPCB-PMAC protocol

3.6 從傳輸發送失敗後的隨機退避機制

從傳輸的發送節點在並行發送資料幀以前並沒有通過 RTS 和 CTS 控制幀與接收節點握手，因而降低了資料幀發送成功的概率。同時，主傳輸的發送也會對從傳輸產生干擾，在主傳輸發送節點傳輸範圍記憶體在多個暴露終端的情況下，多個並行發起的從傳輸還會產生相互干擾，這些干擾均容易導致從傳輸發送失敗。失敗的從傳輸不僅會浪費節點的能量，而且還會對主傳輸和其餘的從傳輸產生干擾。因此，為了減少從傳輸發送失敗對網路性能的影響，GLPCB-PMAC 協定採用了一種限制從傳輸發起次數的隨機退避機制。

從傳輸發送隨機退避機制要求節點在記憶體中維護 3 個變數：“從傳輸發送退避窗口” (W)、“從傳輸失敗次數計數器” (C_F) 和“從傳輸發送退避計數器” (C_B)，該機制規定：

1) W 的初值設置為 W_{min} ， C_F 的初值設置為 0， C_B

的初值設置為

$$C_B = \lfloor W_{min} \cdot rand(0,1) \rfloor \quad (9)$$

2) 如果暴露終端在某一次從傳輸中發送資料幀失敗，則將 C_F 的值加 1，如果 C_B 的值為 0，則將 W 和 C_B 的值設置為

$$W = \begin{cases} \lfloor W \cdot rand[1,2] \rfloor, & \lfloor W \cdot rand[1,2] \rfloor < W_{max} \\ W_{max}, & \lfloor W \cdot rand[1,2] \rfloor \geq W_{max} \end{cases} \quad (10)$$

$$C_B = \lfloor W \cdot rand(0,1) \rfloor \quad (11)$$

3) 如果暴露終端在某一次從傳輸中成功的發送了資料幀，則將 C_F 的值設置為 0， W 的值設置為 W_{min} ，如果 C_B 的值為 0，則按照式(11)的規則設置 C_B 的值。

4) 當暴露終端接收到主傳輸發送節點廣播的有效 NLF 幀時：

① 如果 C_F 的值小於 C_{Fmax} ，或者 C_B 的值等於 0，則按照 GLPCB-PMAC 協定的規範繼續發起從傳輸；

② 如果 C_F 的值大於或等於 C_{Fmax} ， C_B 的值大於 0，則將 C_B 的值減 1；

其中， $rand(x,y)$ 表示在區間 (x,y) 內隨機選擇的一個數，記號 $\lfloor x \rfloor$ 表示不大於 x 的最大整數， W_{min} 、 W_{max} 、 C_{Fmax} 均為常量。

由此可知，如果暴露終端在從傳輸中連續發送資料幀失敗的次數大於或等於 C_{Fmax} ，則該暴露終端在隨後連續 C_B 次接收到有效廣播 NLF 幀期間均不能發起從傳輸， C_B 是在 $(0,W)$ 區間中隨機選取的一個值，此過程即為從傳輸發送隨機退避過程。完成本次從傳輸發送退避後，如果該暴露終端在下一次從傳輸發送期間仍然沒有成功發送資料幀，則該節點將按照式(10)中的規則增大 W 的值，並根據該值重新設置 C_B 的值，開始下一次從傳輸發送退避。因此，在從傳輸發送成功概率較低的情況下，該退避機制能有效限制從傳輸的發起次數，避免節點產生不必要的能耗。

4 仿真與結果分析

本文在 GloMoSim 網路仿真環境^[17]中將 GLPCB-PMAC 協定和 DCF 協定的性能進行了比較。為了同時分析暴露終端平行傳輸對網路吞吐量和節點能耗的影響，本文在仿真中考慮了網路平均吞吐量和節點平均能耗這 2 個性能指標。其中網路平均吞吐量是指在一定時間內，網路中所有流的平均吞吐量之和；節點平均能耗是指在這段時間內，節點成功發送

1bit 資料所消耗的平均能量(mJ/bit)。

GloMoSim 仿真環境中的接收機能耗模型是按照朗訊公司製造 WaveLAN^[18]系列直接序列擴頻(DSSS)網卡的標準設計的。該模型假定節點開機後一直處於接收或發送狀態,在接收狀態下,節點的功率為 P_{rx} ;而節點發送信號時的能耗 E_{tx} 則由式(12)計算得出

$$E_{tx} = (C_{tx} \times P_{tx} + O_{tx}) \times T \quad (12)$$

其中, P_{tx} 為節點的發送功率, T 為傳輸時間。按照 WaveLAN 的標準,在 GloMoSim 仿真環境中, P_{rx} 和 O_{tx} 均設置為 900mW, C_{tx} 設置為 16/s。同時,由於 GLPCB-PMAC 協定假定網路中的每個節點都配置了 GPS 接收機,因此,在該協定的性能仿真中,還必須考慮 GPS 接收機的能耗。本文假定節點採用 u-Nav Microelectronics 公司推出的低成本、高性能 GPS 接收機解決方案 uN9018,該產品在持續 GPS 導航下的功耗低於 55mW^[13]。因此,本文在仿真中設置 GPS 接收機的功耗為 55mW。

首先考慮在圖 5 所示的靜態同心圓網路拓撲下進行仿真分析。在該拓撲中,發送節點和接收節點成對均勻分佈在同心圓的內環和外環。物理層採用 DSSS 模型,通道比特率為 2Mbit/s。網路層採用靜態路由,傳輸層採用 UDP 協議,仿真的業務類型為恒定比特率(CBR)業務,其餘仿真參數如表 1 所示。仿真時間為 300s,每個收/發節點對之間的 CBR 流在仿真開始後的第 10s 建立並開始傳輸資料,直到仿真結束為止。資料包發送間隔為 2ms,使得通道處於飽和狀態。

圖 6 給出了當式(7)中的參數 α 取 0.6 時的仿真結果。其中,圖 6(a)、圖 6(b)分別給出了當同心圓拓撲中均勻分佈不同數目的收/發節點對,且所有收/發節點對之間傳輸的資料包長度均為 1 024 位元組時,在 MAC 層分別採用 DCF 協定和 GLPCB-PMAC 協定的情況下,網路平均吞吐量和節點平均能耗的對比;圖 6(c)、圖 6(d)分別給出了當同心圓拓撲中均勻分佈偶數對收/發節點,且一半收/發節點之間傳輸的資料包長度為 1 024 位元組,另一半收/發節點之間傳輸的資料包長度為 920 位元組時,在 MAC 層分別採用這 2 種協定的情況下,網路平均吞吐量和節點平均能耗的對比。

在該拓撲中,由於各個發送節點均在彼此的傳輸範圍之內,所以 DCF 協議能通過載波檢測機制保證各個發送節點公平的佔用通道,在某一對收/發節點的傳輸過程中,其餘發送節點均不能發送信號。由仿真結

果可知,採用 DCF 協定獲得的網路平均吞吐量一直保持在 1.4Mbit/s 左右,該值即為通道比特率為 2M 時,DCF 協議所能獲得的飽和吞吐量^[8];同時,隨著網路中發送節點數目的增多,各對收/發節點因為通道忙而暫停發送的時間也逐漸增加,從而導致節點的平均能耗越來越多。

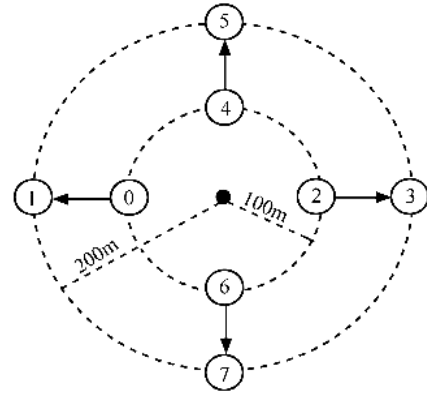


圖 5. 靜態同心圓拓撲

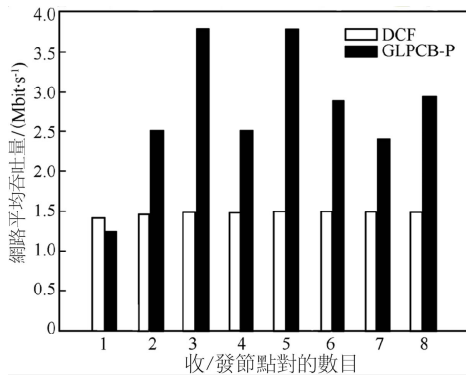
Figure 5. Stationary concentric circles topology

表 1. 仿真參數

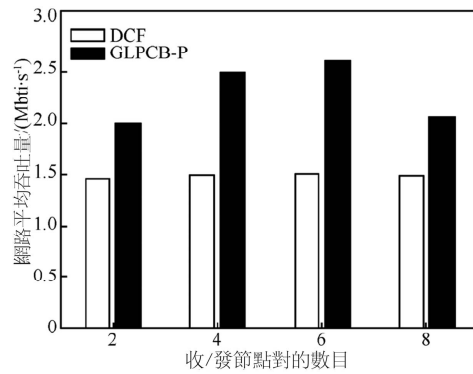
Table 1. Simulation parameters

參數名	參數值	參數名	參數值
傳輸範圍	250m	標準信號發送	15dBm
物理載波檢測範圍	550m	功率	20μs
PHY 頭大小	192bit	SIFS	10μs
MAC 頭大小	224bit	DIFS	50μs
RTS 大小	160bit	CW_{min}	31
CTS (DCF) /ACK 大小	112bit	CW_{max}	1 023
CTS (GLPCB-P) 大小	208bit	SFC_{max}	10
NLF 大小	352bit	SBW_{min}	16
接受信號雜訊干擾比門限	10dB	SBW_{max}	255

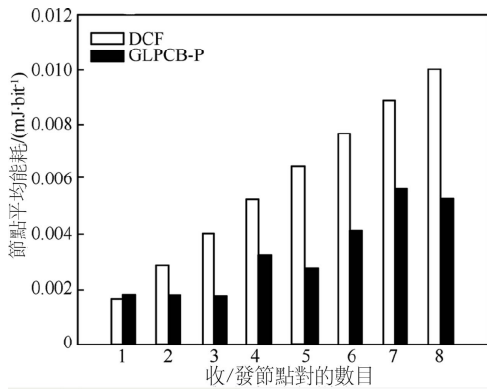
相比之下, GLPCB-PMAC 協定允許暴露終端嘗試直接並行發送資料幀,因而當網路中收/發節點對的數目大於 1 時, GLPCB-PMAC 協定能大大提高網路的平均吞吐量;同時,由於減少了節點在發送前等待通道空閒的時間,而且從傳輸中信號的發射功率低於標準發射功率,所以雖然 GPS 接收機消耗了部分能量,但總體來看,該協議卻能有效節省節點的能耗。由仿真結果可知,在網路中存在 5 對收/發節點的情況下,平均吞吐量提高了 150%,而節點平均能耗卻節省了 60%。



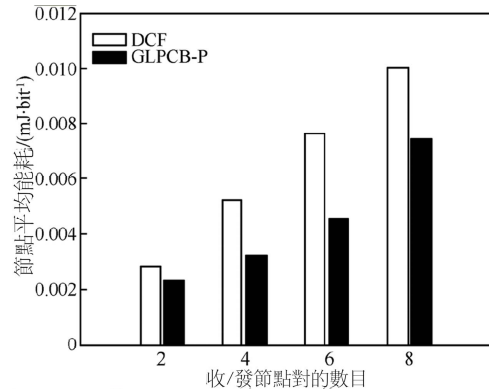
(a) 資料包長度相同時 2 種協定下的網路平均吞吐量
 (a) Average network throughput with two protocols wherein every data packet has a same length



(c) 資料包長度不等時 2 種協定下的網路平均吞吐量
 (c) Average network throughput with two protocols wherein data packets have different length



(b) 資料包長度相同時 2 種協定下的節點平均能耗
 (b) Average energy consumption of nodes with two protocols wherein every data packet has a same length



(d) 資料包長度不等時 2 種協定下的節點平均能耗
 (d) Average energy consumption of nodes with two protocols wherein data packets have different length

圖 6. 靜態同心圓拓撲仿真結果

Figure 6. Simulation results for stationary concentric circles topology

由圖 6(a)、圖 6(b)還能看出，當網路中只有 1 對收/發節點時，採用 GLPCB-PMAC 協定獲得的網路平均吞吐量低於 DCF 協定中的情況，同時節點平均能耗也更多，這主要是由於該協議中 CTS 幀添加 NL 欄位、引入 NLF 幀造成的開銷以及 GPS 接收機耗能引起的。當網路中有 2 對收/發節點時，圖 5 所示的同心圓拓撲將退化為簡單的鏈狀拓撲，在 2 個流中的資料包長度相等和不等的情況下，網路平均吞吐量分別提高了 78% 和 36%，低於 2.2 節中給出的理論值，這也主要是由於 GLPCB-PMAC 協議中的控制幀開銷造成的。

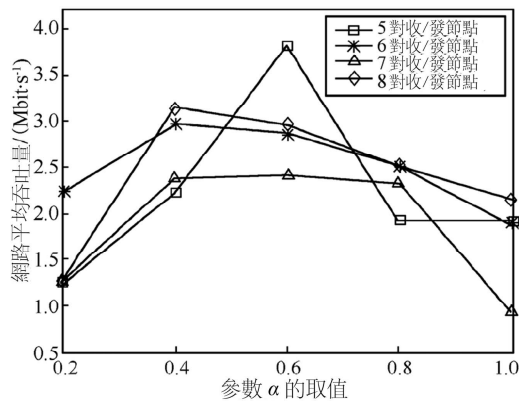
參數 α 的取值對 GLPCB-PMAC 協定的性能有重要影響。當 α 取值過大時，在發送節點密度較大的情況下，多個並行發起的從傳輸可能導致主傳輸發生衝突；而當 α 取值過小時，從傳輸又容易因為受到主傳

輸和其他從傳輸的干擾而失敗。本文在圖 7 中給出了靜態同心圓拓撲中， α 在區間(0,1)內的不同取值對 GLPCB-PMAC 協定性能的影響。

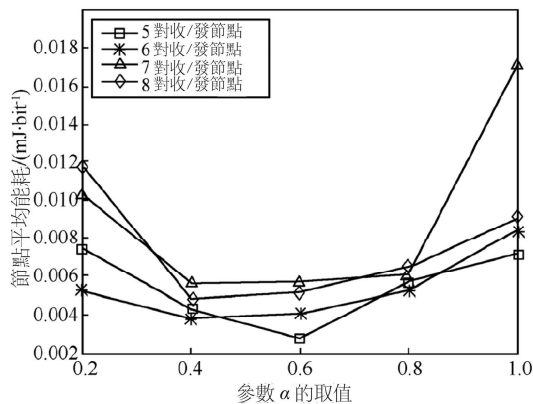
由圖 7 所示的仿真結果可知，在多種節點密度的情況下，當 α 在區間[0.4, 0.8]內取值時，網路能獲得較高的平均吞吐量，同時節點的平均能耗也較少。因此，綜合實驗資料，本文給出參數 α 的建議取值區間為

$$\alpha \in [0.4, 0.8] \quad (13)$$

最後，本文在動態隨機網路拓撲下比較了 GLPCB-PMAC 協定和 DCF 協定的性能。在邊長為 500m 的正方形拓撲中，隨機分佈 40 個節點，採用 Random Waypoint 運動模型，節點運動的最大速度為 5m/s，最小速度為 1m/s。參數 α 的取值為 0.6，網路層採用 AODV 路由協定。仿真時間為 300s，從第 10s 起，



(a) 對網路平均吞吐量的影響
(a) Influence on average network throughput



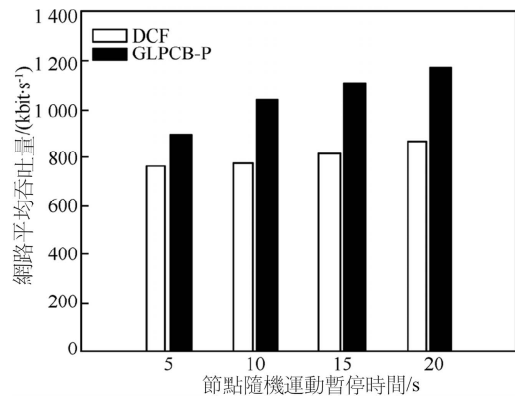
(b) 對節點平均能耗的影響
(b) Influence on average energy consumption of nodes

圖 7. 參數 α 的取值對 GLPCB-PMAC 協定性能的影響
Figure 7. Influence of valuing parameter α on GLPCB-PMAC protocol performance

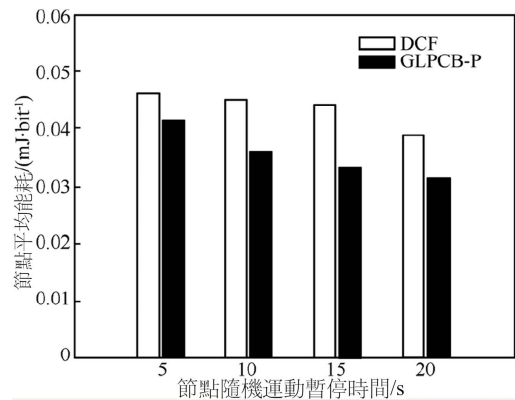
在這 40 個節點中隨機建立 5 個發端和收端均不相同的 CBR 流，發送的資料包長度為 1024bit，其餘參數與靜態拓撲下的仿真一致。圖 8 給出了當節點運動中的暫停時間取不同值時，在 MAC 層分別採用 DCF 協定和 GLPCB-PMAC 協定的情況下，網路的平均吞吐量和節點平均能耗的對比。由該仿真結果可以看出，與 DCF 協定相比，GLPCB-PMAC 協定仍然能獲得更好的網路性能。

5 結論

本文首先分析了為避免暴露終端平行傳輸產生衝突干擾而必須採用的功率控制策略，並在此基礎上提出了一種新的 ad hoc 網路並行 MAC 協定——GLPCB-PMAC。與現有的並行 MAC 協議相比，本文提出的 GLPCB-PMAC 協議具備的突出創新點包



(a) 2 種協定下的網路平均吞吐量
(a) Average network throughput with 2 protocols



(b) 2 種協定下的節點平均能耗
(b) Average energy consumption of nodes with two protocols

圖 8. 動態隨機拓撲仿真結果
Figure 8. Simulation results for dynamic random topology

括：1) 引入了節點位置轉發幀 (NLF)；2) 在暴露終端平行傳輸過程中引入了功率控制機制；3) 在從傳輸發送過程中引入隨機退避機制。其中，NLF 幀用於傳遞節點的地理位置資訊。根據收/發節點的地理位置資訊，網路中其他節點即可判斷自身的暴露終端身份。暴露終端平行傳輸過程中引入的功率控制機制避免了平行傳輸導致的接收節點衝突。在網路發送節點密度較大、從傳輸發送成功概率較低的情況下，從傳輸發送隨機退避機制限制了從傳輸的發起次數，從而避免失敗的從傳輸對其他接收節點產生干擾，降低節點的能耗。仿真證明，GLPCB-PMAC 協定在有效提高 ad hoc 網路的平均吞吐量的同時，還能有效節省節點的平均能耗，從而延長節點的工作時間和網路的生存時間。

REFERENCES

- [1] WU X, MUKHERJEE B, CHAN S H G. MACA -an efficient c channel allocation scheme in cellular networks. IEEE Global Telecommunications Conference. San Francisco, CA, USA, 2000. 1385-1389.
- [2] BHARGHAVAN V, DEMERS A, SHENKER S. MACAW: a media access protocol for wireless LAN. Computer Communications Re-view, 1994, 24(4): 212-215.
- [3] JIANG L B, LIEW S C. Improving throughput and fairness by reduc-ing exposed and hidden nodes in 802.11 networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(1): 34-49.
- [4] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Standard 802.11-1999, IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, 1999.
- [5] DEEPANSHU S, LEENA C W, SRIDHAR I. Mitigating the exposed node problem in IEEE 802.11 ad hoc networks. 12th International Conference on Computer Communications and Networks. Dallas, TX, USA, 2003.157-162.
- [6] ACHARYA A, MISRA A, BANSAL S. MACA-P: a MAC for concurrent transmissions in multi-hop wireless networks. Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Fort Worth, TX, USA, 2003. 505-508.
- [7] VELAYUTHAM A, WANG H. Solution to the exposed node problem of 802.11 in wireless ad hoc networks[EB/OL]. <http://www.cs.iastate.edu/~vel/research/E-MAC.pdf>, 2005.
- [8] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. IEEE Journal on Selected Areas in Commu-nications, 2000, 18(3): 535-547.
- [9] ZHANG K W, ZHANG D Y, JIANG W H. Mitigation of ex-posed terminal problem using packet sensing. 2008 6th Annual Communication Networks and Services Research Conference. Halifax, NS, Canada, 2008. 263-269.
- [10] JUNG E S, VAIDYA N H. A power control MAC protocol for ad hoc networks. Wireless Networks, 2005, 11(1): 55-66.
- [11] ZHOU Y H, NETTLES S M. Balancing the hidden and exposed node problems with power control in CSMA/CA-based wireless networks. IEEE Wireless Communications and Networking Conference. New Orleans, LA, USA, 2005. 683-688.
- [12] DESILVA S, BOPPANA R V. On the impact of noise sensitivity on performance in 802.11 based ad hoc networks. IEEE International Conference on Communications. Paris, France, 2004. 4372-4376.
- [13] <http://www.unav-micro.com/Products.aspx?ProductID=6> and related web pages it linked about μ N9018 [EB/OL]. 2005.
- [14] NAKAGAWA H, OHTA T, ISHIDA K. A hybrid routing with location information for mobile ad hoc networks. Eighth International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, IS-ADS 2007. Sedona, AZ, United States, 2007. 129-136.
- [15] KIM J, SONG J Y, HWANG Y C. Location-based routing algo-rithm using clustering in the MANET. Proceedings of Future Generation Communication and Networking, FGCN 2007. Jeju Island, South Korea, 2007. 527-531.
- [16] ZHANG L L, SOONG B H, XIAO W D. Location-aware two-phase coding multi-channel MAC protocol (LA-TPCMMP) for MANET. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(5): 1659-1668.
- [17] BAJAJ L, TAKAI M, AHUJA R. GloMoSim: a Scalable Net-work Simulation Environment. UCLA Computer Science Department, Technical Report-990027, 1997.
- [18] KAMERMAN A, MONTEBAN L. WaveLAN®- II: a high-performance wireless lan for the unlicensed band. Bell Labs Technical Journal, 1997, 2(3): 118-133.