

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

在藍芽無線網路中設計及建構一高效率的 Scatternet 通訊  
環境(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2213-E-032-036-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：淡江大學資訊工程研究所

計畫主持人：張志勇

計畫參與人員：張志勇、王智敏、彭勇雯、林寬信

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，2年後可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 27 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫期中進度報  
告

計畫名稱：

在藍牙無線網路中設計及建構一個高效率的 Scatternet 通訊  
環境

**Design and Implementation of an Efficient Scatternet  
Environment for Bluetooth Radio Networks**

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC 91-2213-E-032-036

執行期間：91年8月1日至92年7月31日

計畫主持人：張志勇

計畫參與人員：張志勇、王智敏、彭勇雯、林寬信

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：精簡報告

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究  
計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權，一年 二年後可公開  
查詢

執行單位：淡江大學

中 華 民 國 九 十 二 年 五 月 二 十 七 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

在藍牙無線網路中設計及建構一個高效率的 Scatternet 通訊環境(1/2)

## Design and Implementation of an Efficient Scatternet

### Environment for Bluetooth Radio Networks

計畫編號：NSC 91-2213-E-032-036

執行期限：91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日

主持人：張志勇 淡江大學資訊工程系

#### 一、中英文摘要

##### 中文摘要

Bluetooth 是一種新的短距離無線通訊技術。在 Bluetooth Network 中，同時參與兩個以上 Piconets 的 Device 稱為 Relay，多個 Piconets 可藉由 Relay Node 連結成一 Scatternet，以提供 Multi-Hop 的通訊服務。Bluetooth Device 透過 Inquiry 及 Page 來建立連結，經由此種自由對頻的方式所形成的 Network Topology，通常並不是最好的結構。在 Scatternet 結構不佳的情況下，可能會產生過多的 Relay，並造成 Guard Slots 過多、Packet Lost 機率上升，Relay Switch 於不同 Piconet 的 Delay Time 變長等問題。而所形成的 Scatternet 中 Piconet 數目過多，將會使得 Packet 在傳送時發生 Collision 的機率增加，Routing Path 的 Hops 也會增加。本計劃乃針對已形成的 Scatternet，提出一個分散式的 Relay Reduction Protocol 以及利用動態調整 Scatternet 結構的協定，其透過適當的 Role Switching Operation，可以有效減少 Piconets 的個數及 Relay 的個數，並可降低 Packets Lost 及 Guard Slots 發生的機率，而平均的 Routing Path 也明顯縮短。應而可以有效提昇整體 Scatternet 的傳輸效能。

##### 英文摘要

Bluetooth is a new technology for low cost, low power, and short-range wireless communication. A Bluetooth device that participates two or more piconets is called relay, which provides device with multi-hop (or inter-piconet) communication services. In a Bluetooth scatternet, the number of relays and the degree of each relay are significant factors that determine the performance of entire network. In addition to relay reduction, role switch operation can also reorganize the scatternet structure, improving the performance of bandwidth utilization and solving the bottleneck problem. The objective of this project is to propose and implement effective protocols that can adjust the network architecture dynamically by relay reduction and role switching. A communication environment with characteristics of connected network, high bandwidth utilization and low maintenance cost thus can be constructed.

Keywords: Bluetooth, Scatternet, Ad Hoc, Piconet, Wireless.

#### 二、緣由與目的

隨著科技的進步，無線設備的普及化使得人類的生活品質日漸提昇，如何藉由無線設備使人們的通訊更加便利，是目前

科技的趨勢。Bluetooth 是一種短距離、低成本的無線通訊技術，其運作在全世界共通頻率 ISM2.4GHz 頻帶上，以分時多工的跳頻方式，每秒快速變換頻率 1600 次以抗干擾，其傳輸量可達 1MB/秒，傳輸範圍可達 10 至 100 公尺。

在 Bluetooth Scatternet 網路中，由於 Piconets 個數的增加，Channel 的重覆使用率便會提高。當不同的 Piconets 使用了同樣的 Channel 時，此時所發出的 Packets 便會遺失，稱之為 Collision。而當 Piconets 數目過多時，便會導致 Hopping Sequence 碰撞的 Channel 數增加，而導致封包遺失的機率上升，這會讓系統的傳輸效率降低。在一 Scatternet 中形成過多的 Piconets，也會造成所建立的 Routing Path 不是最短路徑，而平均 Routing Path 長度亦將因而變長。若能讓 Piconets 的數目在不影響資料的傳輸的前提下，緩慢的減少，就可以增加 Scatternet 的傳輸效能。此外，除了 Piconet 數目過多會影響 Scatternet Performance，Relay 數目亦會影響 Bluetooth Performance。Relay 負責跨 Piconets 間的溝通，在不同的 Piconets 間切換身分以達成封包的傳遞。但是 Relay Switch 於 Piconets 間會造成諸如 Guard Slots 的浪費、封包於切換時容易遺失及對多個 Piconets 的 Time Slots 規劃不易等問題，適當的減少不必要的 Relay 可以避免這些問題的發生。除了 Piconet 及 Relay 數，Device 角色扮演的不同亦會影響 Scatternet Performance。在 Piconet 中，Device 扮演著不適當的角色時，可能會造成 Routing Path 變長，Delay 增加，Guard Slots 過多，頻寬不足等諸多問題，透過在 Critical Device 來執行 Role Switching 可以達到減少 Piconets 數目、縮短 Routing Path 的目的，並使 Guard Slots 有效減少，Scatternet 的 Performance 將因此而大幅提升。

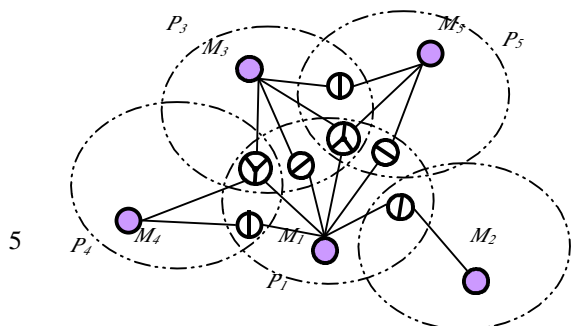
本計劃將提出一分散式 Relay Reduction Protocol 以及利用動態執行 Role Switching 的協定，以改善 Bluetooth System 的資料傳輸效率，達到縮短平均 Routing Path，減少 Delay Time、降低 Route Break 的機率，減少 Bandwidth 消耗、減少 Guard Slot 浪費、解決頻寬瓶頸問題等目的。

### 三、研究報告內容

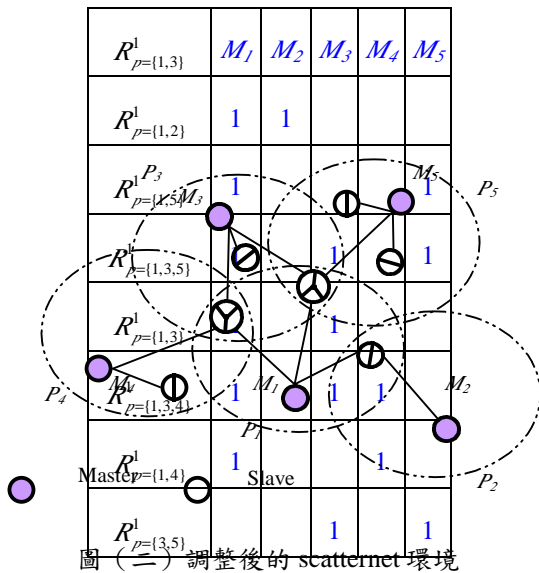
在本計劃中，將提出一分散式 Relay Reduction Protocol，讓 Piconet 之間的 Relay Device 能自動判斷有無其他 Relay 可以取代其所代表的功能，進而 Device 自行決定是否要繼續成為 Relay，另一方面，也提出了以動態的 Role Switching 協定，動態的更改 Scatternet 結構，以達到減少 Piconets 的個數及 Relay 個數，並減少 Routing 時的 Hops 數，減少封包衝撞，縮短 Routing Path 長度及減少 Guard Time 浪費等優點。

#### ➤ Relay Reduction Protocol

Scatternet 的效能高低取決於 Relay 的個數與階度(Degree)；擁有 relay 個數多雖然能使 Scatternet 比較不會因為 Bluetooth Device 之 Mobility 或其他的干擾因素造成斷訊、在 Routing 時較可能有較短的路徑與 Flooding 時速度較快等優點，但卻會造成許多缺點如下：Relay 的個數多除了佔用 Active Member Address 及易造成 Flooding 時 Control Packet 量過大外，欲使 relay 在各個 Piconets 之中保持同步亦更加困難，而階度大的 Relay 在各個 Piconet 中不停的角色變換將使其 Packet 遺失的機率也變得較大。我們研發的協定能根據目前 Scatternet 的連線狀態，刪除不需要的 Relay，以最少的 Relay 達到 Scatternet 的 Connection。我們以圖(一)的 Scatternet 為例，根據 Scatternet 的 Topology 建立一張如表格(一)所示的 Connection Table，以分散式的做法，讓每個 Relay 判斷自己所連的 Master 是否被其他 Relay 所包含，若是，則代表自己可以被其他 Relay 所取代，於是可被取代的 Relay 便與 Member 數較多的 Master 中斷連線，以達到 Load Balance 及節省 AM\_ADDR 的目的。圖(二)為使用 Relay Reduction 演算法減少 Relay 後的 Scatternet。



執行 Role Switching。



表格(一) Relay 的 Connection Table 的內容

圖(三)中，包含了三個 Piconets  $P1$ 、 $P2$ 、及  $P3$  和七個 Devices，並表達了 Bluetooth System 中所有可能的身份組合。Master  $a$  及  $g$  分別負責 Piconet  $P1$  及  $P3$  的運作，Slave  $f$ 、 $g$  及  $e$  接受 Master 的服務，並透過 Master 與其它的 Device 作封包的交換。S/S Relay  $d$  同時參與兩個 Piconets  $P1$  及  $P2$  的運作，並分別擔任 Slave 的身份，負責 Piconet 之間訊息的交換。M/S Relay  $b$  亦同時參與兩個以上的 Piconets  $P2$  及  $P3$ ，但是在 Piconet  $P2$  中擔任 Master 的身份，而在 Piconet  $P3$  中擔任 Slave 的身份，MS Relay  $b$  也同時有負責 Piconets 之間封包傳遞的功能。在 Scatternet 中存在同時扮演 Master 及 Slave 身分的 M/S Relay 將容易造成所屬 Slave 的閒置。當 M/S Relay  $b$  切換到 Piconet  $P3$  時，將會造成存在於  $P2$  的 Slave  $d$ 、 $e$  閒置，而數個 Relay 切換於不同的 Piconet 也會產生 Guard Slot 的浪費。更者，同時存在多個 Piconet，不但使得整體的 Routing Path 變長，亦會造成提高 Piconet 彼此之間 collision 機會。

- 因此，適當的執行 Role Switching 對改善系統 Performance 而言，將有下列好處：
- (1) 減少因為 Piconet 個數過多而產生封包衝撞。
  - (2) 減少 Relay Device 切換於不同 Piconet 所產生的 Guard Slots 浪費。
  - (3) 減少 Routing Path 的長度。
  - (4) 避免 Slave Idle 的情況發生。

圖(三)中，經過各個 Device 依序執行 Adaptive Role Switching Protocol 之後，將可得到圖(四)的結果。所以，當 Scatternet 中的 Piconet 個數過多，造成 Packets 重傳的次數過高時，就可以利用 M/S Relay 或 S/S Relay 向所屬 Piconet 中的 Master 發出 Role Switching，以達到逐步減少 Piconet 個數，使得 Collision rate 降低，減少 Guard slot 浪費，縮短平均 Routh Path 長度，與降低 Delay Time。

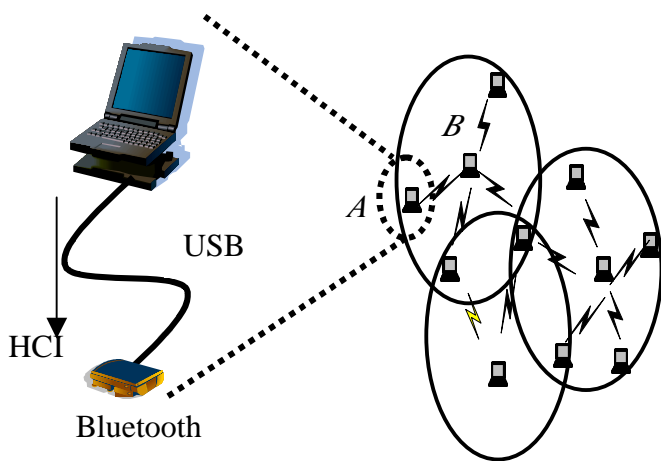
➤ Adaptive Role Switching Protocol

Role Switching 是透過改變 Master 及 Slave 的身份，來改變連結狀態、Topology 結構、封包傳輸方式及主控權。當我們決定使用 Role Switching 來改善 Scatternet Topology 前，首先必須先分析各種不同的 Role Switching 會對 Bluetooth 結構產生何種影響，如此才能確定所執行的 Role Switching 對整體 Performance 均為有利的效果。所以 Role Switching 的執行必須先決定 Scatternet 中有那些 Device 在何時需要

#### 四、系統實作

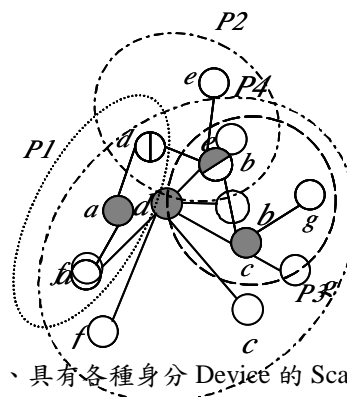
由於 Linux 作業系統具有開放原始碼及系統穩定的特性，我們將會以 Linux 作業系統作為平台，藉由開放原始碼，研究人員能對於原始碼進行修改，並適當的修改 Bluetooth Driver，透過 HCI(Host Controller Interface)指令來操控 Bluetooth 晶片所連結的 Scatternet 結構，測試在特定結構下的 Performance。

我們將在 Linux 作業系統上安裝 Bluetooth Driver，並修改 Bluetooth Driver 中操控 Bluetooth Chip 連結的指令。透過 HCI 指令集的運作，來達到修改 Piconet 及 Scatternet 的結構的能力。我們打算先以低成本且較單純的 Scatternet 來測試影響 Scatternet Performance 的各項參數，我們擬採用 5 至 10 個 Bluetooth Chips 來組成 3 個左右的 Piconets。圖(五)為我們所欲建構的 Scatternet，每個 Bluetooth Chip 將以 USB Port 外接在 Notebook、桌上型電腦、或是 Linux 版的個人數位助理(PDA)上。透過對 Bluetooth Driver 的改寫，我們擬將 HCI 指令由 Notebook 或桌上型電腦等 Host Device 透過 USB Port 的方式傳達到 Bluetooth Chip 並執行此指令，藉以操控及更改已形成連結的 Piconet 及 Scatternet 其結構。



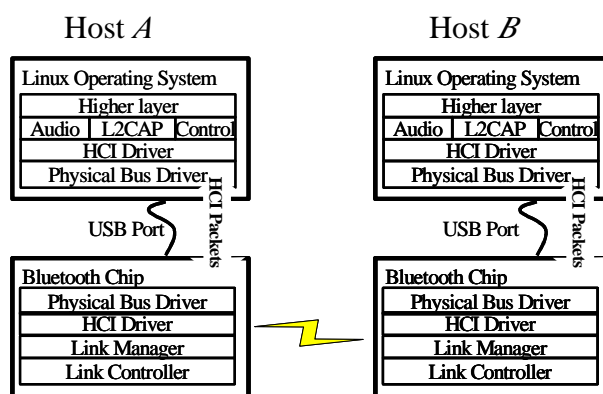
圖(五)、Scatternet 的建構

圖(六)為兩 Bluetooth Device 間的關係，我們擬將 Bluetooth Chip 透過 USB Port



圖(三)、具有各種身分 Device 的 Scatternet

圖(四)、執行 Role Switch 之後的結果方式連結到 Host Device。我們將在 Linux 作業系統上安裝 Bluetooth Driver，透過對 Driver 的改寫，我們將以 HCI 指令來建構基本的 Scatternet。



圖(六)、硬體架構圖

我們首先將在 Linux 作業系統的 Notebook 上安裝 Bluetooth Driver，並且將兩個 Bluetooth Chip 分別以 USB Port 連結到兩部 Notebook 上，以修改 Bluetooth Driver 的方式來使這兩個 Bluetooth Chip 能輕易受控於我們所下的 HCI 指令，進行 Master 或 Slave 的角色扮演與連結。緊接著，我們已發展一 Packet Generation、Packet Sender、及 Packet Receiver 的程式於 Bluetooth Driver 之上，使我們能主動從一個 Bluetooth Device 發出 Packet，透過 Bluetooth Chip 傳送到另一 Bluetooth Host。而接著下來我們將發展的 Packet Analyzer 程式則是用來分析封包的正確性、是否為重傳封包、以及流量等資訊，並將這些資訊交由更上層我們所發展的 Performance Evaluator。在下一步驟，我們將修改 Bluetooth Driver 及先前我們所研發的軟體諸如 Packet Generator、Packet

Sender/Receiver、Packet Analyzer、Performance Evaluator，使其能適用於多個 Bluetooth Chip 所建構的 Scatternet。最後，將依我們所發展的 Relay Reduction Protocol 與 Adaptive Role Switching Protocol，將其實作出來，並透過 Performance Evaluator 來衡量其對 Performance 的改善程度。

我們在 Linux 上，已經可以順利的操控 Bluetooth HCI 指令，使得 Bluetooth 晶片可以達到彼此連結、斷訊，更進一步的，我們並控制 Devices 連結個數，形成可以限制連結個數的 Piconet，以下，我們將介紹 Bluetooth Driver: Affix 中，一些常用的 HCI 指令。

Affix 指令中，最常用的指令便是 btctl，btctl 控制了 General commands、Security commands、HCI commands、UART commands、RFCOMM commands、AUDIO commands、SDP commands、OBEX commands 及 PAN commands。以下針對常用的指令來說明：

- 尋找週圍的 Bluetooth Devices  
簡略的訊息：`btctl inquiry <length>`  
完整的訊息：`btctl discovery <length>`  
`<length>` = 搜尋的秒數
- 顯示本地端的 Bluetooth Device Address  
`btctl bdaddr`
- 顯示（更改）本地端 Bluetooth Device 的名稱  
`btctl name [<name>]`
  - 顯示遠端 Bluetooth Device 的名稱  
`btctl remotename <bda>`  
`<bda>` = Bluetooth Device Address
  - 設定可被 discovery 或 connect  
`btctl scan [+|-] [disc|conn]`
  - 設定本地端 Bluetooth Device 的角色  
`btctl role <allow|deny>`  
`<master|slave>`
  - 連接遠端 Bluetooth Device  
`btctl connect <address>`  
`[<channel> | [service_type]]`
  - 切斷遠端 Bluetooth Device 連線  
`btctl disconnect [line]`
  - 顯示已連線的 Bluetooth

Device

`btctl status`

- 傳送檔案到遠端的 Bluetooth Device

`btctl push <address> [<channel>]`  
`<file name>`

- 使用 OBEX ftp

`btctl ftp`

◆ 建立連線

`open <address> [<channel>]`

◆ 結束連線

`close`

◆ 檢視遠端目錄結構

`ls [<address> [<channel>]]`

◆ 傳送檔案至遠端連線

`put [<address> [<channel>]]`  
`<file name>`

◆ 從遠端取得檔案

`get [<address> [<channel>]]`  
`<file name>`

◆ 傳送檔案至遠端連線

`push <address> [<channel>]`  
`<file name>`

◆ 刪除遠端檔案

`rm [<address> [<channel>]]`  
`<file name>`

◆ 進入遠端目錄

`cd <dir name>`

- 創建遠端目錄

`mkdir <dir name>`



```

Shell - Konsole
工作階段  □□ □□ □□ □定 □明
debian:~/Desktop#
debian:~/Desktop#
debian:~/Desktop#
debian:~/Desktop#
debian:~/Desktop# btctl down
debian:~/Desktop#
debian:~/Desktop# btctl up
debian:~/Desktop# btctl
Affix version: Affix 1.2.6-1
---->>> Affix Bluetooth Driver
For help use "btctl -h"

debian:~/Desktop# btctl up
debian:~/Desktop#
debian:~/Desktop# btctl
Affix version: Affix 1.2.6-1
---->>> Affix Bluetooth Driver
For help use "btctl -h"

bt0      00:08:1b:00:0b:61
        Name: "debian"
        Class: 0xB20104, ComputInfor
mation]
        Scan Mode: discoverable
        Security mode: service
        Packet types: DM1 DH1 I
        Connection role: allow
        Baseband:
        Manufacture: Cs

```

圖(七)、控制 Bluetooth 晶片的 HCI 指令

除了控制 Bluetooth Device 連線、斷訊之外，我們更可以控制 Bluetooth Device 藉由使用建立 Socket 的方式連線，或是使用 OBEX 的方式，讓不同的 Bluetooth Device 之間可以傳送檔案，交換物件，以下，我們將介紹指令的使用情形。

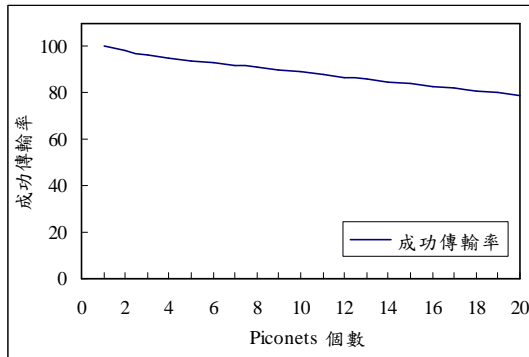
建立 Socket 連線的指令：

- **BTPROTO\_HCIACL**  
Creates HCI ACL socket. Valid type: SOCK\_SEQPACKET.
- **BTPROTO\_HCISCO**  
Creates HCI SCO socket. Valid type: SOCK\_SEQPACKET.
- **BTPROTO\_L2CAP**  
Creates L2CAP socket. Valid type: SOCK\_STREAM, SOCK\_SEQPACKET.
- **BTPROTO\_RFCOMM**  
Creates RFCOMM socket. Valid type: SOCK\_STREAM.

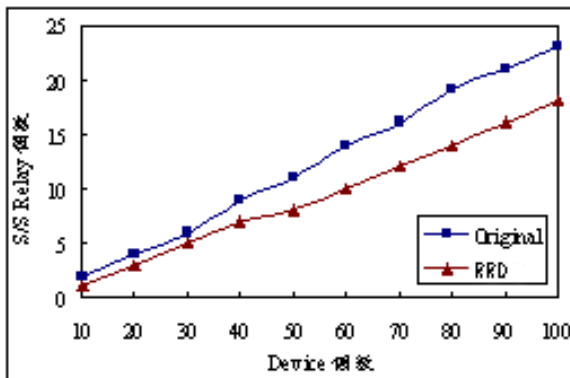
## 五、效率分析

為了評估本計劃所提出的 Protocol 效能，我們建構了一個允許我們來觀察及測量在各種變化條件下的績效的環境。除了一些演算法的參數外，在這個模擬環境中，也設計可以允許我們更改環境的變數。例如：每個 Piconet 中 Devices 的個數環境中 Devices 的總個數、及任意兩 Devices 所建立的 Routing Path 數等。實驗進行的環境中將在一已經形成的 Connected Scatternet 中進行，而所有的 Bluetooth Device 均彼此處於通訊範圍內，即是彼此都可以聽到對方所傳達的訊息。我們設計在一個 1000x 1000(pixel)的區域中來模擬 Protocol)的做法，並在其內可以任意放置 N 個點(Devices)和一些我們所要測試的變數。因為本實驗所要模擬的是本計劃提出的執行演算法所要的 Scatternet 結構調整的動作，所以我們將會在區域內建構一個透過自由對頻所連結的 Scatternet，並在此環境中執行我們的演算法。圖(八)的實驗環境說明當 Piconet 個數增加時，Packets 的成功傳輸率會隨之下降。當 Piconet 個數為 1 時，因為沒有其它 Piconet 的影響，其成功傳輸率為 100%。隨著 Piconet 個數的增加，當 Piconet 個數為 10 個時，其成功傳輸率約為 88%，當 Piconet 個數增加為 20 個時，其成功傳輸率便降低到約 79%。圖(九)說明了執行 Relay Reduction Protocol (RRD)可以有效減少 Relay Device 的個數，在維持 Connected Scatternet 的限制下，減少 Relay Device 個數可能造成每一 Relay 必須參與更多 Piconet，即 Relay 的 NOP 值增加。當 Relay 所參與的 Piconets 個數越多時，所必須負責代傳的 Packets 便可能越多，其 Guard Time 浪費亦隨之上升。然而執行 Relay Reduction Protocol(RRD)卻不會導致此種情況。為了測試 Adaptive Role Switching Protocol (ARST)對 Hops of Routing 改善的績效，我們將隨機在 Scatternet 建立 10 條 Routing Path，觀察 ARST 對不同 Device 個數所建立的 Scatternet 環境的影響，如圖(十)所示，當 Device 個數為 10 個時，由於所建立的 Routing Path 平均 Hop 數並不高，執行 Adaptive Role Switching Protocol (ARST)的效果並不明顯。當 Device 個數增

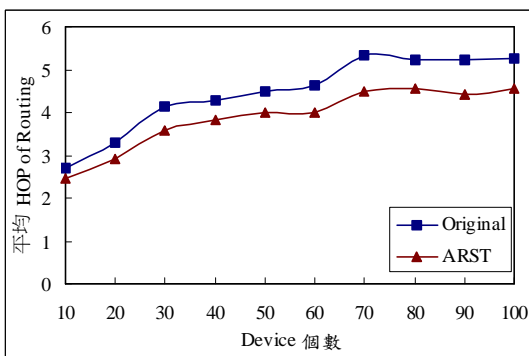
加，而 Piconet 個數變多時，可發現 ARST 有降低 Hops of Routing 的效果。由其可知，透過適當的 Role Switching Operation，的確可以有效減少 Piconets 的個數及 Relay 的個數，並可降低 Packets Lost 及 Guard Slots 發生的機率，而平均的 Routing Path 也明顯縮短，並可以有效提昇整體 Scatternet 的傳輸效能。



圖(八)、Piconet 個數與 Packet 成功傳輸率的關係



圖(九)、執行 RRD 對 Relay 個數的影響



圖(十)、執行 ARST 對 Hops of Routing 的影響

## 六、參考文獻

[1]. Specification of the Bluetooth system-CORE v1.0A, July 26<sup>th</sup> 1999.

[2]. Slim Souissi, Eric F. Mehofer "Performance Evaluation of a Bluetooth Network in the Adjacent and Co-channel Interference" in *Motorola Personal Communications sector 5401* North Beach Street, Fort worth, TX76137USA

[3]. Zilrbes, S.; Stahl, W.; Matheus, K.; Haartsen, J "Radio network performance of bluetooth", *Communications, 2000. IEEE International Conference on* Vol.: 3, pp. 1563–1567, 2000

[4]. Setting up a Bluetooth Packet Transport Link <http://citeseer.nj.nec.com/392522.html>

[5]. Rene Nusser, Robert Bosch, Rodolfo Mann Pelz, "Bluetooth-based Wireless Connectivity in an Automotive Environment", in *IEEE Vehicular Technology Society, 2000*

[6]. Pravin Bhagwat, Adrian Segall, "A Routing Vector Method (RVM) for Routing in Bluetooth Scatternets," *The Sixth IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MOMUC'99)*, pp. 375-379, No. 1999.

[7]. Lakshmi Ramachandran, Manika Kapoor, Abhinanda Sarkar, Alok Aggarwal, "Clustering Algorithms for Wireless Ad Hoc Networks", *Proceedings of the 4th International Workshop on Discrete algorithms and methods for mobile computing and communications 2000*.

[8]. Kalia, M.; Bansal, D.; Shorey, R "MAC scheduling and SAR policies for bluetooth: a master driven TDD Pico-cellular wireless system", *Mobile Multimedia Communications, 1999. (MoMuC '99). 1999 IEEE International Workshop*, pp. 384–388

[9]. W. Zhang, H. Zhu, and G. Cao, "On Improving the Performance of Bluetooth Networks Through Dynamic Role Management," *Technical Report, CSE-01-018 Pennsylvania State University*

[10]. "The Bluetooth™ Wireless Technology white paper" in White Paper, Product Plans, Early Access Program

[11]. J. Haartsen, "The Bluetooth Radio System," *IEEE Personal Communications*, vol. 7, no. 1, pp. 28–36, Feb. 2000.

[12]. S. Baatz, M. Frank, R. Gvpffarth, D. Kassatkine, P. Martini, M. Schetelig, A. Vilavaara, "Handoff Support for Mobility with IP over Bluetooth", *The 25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN)*, 2000

[13]. Mattisson, S., "Low Power Electronics and Design", 2000. *ISLPED '00. Proceedings of the 2000 International Symposium*, pp. 151–154, 2000

[14]. Manish Kalia, Sumit Garg and Rajeev Shorey, "Efficient Policies for Increasing Capacity in Bluetooth: An Indoor Pico-Cellular Wireless System", *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, May 15-18, 2000, Tokyo, Japan.

[15]. Famolari, D.; Agrawal, P., "Architecture and performance of an embedded IP bluetooth personal area network", *Personal Wireless Communications, IEEE International Conference*, pp. 75–79, 2000.

