

設計與實作多點跳躍語音傳輸於 Zigbee 網路

張宸勳
國立台中教育大學
chchang761221@gmail.com

徐嘉佑
國立台中教育大學
zuoai4321@hotmail.com

張林煌*
國立台中教育大學
lchang@mail.ntcu.edu.tw

李宗翰
國立台中教育大學
thlee@mail.ntcu.edu.tw

張秀峰
臺北城市科技大學
hfchang@tpcu.edu.tw

摘要

過去數年來無線感測網路(Wireless Sensor Network, WSN)已成為監控各種環境及物理現象等應用的主要技術,若能利用佈建於高山環境的 Zigbee 網路傳送語音已成為可投入研究之領域,我們的目標將設計與實作一套緊急語音救援系統,藉由 Zigbee 間不同的連線品質動態調變語音 Bit Rate 並依據不同 BitRate 設計不同封包格式,可確保 Zigbee 在訊號不佳且封包遺失率較高時仍可保有一定的語音品質。最後在我們的實驗中可有效的證明本論文所提動態式 Bit Rate 的可行性,並詳述本文實驗架構,如訊號品質所造成的封包遺失率與語音品質進行分析探討。

關鍵詞: WSN、Zigbee、Speex、Xbee、BitRate。

1. 前言

近年來無線感測網路(Wireless Sensor Network, WSN)相關技術已發展日益成熟與進步,但 WSN 的傳輸型態與資料格式不是僅能侷限於傳送監控環境等物理數據,例如:壓力、溫度、聲音及光線等等,[1]提出無線感測網路是可以傳送更多元的資料格式,例如傳送語音即是在 WSN 上的一項新資料型態與突破。本篇論文主要將利用 Zigbee 進行實作探討,Zigbee[2]與 IEEE 802.15.4[3]皆由電子電機工程師學(Institute of Electrical and Electronics Engineers,IEEE)中所提出,此一標準亦稱為低速無線個人區域網路(Low Rate Wireless Personal Area Network, LR-WAPN),具有低功耗、低成本與可支援多點跳躍(Multi-Hop)傳輸之特性。然而本論文所使用的 Zigbee 主要特點是(1)低傳輸數率 250kbps。(2)具短距離傳輸能力(一般約為 50-100m,依據耗電量不同,可提升最遠 300m)。(3)低功耗。(4)目前制定的頻段為全球的 2.4GHz ISM 頻段。然而

Zigbee 透過點對點方式相互進行連結,並可集結成大範圍無線網路脈絡,可無須透過大型無線網路基地台發送訊號,而是利用無基礎建設之點對點連結的方式,進行語音資料的傳播。

由於近年來登山活動已成為人們常見的休閒運動,但登山客攀爬高山發生意外事件卻意外頻傳,若 Zigbee 網路的資料傳輸技術進行語音交換可有效的傳達,將可以提供一套用於偏遠山區的通訊平台,例如登山客攀登偏遠山區發生意外時,即可提供緊急語音求救服務。

由於 Zigbee 傳輸技術大多應用於傳送一般環境監測下的物理數據,而 Zigbee 的傳送數率最高僅能 250kbps,傳送語音資料相對是一大挑戰,語音資料串流與一般數據資料不同,由於語音對於時間限制(Time Constrained)和延遲(Delay)具有嚴苛的要求,但因語音壓縮編解技術日益進步,若能使用適當的語音壓縮技術進行調配適合 Zigbee 傳遞的封包格式,將可克服使用 Zigbee 此嚴苛環境下傳遞語音的困難,並保有可接受的語音品質。

本論文將於第二部分介紹過去 WSN 語音傳遞相關文獻研究;第三部分,建立 Zigbee 多跳拓撲環境,進行多跳語音傳送並提出動態式調變 Bit Rate 機制,依據不同 Bit Rate 設計不同語音封包格式,就其機制與架構做詳細分析與介紹;第四部分,透過實際測量實驗結果進行分析,以證明本論文所提方法;最後第五部分,將對本論文所提供機制,分析未來可應用方向與結論。

2. 文獻探討

由於語音資料串流與一般環境監測下的物理數據,在無線感測網路傳送上是具備不同的限制與要求,尤其是語音資料串流比起一般資料更具有嚴格的要求,如延遲、封包遺失率等,都會影響語音品質,間接更影響到此語音串流

傳送的必要性。然而過去[4]研究中使用 Zigbee 網路為 Xbee[5]傳輸率為 106kbps 雖已可達到語音傳輸的門檻，但能必須選擇適當的傳輸模式才能進行穩定的語音傳輸。在[1]研究中已成功將 Zigbee 製作成耳機，在選擇良好的語音壓縮器與高效率、低功耗的語音處理晶片下結合 Zigbee 進行語音傳輸，可與電腦端連線使用 Zigbee 耳機。其中[6][7][8]皆針對語音傳輸於 Zigbee 提出有效的解決方法。

在[9]的研究中，此研究團隊在火場緊急環境下進行 Zigbee 語音通訊技術，使用了 TLV320AIC1107 語音處理晶片進行 ADPCM 16KHz-64KHz 進行調整找出最適當的編碼率，並透過德州儀器 CC2430 Zigbee 晶片進行多點傳輸實作，但在多點傳輸過程中仍會有許多困難仍需解決如拓樸環境、硬體效能分析等議題。

在[10][11]研究中作者修改了更適用於 Zigbee 網路中的語音封包傳輸系統，採用 Non-Acknowledgement 模式，並使用 G.729.A 編碼器。每 100ms 傳送 127 bytes 語音封包，以提高頻寬使用率，此方法並無考量流量控制，而且在通訊距離較長時，雜訊與干擾可能造成封包遺失率亦大幅提升。然而過去研究中，語音封包僅需 13kbps 即可正常建立通話，因此，在封包遺失率低於 10% 的前提下，Zigbee 已足夠提供可接受語音品質於一般語音串流應用。由於傳送語音封包對於延遲和吞吐量有嚴格的要求，根據[1]所提供之研究結果採用 Speex[12]語音編解碼進行語音壓縮，使其語音格式可符合 Xbee 進行傳遞。

針對拓展語音傳輸距離進行研究，由[13]研究說明當使用 Zigbee 進行 Multi-Hop 傳輸過程將出現多種延遲，如搜尋裝置延遲約 30ms、頻道連結延遲 15ms 與工作觸發延遲 15ms，並於研究中指出 Zigbee 無線感測器發送端由應用層至實體層所需工作延遲亦需約 1ms，而當無線感測器由實體層接收封包至應用層過程則需約 0.9ms，若中間加入中繼結點 Router 則需整合發送端與接收端兩項延遲約 1.8ms。在 W. Woon [14]等學者研究結果中顯示，使用鏈狀路由傳送語音封包，可使多個中繼節點在不考慮能源消耗狀態下作時間同步並進行排程，使封包避免在路由過程中封包因競爭造成延遲及時間不同步等問題產生。

另外在針對無線感測器與固定感測節點之間的訊號強度，進行語音品質調整處

理。過去許多研究中皆利用訊號強度進行定位分析如[15]中利用 RSSI 定位技術，接收節點根據所接收到的訊號強度，實現無線感測網路訊號強度顯示之應用，驗證與分析 RSSI 定位之效能。L. Dimitrios[16]等學者以 Zigbee 實驗之結果，證明無線訊號強度在一定的範圍空間內，將會與空間距離呈現系衰減的關係，並受到不同發射功率，例如-25dBm、-15dBm 與 0dBm，以及發射端不同之天線角度的影響，而有不同的訊號衰減的變化。

3. 系統架構

本文將於 3.1 簡介本論文所使用硬體器材 3.2 介紹所使用之編碼器 Speex 並分析其語音資料格式。並於 3.3 介紹所使用之編碼器 Speex 並分析其語音資料格式。最後 3.4 完整描述動態式調變語音編碼率機制流程。

3.1 硬體元件介紹

本系統架構主要以 Zigbee 即時性語音傳輸技術為應用情境，本論文以 Xbee 無線傳輸器為基本硬體元件建立本系統架構，Xbee 具備最大傳輸率為 250Kbps，而本實驗架構所採用之 Xbee 版本為 Xbee Serial 1 其 payload 大小最大為 100Bytes，因此在考慮封包經由無線傳輸過程會因多種因素造成 packet loss 等影響，在語音封包設計上必須使其 Frame 完整包含於 100Bytes 大小內。

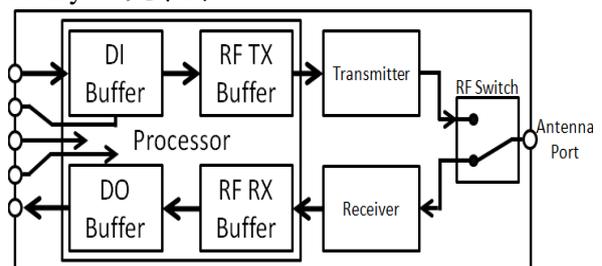


圖 1、內部數據流程圖

由圖 1 中可見 Xbee 內部數據流程圖中，具備了兩暫存器分別為 RF TX Buffer 及 RF RX Buffer，其主要功能為暫存資料在內部處理不及或網路上未建立而無法傳送的暫存空間，當接收資料量到達暫存器上限時即由 CTS 腳位發出警訊並停止接收資料，等待資料處理完成才回復運作，此為 Xbee 內部數據的流量控制，另外 RF Switch 區塊為建立多跳語音傳輸

的關鍵技術，由於中繼節點必須在很短的時間內接收數據並立即傳送至下一節點，因此透過 RF Switch 的收發轉換即可達成中繼節點的主要功能。

3.2 Speex 語音封包格式

儘管 Zigbee 無線感測網路已技術成熟，但 Zigbee 網路的傳送速率最高僅能 250kbps，相較於藍芽具備 1Mbps 傳輸速率，傳送語音資料相對是一大挑戰，然而本系統架構所使用的 Xbee payload 最大僅 100 Bytes，因此選擇一可靠的語音編碼器為第一課題。

由[1]所提應用 Open source Speex 語音壓縮技術於 Zigbee 網路環境，並提出許多語音編碼器應用於 Zigbee 網路環境，Speex 皆具備了較良好的執行效率及語音品質等結果，另外由於 Speex 並非大量浮點數運算的語音編解器，所以在編解碼運算上並不需要耗費大量運算能力與電能，由[17]中使用了 72MHz 的 STM32F103xx 微處理器對 Speex 語音編碼器進行實作數據，由實作數據可以得知 Speex 在 72MHz 的處理器下運作 CPU 僅需要 52% 即可完成編碼的運算 8% 即可完成解碼的運算，有此可知 72MHz 最多僅使用了 52% 即可完成運算，因此使用應用 Speex 編解碼器在未來尋找語音處理晶片選擇上可不需考慮高耗電、高運算能力。

Speex 編解技術可選擇三種不同的 Sample rate，分別為窄頻(Narrowband)、寬頻(Wideband)、超寬頻(Ultra-wideband)。在 Speex 窄頻模式中，主要的編碼工作分別是 Line Spectral Pairs(LSP) Quantization 線性的量化、Adaptive codebook search 可調變的編碼簿搜尋、Sub-vector Fixed codebook search 固定式的編碼搜尋。依照 Data Rate 的不同，窄頻模式有 8 種 Sub-modes，用於處理量化(Quantization)與非量化(Un-quantization)音頻與增益。

基本上 Speex 被設計用於 Voice over IP(VoIP)，對於封包遺失所造成的影響能夠妥善處理，並將語音品質損失降低。Speex 為了能有廣泛的相容性，可調整編解碼運算複雜度(Complexity)，並且僅占用少量記憶體。Speex 可對壓縮複雜度進行調整，其參數控從 1 至 10。複雜度 1 之雜訊準位(Noise Level)比複雜度 10 的雜訊準位高出 1dB 至 2dB，但複雜度 10 的 CPU 運算需求遠比複雜度 1 多五倍。

雖然 Speex 具備良好的封包遺失處理能力，但若 Speex 語音 frame 數據資料遭到 Zigbee

封包切割，此時若出現封包遺失則對整體語音數據造成非常嚴重的影響，針對此因素必須再利用 Speex 編解碼器的同時，設計符合一個健全的封包格式，以符合 Xbee 100 Bytes Payload 大小的 Speex 語音封包。

在本論文中將採用 Speex 的窄頻模式中的 15Kbps、11Kbps、8Kbps 三種不同壓縮率進行實驗，以 bit-rate 15Kbps 格式為例，15Kbps 的 frame 大小是由 300 個 sample 所組成的 1 個 frame 可撥放 20ms 語音，其編碼格式如圖 2 所示，由 4 個 Byte 夾帶代表不同 Bit-Rate 的 Frame Size 進行不同編碼率的辨識，接著即為此 Bit-Rate 的 Frame 語音資料。



圖 2、Speex 15Kbps 編碼格式

表 1、不同 Bit-Rate Frame 大小

Bit-Rate	15 Kbps	11 Kbps	8 Kbps
Sample	300	220	160
Frame Size	38Bytes	28Bytes	20Bytes

由表 1 可得知本論文所使用的三種編碼率，所具備的不同 Frame 大小，由此表數據可設計以最大量的 Frame 個數，夾帶於 Xbee 的 100 Bytes 中，然而在 Speex 編碼格式中每個 frame 前都夾帶有 4 個 Bytes 紀錄 Frame Size 的空間，若一個封包中夾帶了 4 個 Frame 則需夾帶 4*4 Byte 的記錄資料，所以我們可以將其保留 4 個 Bytes 並刪出其他，以減少有限的 payload 中的多於浪費，其本論文所設計之 Speex 封包格式為圖 3 所示，在圖 3 中可發現降低語音 Bit rate 下可以攜帶的 Frame 個數即大於高品質的 Frame 個數，換言之在較低 Bit Rate 下可將較多的 Frame 數進行傳送。

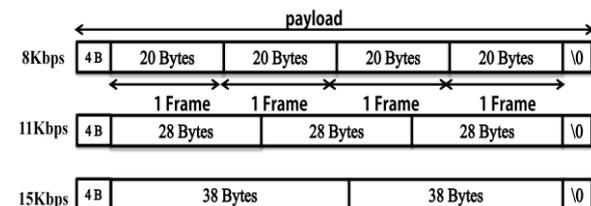


圖 3、Xbee 語音封包格式

相關研究指出當網路處與壅塞等不佳環境下進行 VOIP 傳送，若將語音品質進行動態調整，可使語音封包 Packet loss Rate 下降並順利傳送，且研究指出使用 Speex 語音編解碼器時當語音資料中途經歷大量封包遺失，所造成的語音品質將遠遠低於經調降的語音 Data Rate 的

語音品質。此時可以選擇降低語音品質，讓其語音在相同的 Packet Loss Rate 下傳送更多的 Frame 數到接收端，使接收端順暢播放語音訊息，進行且降低品質能可維持一定接收度，因此本論文將在將針對不同情境下的語音品質進行分析。

3.3 多跳語音傳輸

本論文再多跳語音傳輸架構上，將參考[9]所提方法鏈狀路由，並利用圖 4 進行傳送進行語音封包傳送，本論文將可使用多個中繼節點在不考慮能源消耗狀態下作時間同步並進行排程，使封包避免在路由過程中封包因競爭造成延遲及時間不同步等問題產生，然而由[4]中提及中繼節點增加會造成封包遺失(packet loss)，並在[13]中提及當封包大小越大在經過中繼節點中，容易造成封包組成錯誤，然而本論文為避免此現象發生，由 3.2 節針對不同編碼率所設計之封包格式將可有效避免，封包在中節點繞送過程遭到額外切割使其封包到達接收端組成發生錯誤並降低經過中繼節點的 packet loss。

由於 Xbee 在點對點情境下可有效傳輸最大極限僅 100 公尺，因此若要應用於更長距離的救難情境，則必須設計完善的多跳語音傳輸架構，於本論文設計，封包將透過鍊狀路由方式行傳送，如圖 4 所示，由[節點 1]發送至[節點 4]，每節點將不進行睡眠機制使研究架構達成 Real-Time 語音傳送，當[節點 2]接收到由[節點 1]發送的語音資料時將可立即進行資料繞送，將資料在固定的時間內傳送至[節點 3]並使封包一個接一個進行傳送。

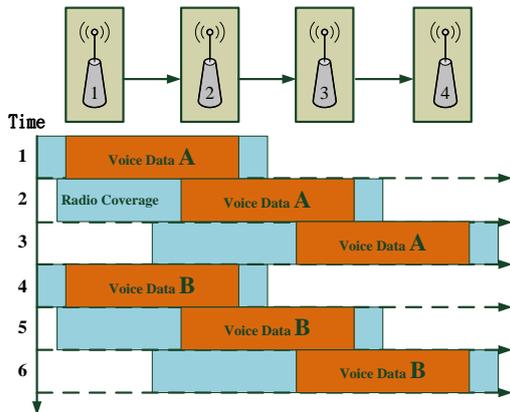


圖 4、多跳鏈狀路由傳輸流程

另外由圖 5 所示為本論文所提多跳語音傳輸系統流程，首先由音效卡取得原始數位音檔並立即透過 Speex 進行語音壓縮，然而 Xbee

硬體結構中流量控制 Buffer 仍無法負荷大資料量的語音資料，為避免 Xbee 傳送與接收不及，造成語音封包在未經傳送即流失狀況發生，因此本架構另外以 Leaking bucket 方式設計 Traffic Buffer 進行流量緩衝控制並可有效降低 Xbee 內部 Flow control 頻繁機制觸發，造成語音品質下降。由於語音封包不同於一般封包需嚴格控制延遲時間與吞吐量，且中繼節點不同於傳送端與接收端需處理語音封包等運算問題，因此本架構設計中繼節點將以效率作為優先考量，本系統架構於中繼節點除了給予增加暫存器外並不多做額外運算即進行語音資料繞送，以降低延遲時間為第一考量。

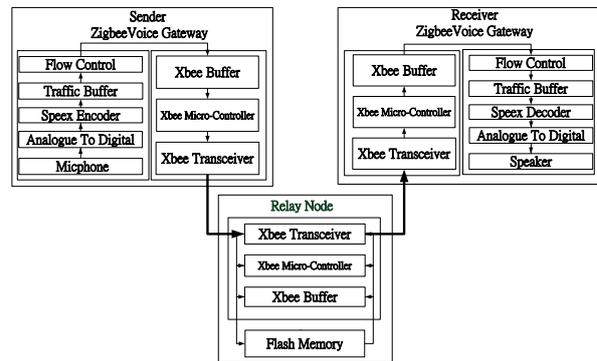


圖 5、多跳語音傳輸系統架構圖

3.4 動態式調變語音編碼率機制

本論文於語音品質為考量，除傳輸系統內部架構外，另外考慮了傳送端與中繼節點距離之間的影響進行探討，由[13]研究所示，當傳輸距離的延長使訊號品質下降，封包遺失率因此大幅增加，由此依據本論文設計利用訊號品質為指標，動態式的調變語音編碼率，使語音資料能於相同封包遺失率的情境下傳送更多語音 Frame 以穩定語音品質。

由於訊號強度等相關研究已應用於多項議題，[18]多位學者利用 Zigbee 證明無線訊號強度在一定的範圍空間內，將會與空間距離呈現衰減的關係，無線訊號強度的量化值 RSSI Value，通常以量化後的 8 位元組的整數型態呈現。由於 RSSI 是用於區分訊號強度高低，再結合 Link Quality Indicator(LQI)並可較準確的量化連線品質的依據，LQI 有著更高的解析度可調整的動態範圍比 RSSI 更為廣泛，因此可以提供更明確的連線狀態。然而基於 RSSI 訊號強度以及檢測到的訊號雜訊比(Signal to Noise Ratio, SNR)，可結合 RSSI 與 LQI 將可即時感測出更細微的品質變化。

因此本文採用之 RSSI 與 LQI 的訊號強度

指標，做為訊號強度的分析控制判斷依據，其系統運作原理如圖 6 所示，由傳送端偵測離自己距離最近的固定中繼節點之無線訊號強度，使傳送端在進行通話前可得知 Zigbee 訊號強度收訊情況，並可以動態式的進行 Speex 語音品質轉換。

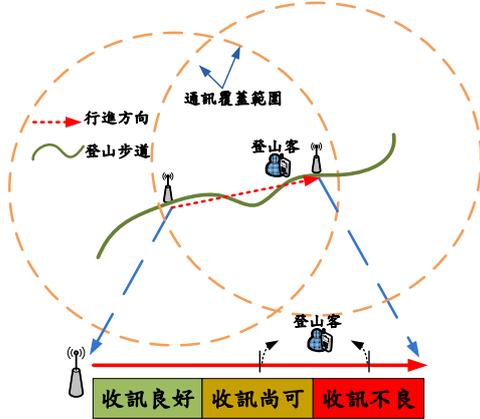


圖 6、訊號強度示意圖

由於 Xbee 於封包定義已針對 RSSI 值設計一欄位進行夾帶，透過此一欄位即可得知兩者之間相對距離與訊號品質，因此圖 7 為本動態調變語音編碼率之流程圖，當發送端欲進行通話時會先發送一廣播訊息，詢問附近的固定中繼節點是否可以進行繞送，並由固定中繼節點回傳允許訊息，如回應則持續發送廣播訊息至得到允許回應，當接收到中繼節點的允許會應時，即可透過 Xbee 欄位中的 RSSI 值進行運算，取得 LQI 值，LQI 數據值範圍是 0-255，分別代表不同等級的訊號品質，從中可以區分成圖 6 所示之三種訊號品質，並選擇不同的語音編碼率進行傳送。

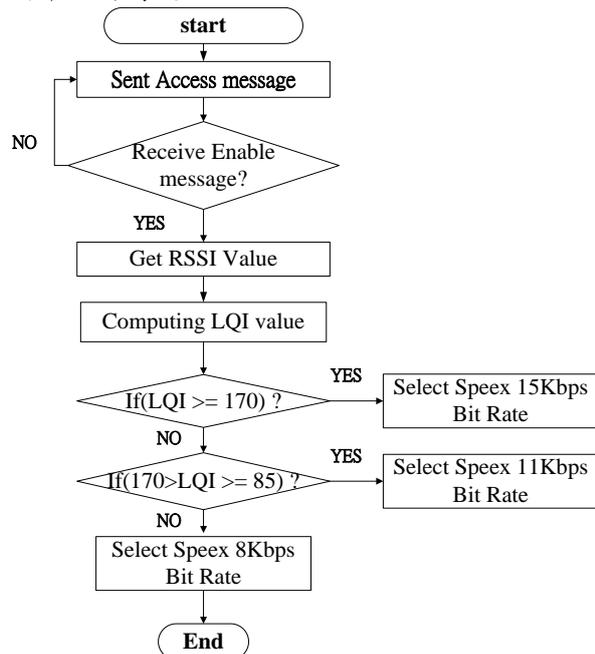


圖 7、動態調變語音編碼率流程圖

4. 實驗結果與分析

本節將針對多跳語音傳輸架構與動態式調變語音編碼率機制進行實際品質量測。首先測量 Zigbee 長距離多跳傳輸效能與連線品質，再加入本論文所提方法進行測量其語音品質穩定之功效，最後再針對各實驗數據進行分析。於 4.1 為測量架構與參數設定，4.2 Xbee 網路效能分析，4.3 語音品質分析。

4.1 測量架構與參數設定

本論文所提之 Zigbee 多跳語音傳輸系統所應用之救難情境皆如圖 6 所示。登山客於登山步道可透過沿路所佈建之環境監控 Zigbee 無線感測器進行緊急通話功能，並透過多跳傳輸功能延長發話距離與擴大通訊範圍，已達成救難功能。

由於預設情境山區並無其他 2.4GHz 訊號干擾源，因此本實測地點亦選至相同無其他 2.4GHz 之空曠地進行實地量測，以避免實驗受到訊號衰減等影響，如圖 8 所示。

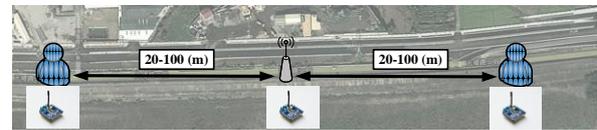


圖 8、量測環境示意圖

本論文針對多點傳輸系統與動態調編語音編碼率等方法對硬體元件 Xbee 與 Speex 進行最佳化測試，參數設定如表 2 所示。

表 2、實驗參數設定

Xbee 參數	數值
Traffic loads	250kbps
Serial Interface Data Rate	57600
topologies	Point-to-multipoint
Network mode	Beaconless
Data packet Size	84、88、80 (byte)
Transmit Power	1mW(0 dbm)
Speex 參數	數值
Mode	Narrowband
BitRate	8、11、15 (kb/s)
Quality	4、6、8

4.2 網路效能分析

本節將針對不同 Received Signal Strength Indicator (RSSI)及 Link Quality Indicator(LQI) 兩項數據進行不同距離的環境配置並進行相

關效能測量，首先將以 Speex 窄頻 8 kbps 壓縮語音進行量測，實驗語音資料經由多跳傳送之延遲時間及封包遺失率分別進行分析。

本實驗之多點傳輸節點配置為量測準確性，節點與節點之間以相同距離進行配置，分別以 50 公尺、80 公尺、110 公尺進行分配，如表 3 所示為各節點距離與所測得 RSSI 與 LQI 數值。

表 3、節點配置

節點間距(公尺)	中繼節點 (RSSI/LQI)	接收節點 (RSSI/LQI)
50 公尺	-38 dBm / 119	-39 dBm / 116
80 公尺	-50 dBm / 86	-51 dBm / 83
110 公尺	-56 dBm / 68	-58 dBm / 63

首先實驗由傳送端將原始音檔進行編碼，其 Speex 編碼處理並以固定傳送時間間隔 (Packet inter-arrival time) 進行語音傳送，觀察中繼節點與接收節點結果如圖 9、10 所示，由圖 9 可以發現中繼節點與傳送節點距離約 50 公尺 LQI 值為 119 時平均延遲時間約 6 毫秒，但當距離移至 80 公尺 LQI 值則下降至 86，延遲時間也大幅上升至 35 毫秒，而當 LQI 值僅剩 68 時平均延遲時間則為 58 毫秒。

另外觀察圖 10 傳送節點經由中繼節點至接收節點之間的平均時間，由於中繼節點需多耗費 5 毫秒進行轉送，因此語音封包經由傳送節點經由中繼節點至接收節點間距分別為 50 公尺，其延遲時間約 11 毫秒，但距離 220 公尺時平均時間則已達到了 120 毫秒。

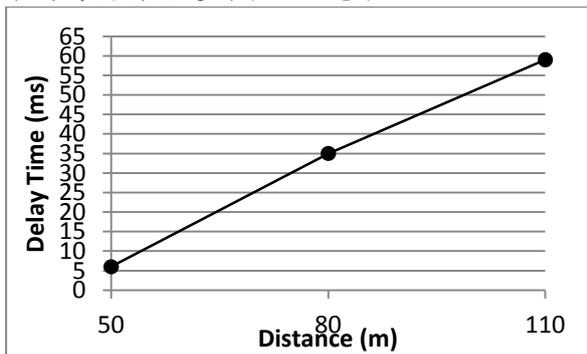


圖 9、傳送節點至中繼節點傳輸延遲

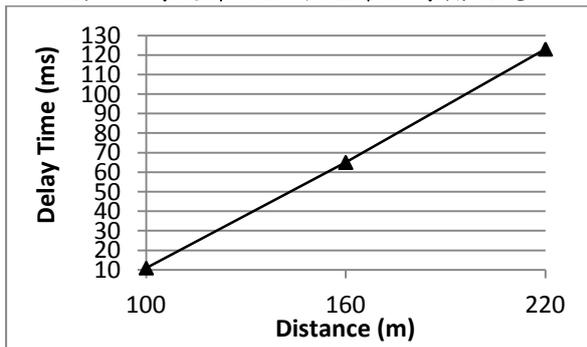
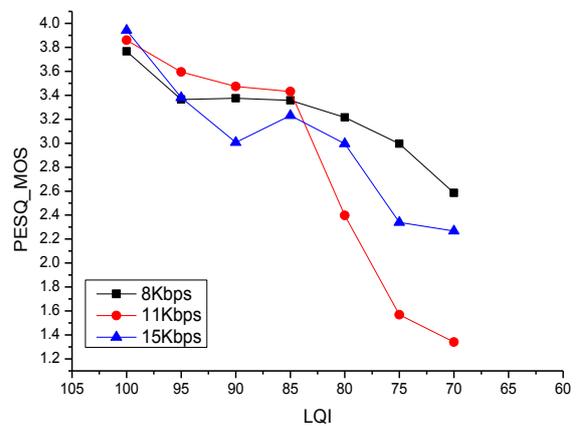


圖 10、語音品質量測圖

圖 9、傳送節點至接收節點傳輸延遲

4.3 語音品質分析

本論文針對不同 RSSI 進行多次數量測量如圖 10 所示，由於在室外通訊距離拉長即影響訊號品質的高低，因而可能造成語音品質下降，因此我們透過不同距離量測得知各距離不同的 LQI 值並對各接收音檔進行 PESQ_MOS 語音品質量測，由圖可知當 LQI 值約 100 以上時 15Kbps 值是大於 11Kbps 與 8Kbps，然而當 LQI 至 85 後 15Kbps 及 11Kbps 語音品質則劇烈下滑，因此若能動態式的偵測到 LQI 值為 85 以下時，立即變換至編碼率 8Kbps 可以使語音品質維持相對穩定的效果。



5. 結論

本論文已針對 Zigbee 多點語音傳輸進行相關設計與實作，由於無線網路傳輸過程並定遭受許多外在物理因素所干擾，而造成封包遺失產生，因此我們針對此一現象設計以 Speex 不同編碼率重新定一封包夾帶格式，使 Zigbee 有限的 Payload 中夾帶符合的語音 frame，此做法可以有效的避免封包遺失造成接收解碼錯誤產生，另外經由多點傳輸之效能分析實驗可知，在 Zigbee 訊號可容忍的範圍內建立節點即可使語音順利達成傳輸目的。另外針對傳輸節點與中繼節點距離不同，動態式變換語音編碼率即可在訊號較差的情形下，仍可維持可容忍的語音品質。

未來研究與思考，需針對降低封包延遲時間進行相關分析，由於多點傳輸中繼節點平均需耗費 5 毫秒進行轉傳工作，如數量大幅上升

是必也會大幅提升封包延遲時間，另外如傳輸節點增加，勢必造成可使用頻寬下降，此現象則必須考慮其他解決方案，以維持更低頻寬的語音傳輸機制。

6. 致謝

本計劃之執行承蒙國科會計畫(編號：NSC 101-2221-E-142-003、NSC100-2221-E-142-008)，及教育部網路通訊人才培育先導型計畫-102年度重點領域學程推廣計畫(發文字號：第 1020035480A 號)之支持，特此致謝。

參考文獻

- [1] E. Touloupis, Apostolos Meliones, S. Apostolacos "Speech Codecs for High-Quality Voice over ZigBee Applications: Evaluation and Implementation Challenges" IEEE Communications Magazine, April 2012
- [2] Zigbee Alliance: Zigbee Specification. Zigbee Alliance. 053474r17 edn. (January 17 2008).
- [3] IEEE 802.15.4 standard: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), October 2003.
- [4] Chao-Chieh Chen Lin-Huang Chang Tsung-Han Lee Shuo-Yao Chien, "Design and Implementation of Bluetooth and Zigbee Voice Gateway", presented at 2012 International Conference on Advanced Information Technologies and The Second National Conference on Web Intelligence and Applications(AIT / NCWIA 2012), Taichung, April, 27-28, 2012.
- [5] Xbee Data Sheet, <http://www.digi.com>
- [6] R. Mangharam, A. Rowe, R. Rajkumar, and R. Suzuki, "Voice over Sensor Networks," 27th IEEE International of Real-Time Systems Symposium, pp. 291-302, 2006.
- [7] H. Y. Song, and S. H. Cho, "Performances of IEEE 802.15.4 Unslotted CSMA-CA for Voice Communications," The 17th Asia-Pacific Conference on Communications, 2011.
- [8] H. Y. Song, H. C. Yoon, and S. H. Cho, "Implementation and analysis of IEEE 802.15.4 MAC for Voice Communications," The 4th Joint Workshop between HYU and BUPT, 2009.
- [9] D. Brunelli and L. Teodorani, "Improving audio streaming over multi-hop Zigbee networks," in Proc. IEEE ISCC 2008, pp. 31-36, Jul. 2008.
- [10] H. Y. Song, and S. H. Cho, "Performances of IEEE 802.15.4 Unslotted CSMA-CA for Voice Communications," The 17th Asia-Pacific Conference on Communications, 2011.
- [11] H. Y. Song, H. C. Yoon, and S. H. Cho, "Implementation and analysis of IEEE 802.15.4 MAC for Voice Communications," The 4th Joint Workshop between HYU and BUPT, 2009.
- [12] Speex: a free codec for free speech, <http://www.speex.org>
- [13] D. Brunelli, et al. "Analysis of audio streaming capability of zigbee networks," in Proc. EWSN 2008, pp. 189-204, Jul. 2008
- [14] W. Woon, T. Wan, "Performance evaluation of IEEE 802.15.4 wireless multi-hop networks: simulation and testbed approach," International Journal Ad Hoc and Ubiquitous Computing, vol. 3, no. 1, 2008.
- [15] A. Awad, T. Frunzke and F. Dressier, "Adaptive Distance Estimation and Localization in WSN using RSSI Measure," Proceedings of the 10th Euromicro Conference on Digital System Design Architectures, pp. 471-478, Aug. 2007.
- [16] L. Dimitrios, L. Quentin and S. Andreas, "An Empirical Characterization of Radio Signal Strength Variability in 3-D IEEE 802.15.4 Networks Using Monopole Antennas," European Workshop on Wireless Sensor Networks, pp. 326-341, 2006.
- [17] ST Microelectronics, application note AN2812, "Vocoder demonstration using a Speex audio codec on STM32F101xx and STM32F103xx microcontrollers," Oct 2008.
- [18] L. Dimitrios, L. Quentin and S. Andreas, "An Empirical Characterization of Radio Signal Strength Variability in 3-D IEEE 802.15.4 Networks Using Monopole Antennas," European Workshop on Wireless Sensor Networks, pp. 326-341, 2006.