

改善 LTE 系統上 M2M 無線通訊存取的動態倒退演算法

鄭明華¹, 張凱涵², 黃文祥^{3,*}

^{1,2,3} 國立高雄應用科技大學

¹ 慈惠醫護管理專科學校

1100404107@cc.kuas.edu.tw¹

1103304123@gm.kuas.edu.tw²

wshwang@cc.kuas.edu.tw^{3,*}

吳妍靚⁴, 林政翰⁵

⁴ 實踐大學高雄校區

⁵ 輔英科技大學

yanjing@mail.kh.usc.edu.tw⁴

ft065@fy.edu.tw⁵

摘要

隨著資訊科技的技術融入日常生活應用,消費者對於物聯網(Internet of Things, IoT)的功能需求也越來越高,並且同時激勵無線通訊網路技術的發展。使得高速、更穩定的長程演進計畫(Long Term Evolution, LTE)技術持續研發,締造無所不在的生活環境。然而在機器對機器(Machine to Machine, M2M)的傳輸環境中,各項消費者設備同時傳送大量訊息封包,將會造成封包碰撞而阻塞無線通訊網路。為了解決這樣的問題,本論文提出一個動態調整倒退機制,用於改善 LTE 系統中,隨機存取的系統效能。當 LTE 系統中的隨機存取程序發生傳輸成功或失敗時,競爭機制大多採取調整競爭視窗大小(Contention Window Size)進行回應,造成通道競爭狀態持續改變,使系統處於不穩定的狀態。而本論文所提出的動態調整倒退機制是當網路節點發生傳輸成功或失敗時,達到臨界值時才會發生改變。因此通道競爭狀態會因當時無線網路封包的負載,動態調整於適當的競爭視窗大小,並達到穩定系統與提升效能的目的。

關鍵詞: IoT、LTE、M2M、Contention Window

Abstract

With incorporating the application of daily life of science and technology, consumer's function demand for Internet of Things (IoT) is higher and higher, and further stimulate the development of wireless communication technology. Make at a high speed, more steady Long Term Evolution (LTE) Technology is researched and developed continuously, found the omnipresent living environment. But the devices of different consumers transmits a large number of information packages at the same time, will cause the package to collide and block the wireless communication network. In order to solve such a problem, this paper proposes a Dynamic Backoff Algorithm (DBA), is used for improving the

systematic efficiency of Contention channel in the wireless network. Channel competition state will at that time wireless network loading, adjust appropriate CW size (Contention Window Size) dynamically, achieve the stable system and improve the purpose of efficiency.

Keywords: IoT、LTE、M2M、Contention Window

一、前言

隨著行動無線網路技術發展成熟,人們在生活中對於行動通訊裝置的應用越來越廣泛,全球行動供應商協會(Global mobile Suppliers Association, GSA) [2]的報告顯示出全球使用長期演進技術升級版(Long Term Evolution-Advanced, LTE-A)的國家是逐漸地增加中,而用戶數量更是高達9億的人口,如此巨量的裝置、設備被連接到網際網路,透過大數據的分析提供了人類生活上的便利與智慧化的生活環境。因此電信網路從以人為本的語音通話、收發郵件、即時影音服務和雲端服務逐漸地開始兼容規模龐大的環境監測、物流追蹤、智慧建築與智慧電表等物聯網(Internet of Things, IoT)應用, 3GPP 第三代合作夥伴計劃(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)為了將物聯網的應用與傳統人對人(Human-to-Human, H2H)的通訊模式做區隔,定義機器類型的通訊(Machine Type Communications, MTC)[1]為一對一或一對多的設備互相交換資料的通訊型態,且最重要的區別在於無須經由人工的決策。

全球行動通訊網路報告[3]預估了未來5年內 Cellular IoT 類別的行動通訊裝置的將高達27%幅度複合年均增長率(Compound annual growth rate, CAGR)。在行動通訊標準的制訂上針對隨機存取的行為提供強化機制來因應這種新型態的接取模式[4]。本研究將針對 MTC 通訊裝置於 LTE-A 系統中面臨到的存取競爭議題,從 3GPP 建議的解決方案中實現壅塞控制的機制,並與 IEEE 802.11 中分散協調式功

能(Distributed Coordination Function, DCF)作比較。

(一) 機器類型通訊的發展簡述

物聯網的概念最早出現於 1999 年，國際普遍公認由美國 MIT Auto-ID Center 的 Kevin Ashton 教授在研究無線射頻識別技術(Radio Frequency Identification, RFID)時所提出一種全新資料交換模式，於物品或生物上加裝感測或辨識裝置透過網際網路連結，將電腦對電腦(PC to PC, P2P)的網路架構延伸至機器對機器的模式(Machine to Machine, M2M)，藉以實現智慧化的管理。LTE-A 的技術成熟使得人們充分地運用蜂巢式網路在都市建築公用事業計量錶、工廠機械設備、汽車交通設施、居家安全警報系統、醫療穿戴式裝置等 M2M 領域[5]，成功地將物聯網與現有的電信網路整合起來，實現人類社會與萬物聯網的理念。

(二) 研究動機與目的

隨著通訊晶片的製造成本降低，MTD 便能夠更普及的被運用在 M2M 的各式應用中，MTD 在新興的“物聯網”以及“智慧城市”中扮演重要的關鍵因素[6][7]，感測器的應用被預期在未來的社會、經濟製造、監控或量測等服務，例如：建築、工業自動化、遠端遙控、遠端醫療、老人照護、智慧電網、智慧電源管理、智慧農業、交通運輸管理以及其他領域。在過去幾年中，M2M 的技術成熟度已經被學術界和工業界認可，從大量的學術研究到制訂協定皆導向到支援 M2M 服務，值得一提的是針對低位元速率、短程傳輸的 IEEE 802.15.4 標準[8]，IPv6 低功率無線個人區域網路(6LoWPAN)針對低功耗的設備制定的協定[9]，在小型的無線感測網路中已 ZigBee 實現 MTDs 之間互相連結[10]，以及其他成熟的家庭自動化技術，例如：EIB / KNX、LON 及 BACnet[11]。另一個比較特別的是 3GPP 提出基於鄰近度的服務協定[12]，該協定的理念是在介入核心網路的條件下，利用終端裝置的物理距離遠近程度，實現用戶設備之間的直接通訊，或者限制訊號到本地區域的網路。

針對 MTC 裝置與一般的使用者裝置 UE 同在同一個 eNodeB 服務範圍內，當這些設備同時向 eNodeB 發出連線請求時將造成隨機存取程序的接取成功機率降低、提高 PRACH 的網路壅塞程度，對於裝置可能出現額外的延遲、封包遺失、無線資源的浪費、額外的能量消耗甚至是服務中斷…等[14]。因此許多學者們以現有的負載控制機制提出有效的解決方法，考量到不同應用 MTC 裝置的網路環境

[15]、[16]中的文獻是以 MTC 特殊後退機制作為控制方法設計的主軸，而[17]~[19]的研究方向主要以裝置群組化的概念，減少大量裝置同時對 eNodeB 提出連線的需求。

文獻[17]的研究中，探討了大量 MTC 連線至 3GPP 網路時該裝置需使用移動台國際用戶識別碼(Mobile Subscriber International ISDN number, MSISDN)像 MTC application server 進行註冊時 MSISDN 數量不足的問題，在大量裝置連線將相同類型的裝置加入群組，共同使用一個 MSISDN 向 Application server 進行註冊，並將沒有連線需求的裝置送入睡眠模式。在[18]中提到了裝置在隨機存取程序中失去同步時需要重新連線的方法，主要就是將 contention free 的 preamble 分配給需要重新連線的設備，並將其裝置的 preamble 訊息安排於特定的隨機存取時槽中，研究文獻[19]主要是在大量的裝置進行連線前，eNodeB 依據欲連線的裝置所攜帶的延遲時間、封包抵達率…等參數來進行大量裝置分群的動作，在同一群的裝置則依據該群的網路服務品質(Quality of Service, QoS)參數來安排不同的資料傳輸週期。

在傳統的隨機存取程序中，當裝置競爭失敗後依照隨機接取回應(Random Access Response, RAR)指示的退回指標，從標準退回參數表找出 RAR 指標選擇的 Backoff value 進入退回程序，然而 LTE-A 的隨機存取程序沒有設計彈性的退回區間，無法減輕裝置接取失敗時的碰撞率，造成了大量 MTDs 連線失敗後，實體上行共享通道(Physical Uplink Shared Channel, PUSCH)無連線成功的裝置可傳送資料導致 PUSCH 利用率不佳以及重複在接取程序競爭失敗造成 MTD 的高接取延遲時間、高 preamble 碰撞次數…等問題。因此本論文為了解決 MTC 為 LTE-A 系統中無線接取網路(Radio Access Network, RAN)所帶來的壅塞，提出改善的方法。

二、背景知識與相關研究

機器類型中的通訊方式主要是由大量的 MTD 相互連接而成的，亦能混合其他類型的 MTC 感測裝置結合，其應用的領域非常的廣泛。例如在 M2M 在感測數據應用上的資料封包傳輸量遠遠小於 H2H 的多媒體影音特性、傳輸頻率為週期性的回報。基於以上種種網路特性的不同，原本在 LTE 中所使用的協定較不適合直接使用於 M2M 的網路，在本章節將說明 MTC 在 LTE-A 系統中的運作模型，接下來針對 MTC 的特徵以及應用作介紹，依據 MTC 的成長在瞬時的大量連線情形下可能對

於 LTE-A 系統中的隨機存取程序產生嚴重的壅塞現象，本論文為了解決 MTC 為 LTE-A 系統中無線接取網路(Radio Access Network, RAN)所帶來的壅塞，將詳細說明 3GPP 會議中提出的數種解決方法並且回顧 IEEE 802.11 DCF 在解決通道競爭的相關研究文獻。

(一) 背景知識

3GPP 為因應 M2M 的服務在標準中[20]提出了基於 LTE-A 網路的 MTC 系統架構，依照此系統架構，3GPP 提出三種 MTC 應用服務連線模式，分別為間接連線模式(Indirect Mode)、直接連線模式(Direct Mode)及混合模式(Hybrid Mode)。如圖 1 所示 MTC 裝置透過 LTE-Uu 介面連結到 RAN。



圖 1. M2M 應用與蜂巢式網路連結

MTC 應用，可能會對通訊網路造成系統部分的壅塞情形，因此 3GPP 使用較常發生於 MTC 的瞬時巨量連線行為對 LTE-A 系統的 Radio Network Congestion、Core Network Congestion、Signalling Network Congestion 等三種壅塞現象[1]，詳細圖例說明如圖 2。

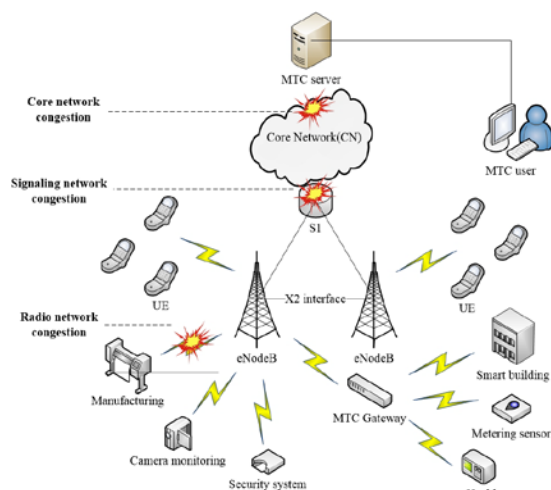


圖 2. LTE-A 中的壅塞情形

(二) 相關研究

機器類型通訊裝置的特性上可以得知，在

一個 LTE-A 系統需要具有同時應付大量的 MTC 裝置進行少量的資料傳輸量的無線存取技術，否則將在隨機存取程序中產生嚴重的通道競爭、過長的存取時間延遲、重複發送接取請求...等問題，導致 PRACH 面臨過載的狀況，大幅降低整體網路的效能。因此 3GPP 將 H2H 與 M2M 面臨通道競爭於 LTE-A 系統中關鍵的研究議題。參照文獻[27]主要討論 MTC 裝置於 LTE 的無線接取網路(Radio Access Network, RAN)造成的壅塞議題，並提出 6 種隨機存取負載控制方法，分別為 Access Class Barring scheme、Separate RACH resources for MTC scheme、Dynamic allocation of RACH resources scheme、MTC Specific Backoff scheme、Slotted Access scheme 及 Pull Based scheme。本論文是針對 MTC Specific Backoff scheme 提出改善的方法。在文獻[21-27]中詳細討論，除了探討 3GPP 會議中提出的解決方法外，並整理數篇 IEEE 802.11 DCF 通道競爭的研究[28-30]，歸類出 RAN 負載控制方法特性。

IEEE 802.11 DCF 機制是透過 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)去做無線網路的存取，無線節點在傳送前要先探測目前無線通道的狀況，如果偵測到無線通道為閒置(Idle)時，就可以開始傳送資料；如果偵測到無線通道為忙碌(Busy)時，無線節點就會從競爭視窗大小(Contention Window Size)隨機選出一個等待時間，然後繼續偵測無線通道的狀態，直到為閒置時，就會開始遞減等待時間，一旦等待時間遞減到零時，就可以開始傳送資料，倘若同時有兩個以上的無線節點選到相同的等待時間，且同時於無線通道上傳送資料，就會發生碰撞(collision)。在 DCF 機制中會利用二進制指數(Binary Exponential Backoff, BEB)倒退演算法來降低碰撞的機率。BEB 倒退演算法在發生碰撞時會把競爭視窗變成 2 倍，每碰撞一次便成長一次，直到達到最大值(Maximum Contention Window, CW_{max})；而一旦傳送成功競爭視窗大小會直接設為最小值(Minimum Contention Window, CW_{min})。BEB 倒退演算法的缺點是當無線節點數量逐漸增加時，一旦封包成功傳送，競爭視窗大小又會回到最小值，會使得碰撞機率提升，結果造成網路的傳輸效能下降。

針對 BEB 提出改善的方法有 EIED(Exponential Increase Exponential Decrease)及 LILD(Linear Increase Linear Decrease)較為顯著。EIED 演算法如同 BEB 倒退演算法，傳輸資料時每發生一次碰撞，就會把競爭視窗大小多出一倍；不同於 BEB 倒退演算法

的部分是，當傳輸成功時不會把競爭視窗直接變成最小值(CW_{min})，而是將競爭視窗大小減為一半，避免像 BEB 倒退演算法競爭視窗大小降低的幅度太大讓碰撞率過高，使傳輸效率進一步的提升；但以指數的方式增加或減少競爭視窗大小，變動幅度還是相當的大 EIED 演算法如同 BEB 演算法，初始競爭視窗大小會等於最小值($CW_{min} = 32$)，且傳輸資料時每發生一次碰撞，就會把競爭視窗大小變成 2 倍，直到達到最大值($CW_{max} = 1024$)；為了改善 BEB 碰撞率增加的問題，當傳輸成功時不會把競爭視窗直接設成最小值(CW_{min})，而是將競爭視窗大小縮減為一半，避免像 BEB 倒退演算法競爭視窗大小降低的幅度太大讓碰撞率過高，使傳輸效率進一步的提升；但以指數的方式增加或減少競爭視窗大小，變動幅度還是相當的大。

LILD 演算法初始競爭視窗大小也等於最小值($CW_{min} = 32$)；不同於 EIED 的地方是，LILD 是用線性的方式去增加或減少競爭視窗的大小，每發生一次碰撞時會將競爭視窗大小增加 CW_{min} ，直到達到最大值($CW_{max} = 1024$)，而每一次傳送成功則減少 CW_{min} ，直到等於最小值($CW_{min} = 32$)，相較於 BEB 倒退演算法與 EIED 演算法，競爭視窗大小變動較為緩慢，會比較適合穩定的網路環境。

三、動態退回演算法

依照 LTE-A 現行的隨機存取程序中，當裝置競爭失敗後依照隨機接取回應指示的退回指標，從標準退回參數表找出 RAR 指標選擇的 Backoff value 進入退回程序，然而在媒體存取控制層(Medium Access Control, MAC)的隨機存取程序僅設定極小且固定的退回區間，缺乏彈性的退回區間機制設計，無法有效疏通 RAN 嚴重壅塞的情境。在 3GPP 針對 RAN 壅塞控制的數種方法，其中 Access Class Barring 以類別的方式區隔裝置進入隨機存取程序優先權，能夠減少同時執行隨機存取程序的數量，但在接取機率的閾值 p 過小時，可能讓即時性的裝置延遲時間長，MTC Specific Backoff 僅針對 MTC 裝置提供較長的退回區間，無法依據網路壅塞程度提供有效的疏通機制，IEEE 802.11 DCF、EIED 以及 LILD 等機制在設計上無法面對極度壅塞時裝置需要更加彈性退回區間。因此本論文提出動態退回演算法，依照隨機存取程序的連線請求碰撞程度來區分網路壅塞的程度，針對壅塞程度設計出彈性的退回區間，並且改良 3GPP 所定義的退回參數對照表[31]，設計三段式動態退回區間以有效分散瞬時巨量的 MTC 連線請求，減少 Preamble 的碰撞次數，縮短裝置因碰撞造成的

嚴重接取延遲。

本論文所設計之 Dynamic Backoff Algorithm (DBA)依據 IEEE 802.11 的分散式協調功能所延伸的研究來進行改良，在 LTE-A 中的 RAN 所發生的嚴重壅塞問題主要是因為在有限的 PRACH 中無法容納大量裝置瞬時的連線請求，且在 3GPP 標準中隨存取程序所給予固定且極小的退回區間，可能造成失敗一次的裝置完成極短的退回時間後，立即在下一個 PRACH 資源區塊上與其他裝置發生第二次的 Preamble 碰撞，因此在機制的設計上必須考量裝置碰撞的程度給予三種不同成長方式的退回區間。DBA 演算法以兩個臨界值來判別壅塞程度，在第一種模式 Light mode 中考量到裝置可能需要在失敗後快速的重新傳送 Preamble 訊息，因此在競爭窗口的成長上以 2 微秒的時間大小為基底呈現指數的放大與縮小，在首次發生碰撞時裝置將從 $[0, 2]$ 區間中隨機取出一個數值作為退回的時間，一旦再次碰撞競爭的窗口就會變為原本的兩倍大 $[0, 4]$ 直到 CW_{max} (臨界值為 10 次碰撞)，若傳送成功則將窗口縮小為原本的一半直到 CW_{min} ，Light mode 詳細概念如圖 3 所示。

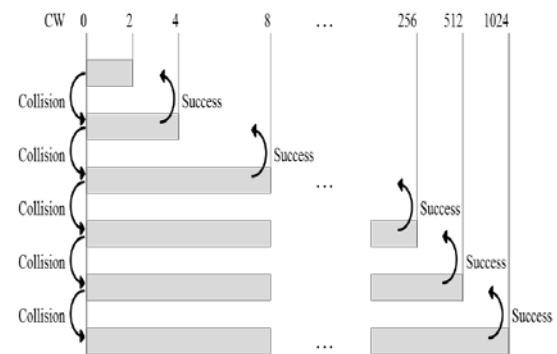


圖 3. DBA Light mode 概念圖

DBA 演算法在第二種模式 Medium mode 中考量到系統已經到達一定程度的壅塞情形(臨界值高於 10 且小於 21 次碰撞)，必須增加窗口的大小來分散需要退回的裝置，因此在競爭窗口的成長上以 $CW_{min} = 32$ 微秒的時間大小為基底進行倍數運算，將碰撞次數乘上 CW_{min} 作為退回的時間，在首次發生碰撞時裝置將從 $[0, 352]$ 區間中隨機取出一個數值作為退回的時間，一旦再次碰撞競爭的窗口就會增加 CW_{min} 以線性的方式成長 $[0, 384]$ 直到 CW_{max} ，若傳送成功則將窗口減少 CW_{min} ，避免在中度壅塞的情形下大幅度的變動競爭窗口，詳細概念如圖 4 所示。

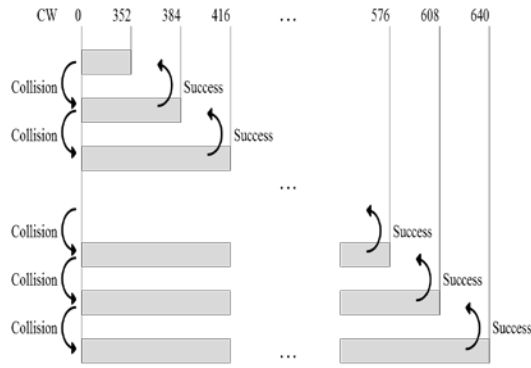


圖 4. DBA Medium mode 概念圖

DBA 演算法在第三種模式 Medium mode 中考量到系統已經到達重度的壅塞情形(臨界值高於 20 次碰撞), 必須增加更大的窗口來分散需要退回的裝置, 因此在競爭窗口的成長上以 3GPP 退回參數表中最大的退回時間 960 微秒為基底, 在首次發生碰撞時裝置將從 $[0, 960]$ 區間中隨機取出一個數值作為退回的時間, 一旦再次碰撞競爭的窗口就會以 960 加上 $CW_{min} = 32$ 微秒的時間, 以線性的方式成長 $[0, 992]$, 若傳送成功則將窗口減少 CW_{min} , 避免在重度壅塞的情形下競爭窗口無法繼續成長, 詳細概念如圖 5 所示。

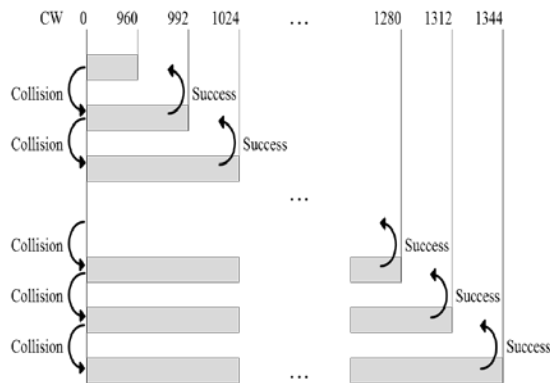


圖 5. DBA Heavy mode 概念圖

本研究提出之機制設計於 eNodeB 與 MTC 裝置之間的媒體存取控制層, 倘若 MTC 裝置在傳送 Preamble 後沒有收到 eNodeB 回應, 則會提高傳輸功率再次傳送 Preamble 直到 Preamble 的最大傳送次數, 在程序中一旦發生碰撞就會進行碰撞計數器的累加, 在裝置重新傳送 Preamble 之前必須先經過一段退回的時間, 退回的時間由碰撞次數來比較界定網路壅塞程度的臨界值 X 與 Y, 透過臨界值的區隔劃分出三種不同的退回區間, 裝置在經過退回時間的到數後即重新發送 Preamble。如圖 6 所示。

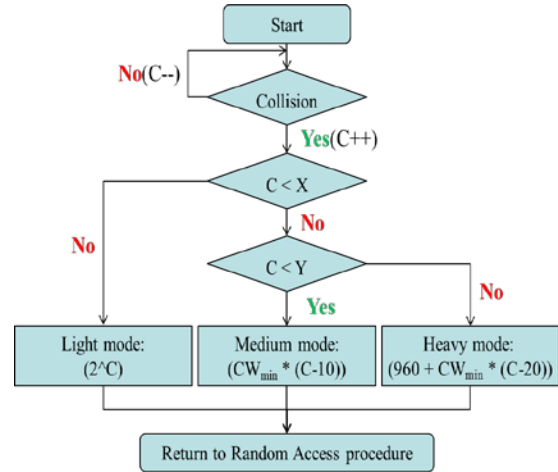


圖 6. DBA 演算法流程圖

四、模擬實驗與效能分析

為了驗證本論文提出的 DBA 機制確實能夠分散裝置於 LTE-A 系統中 RAN 的的通道競爭以提升整體網路效能, 我們將使用 Network Simulator 3 (NS3) 模擬器來模擬 LTE-A 系統中加入本研究所提之機制於標準的隨機存取過程中, 由於標準的隨機存取程序中沒有設計相關的過載控制機制, 因此我們參考了 PRACH 的模組[32]針對智慧城市中面臨到巨量存取的情境。如圖 7 所示。

NS3 除了提供 LTE 相關的協定外, 在實體層通道使用方式、媒體存取控制層的協定、無線資源架構、傳輸調變方式、收發功率設定、混合式建築模型和通道干擾衰減模型等無線環境的因素加入模擬情境, 使得模擬結果更加真實。

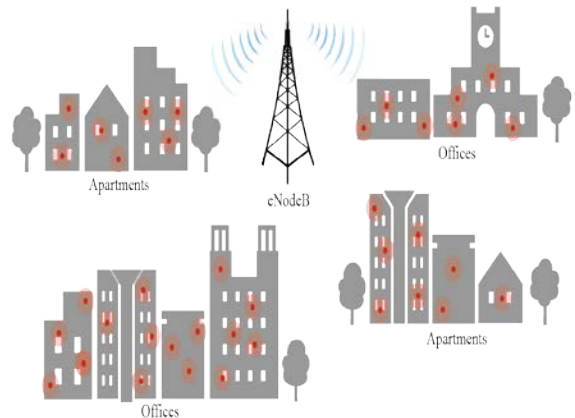


圖 7. 模擬環境

(一) Average Access Delay

透過圖 8 觀察出標準(Standard, STD)在 400 個裝置同時發送連線時平均需要花費

24.68 秒才能夠接取至網路，EIED 與 LILD 隨著裝置增加的情境下接取延遲的成長幅度非常的大，因兩者在極度壅塞時競爭窗口無法繼續成長導致，DBA 擁有三段式的動態退回區間，在多數的情境下皆能享有較低的接取延遲。

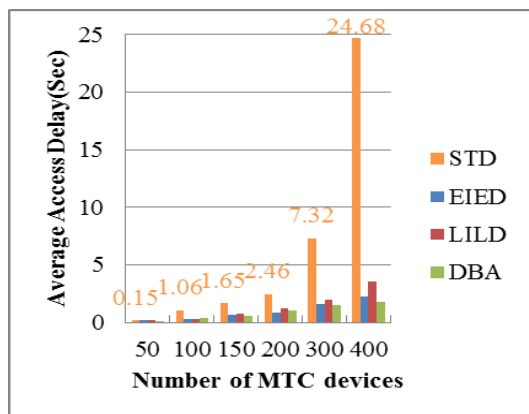


圖 8. Average Access Delay(含標準)

(二) Collision Rate

圖 9 觀察出 STD 因為沒有設計退回的時間，因此在各種情境下都擁有最高的碰撞率，EIED 與 LILD 的競爭窗口在低擁塞時成長幅度較 DBA 來的大，當模擬環境中的壅塞情形由重度壅塞轉向輕度時，部屬在模擬環境中位置較差(收訊不良或遭到建築物遮蔽)的裝置若選用 DBA 的演算法會因為 Light mode 的 CW_{min} 遠小於 EIED 與 LILD 的 CW_{min} ，導致裝置過度頻繁的重新傳送 Preamble。

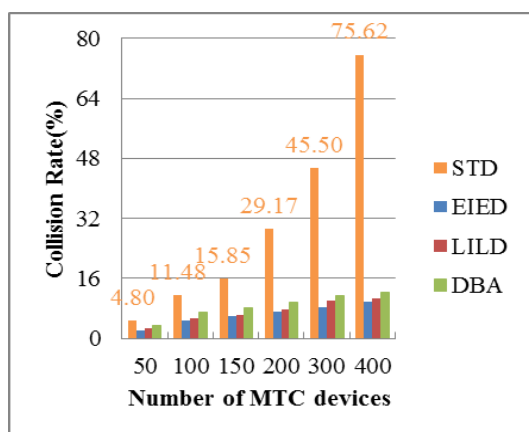


圖 9. Collision Rate(含標準)

(三) Preamble Success Counts

從圖 10 觀察出 STD 在裝置數量達到 400 時嚴重的壅塞使其得到極低的 Preamble 成功傳送次數，DBA 在各種網路壅塞的情形下所提供的動態退回區間，在裝置數 50~100 時增

加了 300 次的成功傳送次數，甚至在裝置數 300~400 時亦增加了 1000 次的成功傳送次數，證明 DBA 有效提升連線請求的傳送率。

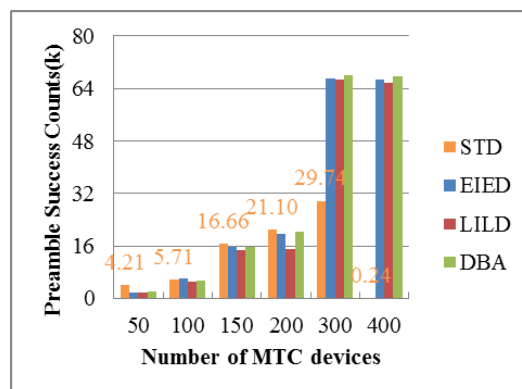


圖 10. Preamble Success Counts(含標準)

五、結論與未來工作

未來會有更多的物聯網應用裝置透過 LTE-A 系統連結至網路，基於 MTC 裝置的應用領域非常的廣泛，LTE-A 為了因應多樣的 MTC 特徵與資料傳輸特性，須強化部分在無線存取網路的接取技術，然而在傳統的架構下瞬時的 MTC 大量連線訊息在 LTE-A 系統中的隨機存取通道上產生嚴重的碰撞現象，因此相關的研究在特殊退回的壅塞控制解決方法上予以 MTC 類型的裝置較長的退回時間，或是限制裝置存取至網路的機率，可能造成低延遲容忍度的裝置資料過時、網路吞吐量下降等問題，本論文為了解決 MTC 於 LTE-A 系統中無線存取網路所帶來的壅塞，回顧了 3GPP 會議中提出的數種解決方法並且改良 IEEE 802.11 DCF 在解決通道競爭的相關研究文獻，依據網路的壅塞程度分配裝置退回的時間，針對輕微的壅塞環境予以指數成長的區間，當連線訊息發生更為嚴重的碰撞時，啟動第二階段線性增加的退回時間避免大幅度的調整競爭窗口，在重度壅塞的環境下將線性增加的退回時間加上一個較長的基準時間且不設限競爭窗口成長的臨界值。在模擬結果表現上相較於標準以及他研究提出的機制大幅減少接取延遲時間，增加了連線請求的成功傳送機率，針對連線成功的裝置平均也花費較少的傳送次數，對於講求省電、低功耗的 MTC 應用與電信網路結合上帶來更大的優勢。

六、致謝

本文感謝科技部計畫經費補助，計畫編號：MOST 104-2221-E-151-005。

参考文献

- [1] 3GPP, "Technical Specification Group Services and System Aspects; Service requirements for Machine-Type Communications (MTC)", 3GPP, Tech. Spec. 3G TS 22.368, V13.1.0, Nov. 2014.
- [2] GSA (www.gsacom.com)—Oct 2015 on network launches, Dec 2015 on subscriptions
- [3] Ericsson Mobility Report June. 2016,
https://www.ericsson.com/mobility-report/mobile-subscriptions#section_3
- [4] 3GPP, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Machine-Type and other Mobile Data Applications Communications Enhancements (Release 12)," 3GPP, Tech. Spec. 3G TS 23.887, V12.0.0, Nov. 2012.
- [5] Qualcomm Technologies Report Oct. 2014,
<https://www.qualcomm.com/documents/lte-mtc-optimizing-lte-advanced-machine-type-communications>
- [6] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista and M. Zorzi, "Internet of Things for Smart Cities," *IEEE Internet Things J.*, 1 (February (1)) (2014), pp. 22–32
- [7] L. Atzori, A. Iera and G. Morabito, "The internet of things: A survey," *Comput. Netw.*, 54 (October (15)) (2010), pp. 2787–2805
- [8] J. Zheng, M.J. Lee, "A comprehensive performance study of IEEE 802.15.4, in: *Sensor Network Operations*," IEEE Press Book, Wiley Interscience, 2006, pp. 218–237 (Chapter 4).
- [9] G. Montenegro, N. Kushalnagar, J. Hui and D. Culler, "Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks," *Technical Report IETF Request for Comments 4944*, September 2007.
- [10] P. Kinney, et al., "Zigbee technology: Wireless control that simply works," in: *Communications Design Conference*, October 2003.
- [11] H. Merz, J. Backer, V. Moser, T. Hansemann, L. Greefe, C. Hübner, "Building Automation: Communication Systems with EIB/KNX, LON and BACnet," Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, June 2009.
- [12] 3GPP, "Feasibility Study for Proximity Services (ProSe)," *Technical Report TR 22.803 V12.2.0*, June 2013.
- [13] A. Laya, L. Alonso and J. Alonso-Zarate, "Is the Random Access Channel of LTE and LTE-A Suitable for M2M Communications? A Survey of Alternatives," *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 16 (First Quarter(1)) (2014) 4–16.
- [14] M. Hasan, E. Hossain, and D. Niyato, "Random access for machine-to-machine communication in LTE-advanced networks: Issues and approaches," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 6, pp. 86–93, Jun. 2013.
- [15] X. Jian, Y. Jia, X. Zeng, and J. Yang, "A novel class-dependent back-off scheme for machine type communication in lte systems," in *Wireless and Optical Communication Conference (WOCC)*, 2013 22nd, May 2013, pp. 135–140.
- [16] Wei Jiang, Xian Wang and Tao Deng, "Performance analysis of a pre-backoff based random access scheme for machine-type communications," in *Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*, 2014 International Conference, April 2014, pp. 23–25.
- [17] C.-W. Tseng, H. Chen, and P. Lin, "Grouping ID based device trigger mechanism for 3GPP MTC communications," in *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2014 International, Aug 2014, pp. 756–760.
- [18] O. Arouk, A. Ksentini, Y. Hadjadj-Aoul, and T. Taleb, "On improving the group paging method for machine-type-communications," in *Communications (ICC)*, 2014 IEEE International Conference on, June 2014, pp. 484–489.
- [19] S.-Y. Lien, K.-C. Chen, and Y. Lin, "Toward ubiquitous massive accesses in 3GPP machine-to-machine communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 4, pp. 66–74, April 2011.
- [20] 3GPP, "Architecture enhancements to facilitate communications with packet data networks and applications", 3GPP, Tech. Spec. 3G TS 22.682, V14.0.0, Jun. 2016.
- [21] CATT, "R2-100182: Access Control of MTC Devices," 3GPP TSG RAN WG2 Meeting 68bis, Jan. 2010.
- [22] 3GPP R2-112071, "Evaluation on push based RAN overload control schemes," Huawei and HiSilicon, RAN2#73bis, April 2011.
- [23] K.-D. Lee, S. Kim, and B. Yi, "Throughput Comparison of Random Access Methods for M2M Service over LTE Networks", in 2011 GLOBECOM Workshops (GC Wkshps),

Dec., pp. 373 – 377.

- [24] S. Choi et al. “Automatic Configuration of Random Access Channel Parameters in LTE Systems,” Proc. 2011 IFIP Wireless Days, Oct. 2011, pp. 1–6.
- [25] Ray-Guang Cheng, Firas Al-Tae, Jenhui Chen, and Chia-Hung Wei, “A dynamic resource allocation scheme for group paging in LTE-Advanced networks,” IEEE Internet of Things Journal, DOI: JIOT2435655, 2015.
- [26] A. Lo, Y. W. Law, and M. Jacobsson, “Enhanced LTE Advanced Random-Access Mechanism for Massive Machine-to-Machine (M2M) Communications,” Proc. 27th Meeting of Wireless World Research Forum, Oct. 2011.
- [27] 3GPP TR 37.868 V11.2.0 (2011-09): Study on RAN Improvements for Machine- type Communications. Sep. 2011.
- [28] IEEE standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Standard 802.11, June 1999.
- [29] N.Song, B. Kwak, J.Song, and L.E. Miller, “Enhancement of IEEE 802.11 distributed coordination function with exponential increase exponential decrease backoff algorithm,” The 57th IEEE Semiannual Spring VTC, vol.4, April 2003.
- [30] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, and L. Zhang, “MACAW: A Media Access Control Protocol for Wireless LANs,” in Proc. SIGCOMM '94 Conf. ACM, pp. 212-225, 1994.
- [31] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification”, 3GPP, Tech. Spec. 3G TS 36.321, V13.2.0, Jul. 2016.
- [32] Michele Polese, Marco Centenaro, Andrea Zanella, and Michele Zorzi, “M2M Massive Access in LTE: RACH Performance Evaluation in a Smart City Scenario,” IEEE ICC 2016 conference, May 23 - 27, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia.