

感知車載網路之機會合作式媒介存取控制協定

An Opportunistic Cooperative MAC Protocol for Cognitive Vehicular Networks

周孜燦 (Zi-Tsan Chou) 蔡昀助 (Yun-Jhu Cai)

國立中山大學電機工程學系

E-mail: ztchou@mail.ee.nsysu.edu.tw

摘要

在感知無線網路裡頭，使用者可以在不損害執照使用者 (primary user) 的效能之下，可機會式地透過 licensed band 來傳送或接收資料。本論文考慮一種運作在感知無線電環境下的車載網路 (cognitive vehicular network) 的應用問題：在受限於處在不同地理位置的車輛有不同的可供傳輸或接收頻帶條件下，正確收到 gateway 資料的車輛該如何選擇適當的通道同時轉播資料給鄰近未正確收到資料的車輛，以避免發生 co-channel interference。我們稱此一問題為 interference-free multi-channel poly-matching (簡寫成 IMP) problem。此一問題的目標是使讓最多未正確收到資料的車輛也能獲得 gateway 的資訊。本論文的主要貢獻有三：(1) 我們首先將此一 IMP 問題建模為整數數學規劃的問題，具體描述我們想解決的問題與目標。(2) 我們提出集中式貪婪演算法有效率地解決此一問題。(3) 我們將此集中式貪婪演算法轉換為一個新的分散式媒介存取控制協定，稱之 opportunistic cooperative MAC (簡稱 OC-MAC)，使得每一個正確收到資料的車輛只需和鄰近的車輛交換訊息，便足以解決 IMP 問題，並使得未正確收到資料的車輛也能獲得 gateway 的資訊。模擬實驗結果顯示，OC-MAC 的效能和集中式貪婪演算法差不多，並且大幅勝過 Random MAC。

關鍵詞：媒介存取控制、車載網路、感知無線網路、機會式頻譜存取、合作式通訊。

Abstract

In this paper, we can consider an application scenario in cognitive vehicular networks: Under the condition that different vehicles in different locations may have different set of available licensed channels, how do the vehicles (called potential relays) that correctly received data from the gateway choose the proper channel to concurrently relay the data to the vehicles (called potential destinations) that did not receive data from the gateway such that the network throughput can be maximized. We call this problem the interference-free multi-channel poly-matching (IMP) problem. To the best of our knowledge, this

paper is the first one that seriously addresses and studies this issue. The contributions of this paper are three-fold: (i) We use the integer mathematical programming to formally model the IMP problem. (2) We design a simple centralized greedy algorithm to efficiently solve this problem. (3) On the basis of our centralized greedy algorithm, we design a novel distributed medium access control protocol, named opportunistic cooperative MAC (OC-MAC for short), such that only via local information exchange between vehicles, the number of potential destinations that finally receive data from potential relays can be maximized. Simulation results demonstrated that the throughput of OC-MAC is approximately equal to that of centralized greedy algorithm and is greatly higher than that of Random MAC.

Keywords: cognitive radio network, medium access control, and vehicular network.

1. 序論

車載網路是由配備車上裝置 (onboard unit, 簡寫成 OBU) 的車輛間或與架設在道路旁的路側裝置 (roadside unit, 簡寫成 RSU, 或者稱為 gateway) 彼此透過無線電波通訊所構成的行動網路。另一方面，美國聯邦通信委員會報告[1]指出，目前有許多有執照的頻道 (licensed channels) 在大部分的時間是處在無人使用的狀態。因此近年來發展的感知無線 (cognitive radio, 簡寫成 CR) 技術[1]提供了一種有效提升頻譜使用率的機制。更具體的來說，在感知無線網路中存在兩種使用者：有執照的使用者 (primary user) 與沒有執照的使用者 (secondary user) [1]。沒有執照的使用者可利用感知無線電技術去偵測 (sensing) 在目前眾多的有執照使用者頻道中，是否有閒置的頻道可供使用；一旦 secondary user 發現有閒置的 licensed channel 時，便可投機地使用這個頻道去傳輸資料[1]。

如圖 1，我們考量車輛行駛在高速公路的環境，而 gateway 則是在道路旁並週期性的廣播資料 (如廣告或與地理位置相關的訊息) 給鄰近的車輛。同時，道路附近存在數個 primary users。我們假設道路上總共有 M 台車輛，其中能正確收到 gateway 資料的車輛有 N 台，而未正確收到資料的車輛有 R 台。我們稱有正確收到 gateway 資料的車輛為可能

的轉播端 (potential relay)，分別表示為 V_1, V_2, \dots, V_N ，而未正確收到資料的車輛稱為可能的目的端 (potential destination)，分別表示為 W_1, W_2, \dots, W_R 。我們假設感知無線車載網路裡頭的 licensed channels 共有 C 個，分別為 Ch 1, Ch 2, ..., Ch C 。然而「可使用」的 licensed channels 個數會受到 primary users 的影響，因此我們亦假設若沒有可使用的 licensed channels 可使用時，車輛仍能透過免執照的頻道 (如 WiFi, 用 Ch 0 表示) 去轉送資料。

本論文考慮一種運作在感知無線電環境下的車載網路 (cognitive vehicular network) 應用情境：如圖 1 所示，在感知車載網路中，gateway 會定期的廣播資訊給鄰近的車輛。由於車輛受到訊號衰減、路旁障礙物的影響，使得即使車輛在 gateway 的廣播範圍內，也不見得能正確收到 gateway 廣播的資訊 (如圖 1 中的白色車輛)。當車輛離開 gateway 的廣播範圍後，為了讓沒正確收到資料的車輛也能夠獲得 gateway 的資訊，我們希望有正確收到資料的車輛 (如圖 1 中的黑色車輛) 能透過閒置的 licensed channels 去轉播 (relay) 封包給沒收到資料的車輛。

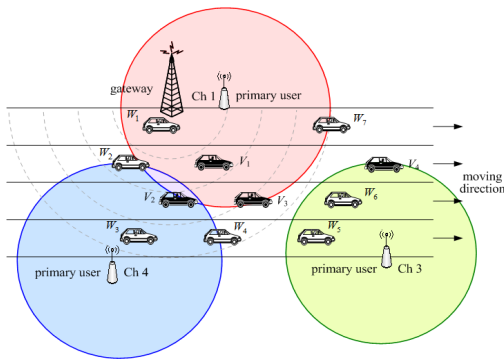


圖 1. 感知車載網路架構圖

然而，在感知車載網路裡頭，閒置的 licensed channels 會受到 primary users 的影響而使得處在不同地理位置的車輛有不同的可用頻帶 (the set of available licensed channels)。以圖 1 為例， V_2 是有正確收到 gateway 資料的車輛，其可供傳輸的頻帶為 Ch 0、Ch 3，而未正確收到 gateway 資料的車輛 W_5 僅能透過頻帶 Ch 0、Ch 1、Ch 4 來接收資料。因此本論文研究的問題是：假設每台車輛都只有單一收發器 (single transceiver)。在受限於處在不同地理位置的車輛有不同的可供傳輸或接收頻帶條件下，正確收到 gateway 資料的車輛該如何選擇適當的通道去轉播資料給鄰近未正確收到資料的車輛，以避免發生 co-channel interference。我們稱此問題為 interference-free multi-channel poly-matching (簡寫成 IMP) problem。此一問題的目標是使得正確收到資料車輛的轉播能發揮最大的空間再利用率 (spatial reusability)，讓最多未正確收到資料的

車輛也能獲得 gateway 的資訊。窮盡我們的知識所及，此一 IMP 問題尚未在其他文獻中被探討過。

為了解決 IMP 問題，本論文打算提出一個新的媒介存取控制 (medium access control, 簡稱 MAC) 協定。在 multi-channel 的環境中設計 MAC 協定，將不可避免地需面臨下列三個問題：

1) *Multi-channel hidden terminal problem* [2]: 參考圖 2，當 V_3 和 V_4 彼此不知對方都打算透 Ch 4 轉送資料給鄰近車輛時，最終 W_6 將收到碰撞的訊號。

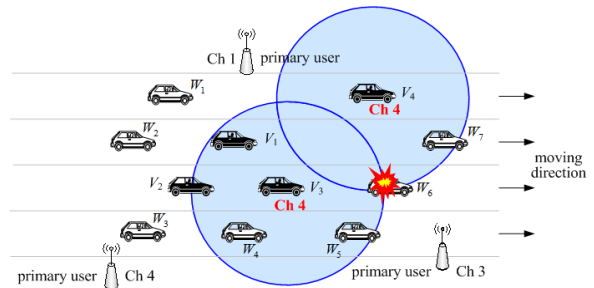


圖 2. Multi-channel hidden terminal problem

2) *Deafness problem* [2]: 如圖 3 所示，受到 primary user 的影響， V_3 打算透過 Ch 3 來轉送資料。另一方面， W_5 亦於受到 primary user 的影響，打算透過 Ch 2 來接收資料。此時 W_5 將無法接收來自 V_3 所傳送的資料。

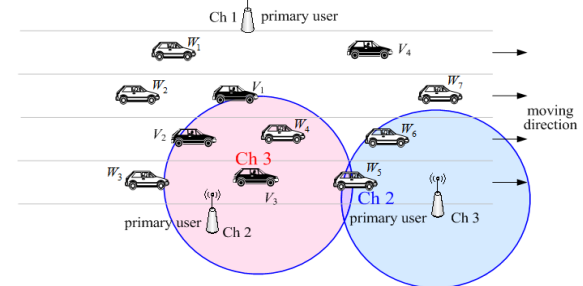


圖 3. Multi-channel hidden terminal problem

3) *Exposed terminal problem* [3]: 參考圖 4，當 V_1 使用 channel 2 傳資料給鄰近的車輛時， V_3 知道 V_1 正在傳送資料，所以 V_3 將不會使用 channel 2，以避免干擾 V_1 的傳輸。然而當 V_1 和 V_3 沒有共同鄰居時，其實是可以使用相同的 channel 來傳輸資料。

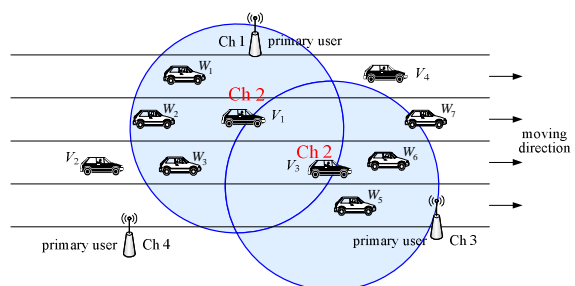


圖 4. Exposed terminal problem

本論文打算提出的 MAC 協定稱為 opportunistic cooperative MAC, 簡稱 OC-MAC。傳統上, 合作式通訊 (cooperative communication) 是指當來源端有資料要 unicast 給目的端時, 若來源端和目的端之間的通道品質很差, 那麼來源端可透過適當的轉播端 (relay) 將資料轉送給目的端[4]。文獻[5]進一步考慮當來源端有資料要廣播給眾多的目的端時, 若來源端和眾多目的端之間的通道品質有好有壞, 那麼該如何適當地選擇轉播端集合 (the set of relays) 來達成廣播。本論文則進一步將文獻[5]的情境擴充至多通道的環境。總的來說, 本論文的貢獻有三: (1) 我們首先使用 integer mathematical programming 的方式來建模感知車載網路的情境, 並提出集中式的貪婪演算法, 以解決 IMP 問題, 並最大化整個網路的系統容量 (system capacity)。 (2) 我們將集中式的貪婪演算法轉換成分散式的媒介存取控制協定, 使得每一個正確收到資料的車輛只需和鄰近的車輛交換訊息, 便足以解決 IMP 問題, 並最大化整個網路的 throughput。 (3) 透過模擬實驗, 我們證實 OC-MAC 有優異的效能表現。

本論文的其餘部分安排如下: 在第二章, 我們將 IMP 問題用嚴謹的數學來建模。第三章介紹集中式的貪婪演算法。第四章介紹分散式的 OC-MAC 協定。第五章為模擬實驗結果。第六章為總結。

2. 感知車載網路之數學規劃模型

參考圖 1, 我們的網路模型包含下列部分:

頻道品質 (Channel quality)

我們用矩陣 \mathbf{Q}_c 表示 potential destination W_r 在頻道 c 的情況下收到 potential relay V_n 資料的 SNR 值 $q_{n,r}^c$, 其中

$$\mathbf{Q}_c = [q_{n,r}^c | q_{n,r}^c \geq 0, 1 \leq n \leq N, 1 \leq r \leq R]_{N \times R}. \quad (1)$$

可能的鄰居集合 (Potential neighbor set)

對於 potential relay V_n , 我們用集合 $PD(V_n)$ 表示在其廣播範圍內的 potential destination W_r , 其中

$$PD(V_n) = \{W_r | q_{n,r}^0 \geq q_{th}, 1 \leq r \leq R\}, 1 \leq n \leq N. \quad (2)$$

其中 $q_{n,r}^0$ 表示 W_r 在 control channel 接收 V_n 訊息時所觀察到的 SNR 值, q_{th} 是可正確接收資料的 SNR 門檻值。

可能的轉播端使用的頻道資訊 (Available channels for potential relays)

我們用矩陣 \mathbf{R} 表示 potential relay V_n 可用的頻道列表, 其中

$$\mathbf{R} = [r_{n,c} | r_{n,c} \in \{0, 1\}]_{N \times C}. \quad (3)$$

換言之, $r_{n,c} = 1$ 表示 potential relay V_n 有頻道 c 可供選擇。

可能的目的端使用的頻道資訊 (Available channels for potential destinations)

我們用矩陣 \mathbf{D} 表示 potential destination W_r 可用的頻道列表, 其中

$$\mathbf{D} = [d_{r,c} | d_{r,c} \in \{0, 1\}]_{R \times C}, 1 \leq r \leq R, 1 \leq c \leq C. \quad (4)$$

換言之, $d_{n,c} = 1$ 表示 potential destinations W_r 可透過頻道 c 接收資料

使用者頻道容量 (User capacity)

我們用下列公式表示 potential relay V_n 在頻道 c 下廣播資料給鄰近 potential destination W_r 所能達到的頻道容量[6]:

$$U_c(V_n) = \sum_{r \in PD(V_n)} \log(1 + q_{n,r}^c), 1 \leq n \leq N, 1 \leq c \leq C. \quad (5)$$

干擾限制 (Interference constraint)

當兩個 potential relays 在各自的傳輸範圍內有共同的 potential destinations 時, 那麼這兩個 potential relays 就不能使用同樣的頻道同時傳送資料, 否則會造成 co-channel interference。我們用矩陣 \mathbf{B}_c 表示 potential relays 之間會造成 co-channel interference 的狀況:

$$\mathbf{B}_c = [b_{n,j}^c | b_{n,j}^c \in \{0, 1\}]_{N \times N}, 1 \leq n, j \leq N, \quad (6)$$

其中 $b_{n,j}^c = 1$ 表示若 V_n 和 V_j 這兩個 potential relays 同時在頻道 c 轉播, 將會引發 co-channel interference。 **IMP 子集合 (Interference-free multi-channel poly-matching subset)**

我們用矩陣 \mathbf{M}_c 表示在頻道 c 下轉播端與目的端所形成的 poly-matches:

$$\mathbf{M}_c = [m_{n,r}^c | m_{n,r}^c \in \{0, 1\}, c \in \{1, 2, \dots, C\}]_{N \times R}, 1 \leq n \leq N, 1 \leq r \leq R, \quad (7)$$

其中 $m_{n,r}^c = 1$ 表示轉播端 V_n 將使用頻道 c 轉播資料給目的端 W_r , 且轉播端 V_n 與其他轉播端同時廣播資料時不會引發 co-channel interference。

系統容量 (System capacity)

我們將整個網路的系統容量定義為在所有頻道下, 所有轉播端所能達到頻道容量的總和。也就是針對不同頻道將每一組 IMP 中的每一個轉播端的頻道容量去作加總。系統容量的計算公式如下:

$$S(\mathbf{M}_1, \dots, \mathbf{M}_C) = \sum_{c=1}^C \sum_{n=1}^N \left[\sum_{r \in PD(V_n)} m_{n,r}^c \times \log(1 + q_{n,r}^c) \right] \quad (8)$$

最佳化函數 (Optimization function)

由於在不同頻道下選擇不同的轉播端轉播資料給不同的目的端會形成不同的 IMP。因此我們希望選出來的每一組 IMP 能最大化整個網路的系統容量。我們利用下面的最佳化函數去定義 IMP 問題的目標:

$$(\mathbf{M}_1^*, \dots, \mathbf{M}_C^*) = \underset{(\mathbf{M}_1, \dots, \mathbf{M}_C)}{\arg \max} \{S(\mathbf{M}_1, \dots, \mathbf{M}_C)\}.$$

3. 集中式貪婪演算法

在介紹 OC-MAC 協定之前, 我們先簡單介紹如何用集中式貪婪演算法來解決 IMP 問題。在下個章節, 我們會介紹如何將集中式貪婪演算法轉換為分散式的通訊協定。

我們知道位在不同地理位置的車輛有不同的可供傳輸或接收頻帶情況。假設對所有可用的 channel 來說, 當 channel 為 c 時, potential relay V_n

擁有最大的 capacity $U_c(V_n)$ 。我們當然希望優先挑選 V_n 擔任 relay 的工作。註：一旦 potential relay 被選為 relay，就不再是“potential” relay。假設距離 V_n 二個 hops 之內，在 channel c 上的 potential relays 集合為 $N_c^2(V_n)$ ，其中 $N_c^2(V_n) = \{V_j \mid b_{n,j}^c = 1\}$ 。為了避免 co-channel interference，一旦 V_n 擔任 relay，那麼 $N_c^2(V_n)$ 裡頭的成員都不能在 Ch c 擔任 relay 的角色。如果 $|N_c^2(V_n)|$ 的值很大，意味一旦我們挑選 V_n 擔任 relay，那麼可在 Ch c 上擔任 relay 的車輛馬上減少很多。因此我們每次在挑選合適的 relay 時，應挑選 $\gamma(V_n) = \max_{c \in C} \left\{ U_c(V_n) / (1 + |N_c^2(V_n)|) \right\}$ 值最大的車輛來擔任 relay，而不是僅挑選具有 $\max_{c \in C} \{U_c(V_n)\}$ 值的車輛來擔任 relay。註： $\gamma(V_n)$ 公式裡頭，分母設定 $1 + |N_c^2(V_n)|$ 的目的是防止分母為 0。接著，為避免被選擇的 relay 與其他 potential relays 引發 co-channel interference，我們必須更新其他 potential relays 可使用的頻道與能接收資料的 potential destinations。最後，檢查剩餘的 potential relays 在每一個頻道下能接收轉播的 potential destinations 數量是否皆為零？不是的話，繼續上述挑選 relay 的步驟；是的話，則結束貪婪演算法的運作。

4. 分散式 OC-MAC 協定

如圖 5 所示，我們提出的 OC-MAC 協定主要分成下列幾個階段：(1) 開道廣播期 gateway broadcast period、(2) 頻道偵測及資訊交換期 channel sensing and information exchange period、(3) 轉播端選擇期 relay selection period、(4) 資料轉送期 data forwarding period。首先在 gateway broadcast period 期間，gateway 會廣播封包給鄰近的車輛。在 channel sensing and information exchange period 期間，potential relay 會先偵測可用的頻道並將觀察到的資訊廣播給鄰近的車輛。接著，換 potential destination 偵測目前可用的頻道並將這些資訊廣播給鄰近的 potential relay。在 relay selection period 期間，我們透過 backoff 的機制來達成挑選 relay 的效果。最後在 data forwarding period 期間，relays 分別在不同頻道下同時廣播資料給鄰近的車輛。

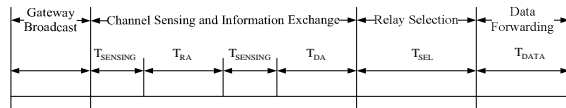


圖 5. OC-MAC 運作的範例

4.1 頻道偵測及資訊交換期

在 channel sensing and information exchange period 期間，potential relay 和 potential destination 先後去偵測可用的頻道並將收集到的資訊提供給鄰近的

車輛。如圖 6 所示，這個階段又可再分成兩個部分，分別是 relay access phase 和 destination access phase。在此階段，我們使用兩種控制封包，分別為 relay information (簡寫成 RI) 和 destination information (簡寫成 DI)。Potential relay 在 relay access phase 發送 RI 封包給鄰近的車輛，而 potential destination 則在 destination access phase 發送 DI 封包給鄰近的車輛，目的是對外告知自己可用的頻道。

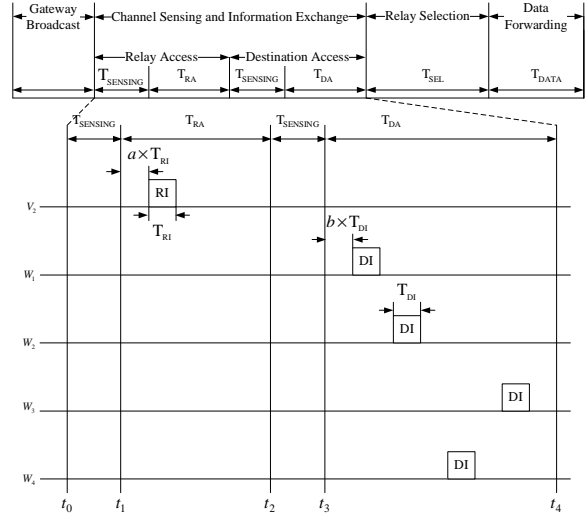


圖 6. Channel sensing and information exchange period 的運作範例

在 gateway 廣播完資料後，有完整收到資料的車輛便知道自己是一個 potential relay (例如：圖 6 之 V_2)。接著進入 relay access phase，potential relays 會先去偵測目前可用的頻道並等待一段 random backoff 的時間後發送 RI 封包給鄰近的車輛。當 potential destination 收到 RI 封包後便可知自己附近有哪些 potential relay。然後進入 destination access phase，同樣的 potential destination (例如：圖 6 之 W_1, W_2, W_3, W_4) 會先去偵測目前可用的頻道。接著等待一段 random backoff 的時間後將 DI 封包發送給鄰近的車輛。以圖 6 為例， V_2 不僅知道有 4 個 potential destinations 在它的廣播範圍內，也知道這 4 個 potential destinations 各自的可用頻道。此外， V_2 更進一步得知有其他的 potential relays (也就是 V_1 和 V_3) 在 two-hop 的範圍內。因此，若 V_1 和 V_3 同時與 V_2 使用相同的頻道去廣播封包時便會發生 co-channel interference。

4.2 轉播端選擇期

Relay selection period 的目的是要找到能同時轉播的車輛，以便讓最多未正確收到資料的車輛也能獲得 gateway 的資訊。而在眾多的 potential relays 中，被挑選出來的 potential relays 必須滿足下列條件：(1) 不會與其他 relays 發生 co-channel interference 的問題、(2) 要能夠最大化 $\gamma(V_n)$ 的值，亦即「系統容量和 2-hop 內可在相同 channel 擔任 relays 個數的

比值」。因此我們利用 backoff 的機制去挑選合適的 relays，並希望 $\gamma(V_n)$ 值愈大的 potential relays 能有愈小的 backoff。當 potential relays 進入 relay selection period 便開始 backoff 的程序。如圖 7 所示，一旦車輛等待完 backoff 的時間後即成轉播端並將在下一個階段去轉播資料給鄰近的車輛。

為了讓鄰近車輛知道轉播端選取的結果，我們在此階段採用兩種控制封包，分別為 relay RTS (簡寫成 RRTS) 和 relay CTS (簡寫成 RCTS)。如圖 7 所示，競爭成功的 potential relay (例如 V_2) 發送 RRTS 去通知在 one-hop 範圍內的車輛，而接收到 RRTS 的 potential destination (也就是 W_1, W_2, W_3, W_4) 則按 RRTS 中所記載的 destination address 次序發送 RCTS 去通知鄰近的 potential relay，以避免造成 co-channel interference。收到 RRTS 或 RCTS 封包的 potential relay 則更新當前可用的頻道並重新計算 backoff 的時間。

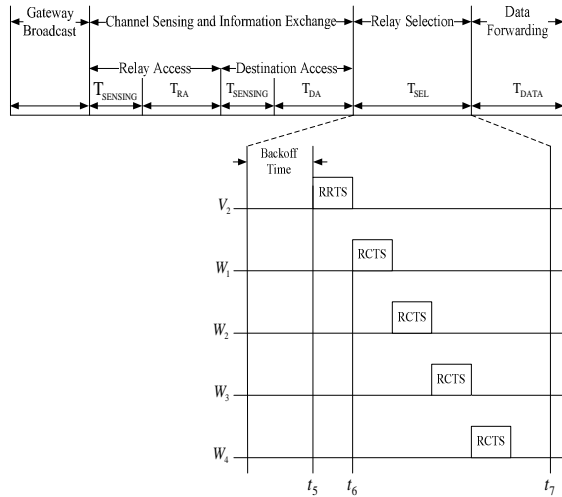


圖 7. Relay selection period 的運作範例

在 relay selection period 階段，車輛按照公式(9)來設定 backoff delay

$$\text{backoff} = \min \left\{ \frac{1 + \sum_{n=1, j=1}^N b_{n,j}^c}{U_c(V_n)} \times k \times (1 + \text{Random}[0,1]), CW_{\max} \right\} \quad (9)$$

其中 $c^* = \arg \max_{c \in \{1, \dots, C\}} U_c(V_n)$ 用來反應 V_n 在頻道 c^* 可獲

得最大的 user capacity。Random[0, 1] 會回傳一個介於 [0, 1] 之間的實數，而 k 是一個預設的常數， CW_{\max} 是 relay selection period 期間最大的 slot 個數。公式(9)主要是反應貪婪演算法中挑選 relay 的準則，意即：capacity 愈大的車輛，backoff 應該愈短；同時 $|N_c^2(V_n)|$ 的值愈小，backoff 的值也應該愈小。註： $|N_c^2(V_n)| = \sum_{n=1, j=1}^N b_{n,j}^c$ 。註：每台車輛可從先前的 channel sensing and information exchange period 得到 user capacity 和 two-hop 之內鄰居的資訊。因此，每台車輛能各自算出自己所需等待的 backoff 時間。

4.3 資料轉送期

在 data forwarding period 期間，當選為 relays 的車輛同時轉播封包給鄰居，如圖 8 所示。在前一個階段，我們已經排除轉播端使用相同頻道會產生 co-channel interference 的問題。因此，我們可以確保即使在此階段有不同的轉播端使用相同的頻道去轉播資料也不會發生 co-channel interference。所以 OC-MAC 充分利用了 spatial reuse 的優點，不僅提升整個網路的 throughput，也增加收到 gateway 資料的車輛數。

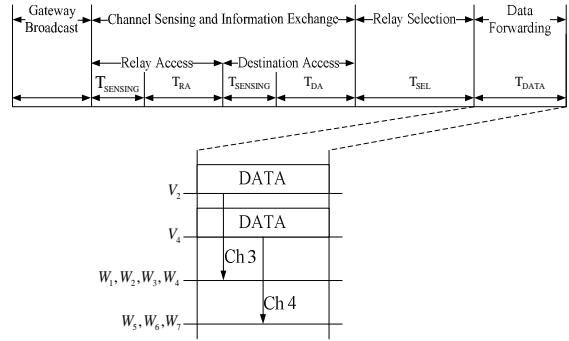


圖 8. Relay selection period 的運作範例

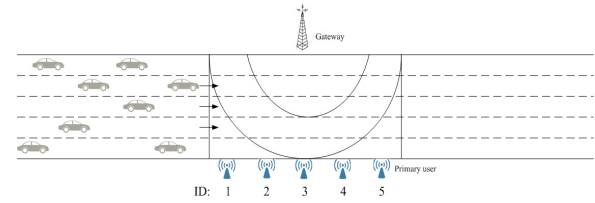


圖 9. 模擬實驗的環境設定

5. 效能評估與模擬實驗

如圖 9，我們考慮車輛行駛在高速公路上的場景，其中 gateway 設置在道路旁，而 primary user 則等距離分佈在道路旁。在每一個車道上，車輛之間的距離設為 $\frac{\text{length of the simulation segment}}{(\text{車輛總數}/\text{車道數}) - 1}$

設 gateway 在座標軸上原點(0,0)的位置。接著我們假設有 m 個 primary users，且 primary users 之間的距離為 $d = \frac{\text{length of the simulation segment}}{m + 1}$

primary user PU_m 的座標為 $(-300 + m \times d, -20)$ ，其中 PU_m 表示 ID 為 m 的 primary user。如圖 9 所示，一開始所有的車輛都在 gateway 的廣播範圍外。隨著車輛的移動，車輛逐漸進入到 gateway 的廣播範圍內，最後駛離 gateway 的廣播範圍。在模擬實驗中，我們假設 PU_m 所使用同 licensed channel 編號為 $[PU_ID \bmod (\text{number of licensed channels})] + 1$ 。以圖 9 為例，ID 為 1 的 primary user 使用 2 號 channel，而 ID 為 2 的 primary user 使用 3 號 channel，依此類推。我們假設車輛的相對位置在模擬期間是不變

的。在資料傳輸的過程中，我們採用 log-normal path loss model [6]去計算訊號的路徑損失 (path loss)。為了檢驗 OC-MAC 的效能，在模擬實驗中，OC-MAC 的比較對象包含 Random-MAC 及 Centralized-MAC，其中在 Random-MAC 裡頭，所有車輛在交換完 RI 及 DI 訊息後，potential relays 和 potential destinations 隨機選擇一個可用的頻道去轉播或接收資料；而在 Centralized-MAC 裡頭，我們利用貪婪演算法去選擇轉播端、接收端、及其使用頻道。註：Centralized-MAC 協定無法被實現，僅用來表示 OC-MAC 的效能極限而已。

5.1 Run-Time Throughput

我們首先比較三種方法隨著時間變化所能達到的 throughput。參考圖 10，我們可以觀察到三種方法的曲線都是逐漸上升，接著達到最高點後慢慢開始下降。這樣的情形是因為車輛隨著時間的增加會逐漸進入 gateway 的廣播範圍內，接著又逐漸遠離 gateway 的廣播範圍所造成。由於 Random-MAC 採用隨機選擇頻道的方式去傳送跟接收資料，使得許多車輛可能會受到 co-channel interference 的影響，導致 relay 轉播資料時沒能成功傳給鄰近的 destinations，因此 throughput 會比其他兩種方法的差。此外，我們觀察到 Centralized-MAC 和 OC-MAC 的效能曲線很相近。此一結果驗證了 OC-MAC 的效能確實逼近理論最佳值。

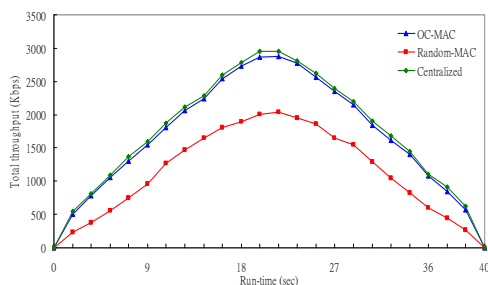


圖 10. Run-time throughput

5.2 Primary Users 數量對效能的影響

接著我們觀察 primary users 數量對 throughput 的影響。如圖 11，我們觀察到無論 primary users 數量的多寡，OC-MAC 和 Centralized MAC 的 throughput 都差不多維持不變。理由如下：OC-MAC 在 primary users 數量少的時候，potential relays 有足夠的頻道去選擇以達到較佳的轉播效能。而當 primary users 數量增加時，雖然 potential relays 可偷用的頻道減少，但運用空間再利用率的特性，OC-MAC 還是能維持同樣的 throughput 表現。而當 primary users 數量持續增加導致 potential relays 幾乎沒有可偷用的頻道時，potential relays 還是能透過 unlicensed channel 去轉送資料給鄰近的車輛，使得 throughput 的曲線不會嚴重的下降。相反地，在 Random-MAC 裡頭，throughput 會隨著 primary users 數量增加而稍微下降。這是由於 potential relays

可偷用的頻道減少導致 potential relays 和 potential destinations 選到相同頻道的機會提高，進而加重資料碰撞的情況。在 primary users 數量少的時候，雖然 potential relays 有足夠的頻道可供選擇，但也因此造成 potential relays 和 potential destinations 選到相同頻道的機會降低，使得 throughput 無法有效地提升。

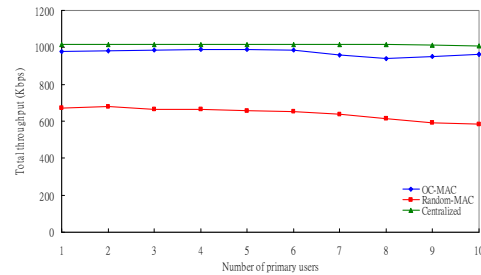


圖 11. Primary user 數量對 throughput 的影響

6. 結論

在本論文中，我們首先將整個感知車載網路的情境建模為數學上的整數最佳化問題。一般而言，整數最佳化問題為 NP-complete 的問題。為此，我們先提出一個簡單的集中式貪婪演算法。接著，我們將此一貪婪演算法轉換為分散式的通訊協定，稱為 OC-MAC。在 OC-MAC 裡頭，每一個正確收到 gateway 資料的車輛只需和相鄰的車輛交換訊息便能決定出整個網路裡頭最佳的轉播車輛及其轉播時所需使用的頻道。模擬實驗結果顯示，OC-MAC 不僅能有效對抗 primary users 很多的環境，而且其效能相當接近理論極限。

致謝

本論文承蒙科技部計畫 (計畫編號 102-2221-E-110-048 及 103-2221-E-110-052) 提供經費支援，特此致謝。

參考文獻

- [1] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "Next Generation Dynamic Spectrum Access Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey," *Computer Networks*, vol. 50, no. 13, pp. 2127-2159, 2006.
- [2] R. Maheshwari, H. Gupta, and S. R. Das, "Multichannel MAC Protocols for Wireless Networks," *Proceedings of the 3rd Annual IEEE Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, pp. 393-401, September 2006.
- [3] K. H. Almotairi and X. Shen, "Multichannel Medium Access Control for Ad Hoc Wireless Networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol. 13, No. 11, pp. 1047-1059, 10 August 2013.
- [4] A. Nosratinia, T. E. Hunter, and A. Hedayat, "Cooperative Communication in Wireless Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 42, No. 10, pp. 74-80, October 2004.
- [5] J. Zhang, Q. Zhang, and W. Jia, "VC-MAC: A Cooperative MAC Protocol in Vehicular Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 58, No. 3, pp. 1561-1571, March 2009.
- [6] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practices. 2nd Edition*, Prentice-Hall, 1996.