

Chapter 10: 感知無線電網路

Prof. Yuh-Shyan Chen

Department of Computer Science and
Information Engineering

National Taipei University

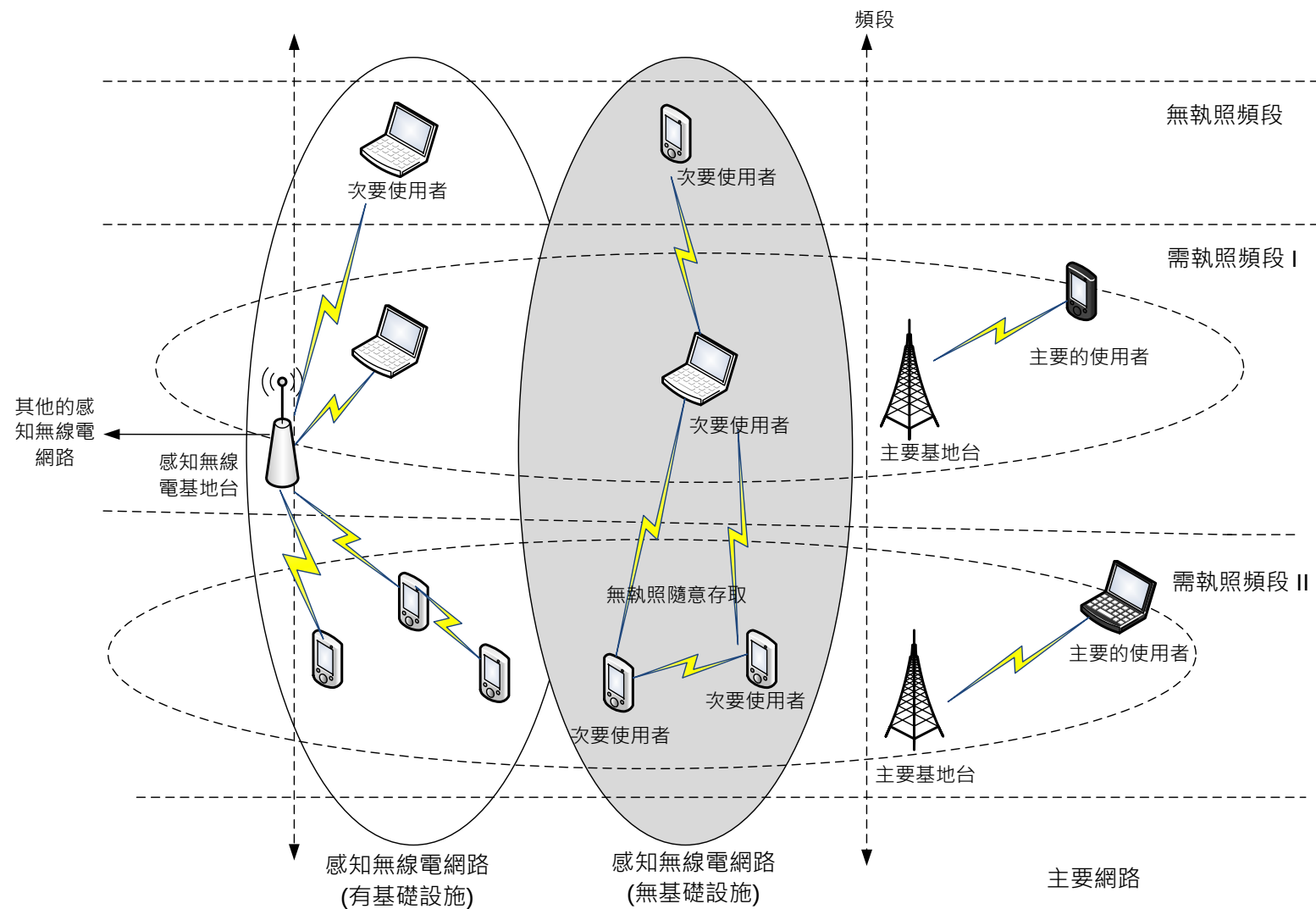
感知無線電網路簡介

- 無線頻譜是珍貴的資源，然而不必使用執照的頻段已十分擁擠，例如2.4GHz的ISM頻段已有包含：
 - WiFi
 - 藍牙
 - Zigbee
- 而需要執照的頻段使用率又不高，例如：
 - Industrial
 - Scientific
 - Medical

感知無線電網路簡介

- 如圖10.1所示，感知無線電網路包含：
 - 基地台
 - 有執照的主要使用者 (Primary User或稱為licensed user簡稱為PU)
 - 沒有執照的次要使用者 (Secondary User或稱為unlicensed user，簡稱為SU)
- 感知無線電網路分為：
 - 有基礎設施 (即基地台)
 - 沒有基礎設施的隨意感知無線電網路 (Cognitive Radio Ad Hoc Networks簡稱為CRAHNS)

圖10.1: 感知無線電網路的架構



CRAHNS vs. MANETs

- SU需要選擇使用的頻譜：每個SU的可用頻譜都不太相同，而傳統的MANETs通常是在事先決定好的頻道運作。
- 拓樸的控制：在CRAHNS中SU通常搜集到的拓樸資訊是不完整的，因此容易造成傳送訊息時的碰撞。

CRAHNS vs. MANETs

- 多跳 (Multi-hop) / 多頻譜 (Multi-spectrum) 式的傳送：
在CRAHNS中建立路由的路徑時必須結合頻譜的配置。
- 區別移動性與PU活動所造成的斷線：在CRAHNS，
沒有收到下一步節點回覆的原因可能是因為節點的傳輸頻道被PU佔用，因此，在CRAHNS要先正確的判斷路徑斷裂的原因，才能採用適當的復原機制。

頻譜管理的主要功能

- 頻譜感測 (spectrum sensing) :
 - SU只能分配沒有被使用的頻譜，因此，SU必須監控頻譜使用狀態，找出可用的頻譜，頻譜感測可說是CR網路最基本的功能
- 頻譜決定 (spectrum decision) :
 - 一旦可用的頻譜被感測出來，SU便要依據本身的QoS需求挑選最適當的頻道。
 - 找出無線電環境的特性與PU的行為模式對於設計頻譜決定的演算法是很重要的
 - 此外，頻譜的決定與路徑的挑選必須合併一起考慮

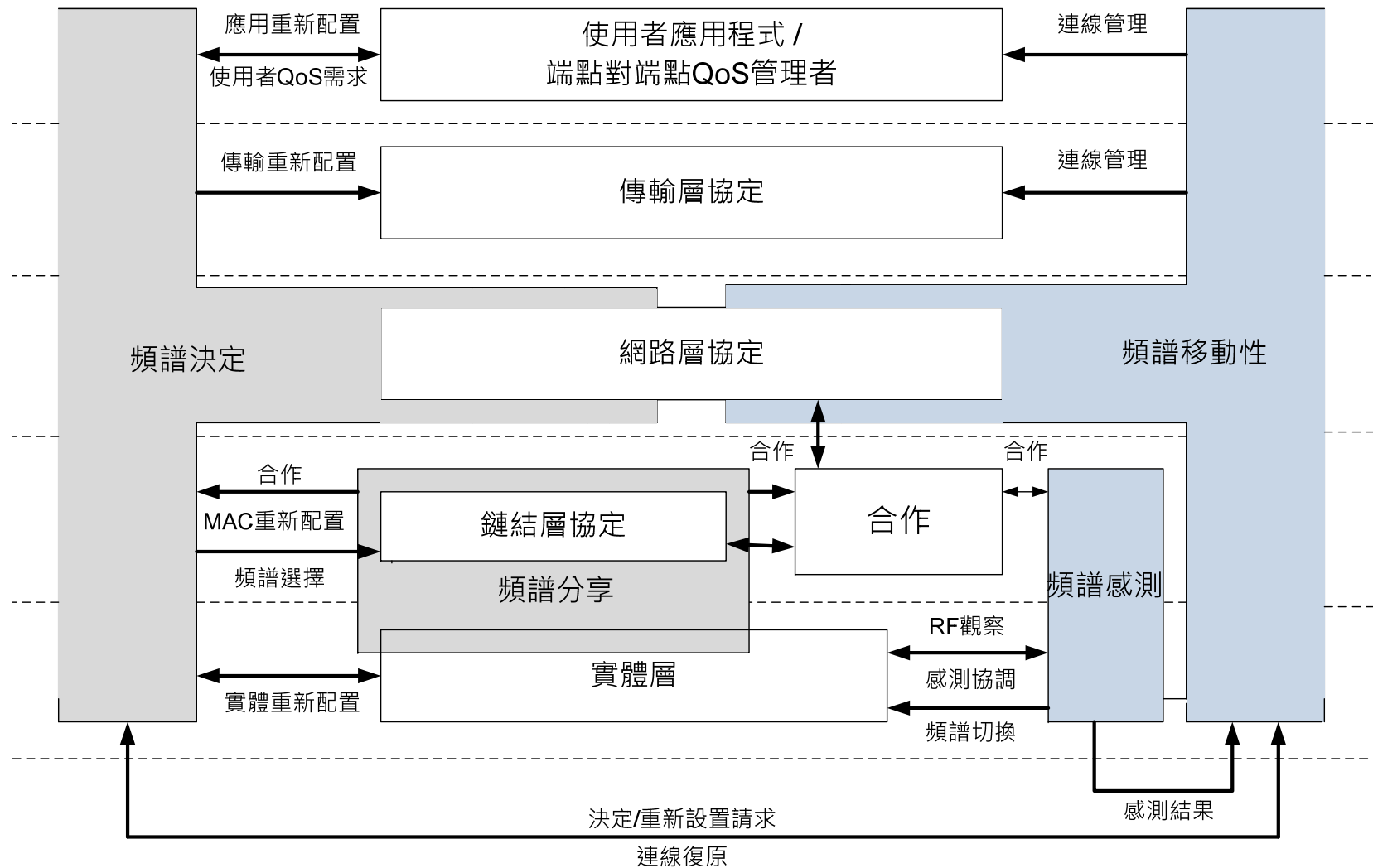
頻譜管理的主要功能

- 頻譜分享 (spectrum sharing) :
 - 因為有許多的SU要存取頻譜，因此，必須協調這些使用者的傳輸避免碰撞的發生，頻譜的分享提供了許多SU共用頻譜的機會，但必須避免影響PU。
 - 因此，賽局理論 (game theory) 被用來分析一些自私的SU的行為。
 - 頻譜的分享是CR媒體存取控制 (MAC) 協定的必要功能，能將感測的工作分配給相互合作的節點同時也決定頻譜的分配與傳輸的時機

頻譜管理的主要功能

- 頻譜移動性 (spectrum mobility) :
 - 如果感測到PU在使用特定的頻譜，SU應該立刻騰出這個頻譜，轉換到其他沒被佔用的頻譜繼續通訊。
 - 頻譜的移動性需要頻譜的換手機制來偵測鏈結的失敗，然後將目前的通訊轉換到新的路徑或新的頻譜，而只造成最小的通訊品質下降。
 - 要達成這個目的需要頻譜感測、發現鄰居以及路由協定之合作。
 - 這項功能需要透過連線管理機制來降低頻譜轉換對於效能的影響。

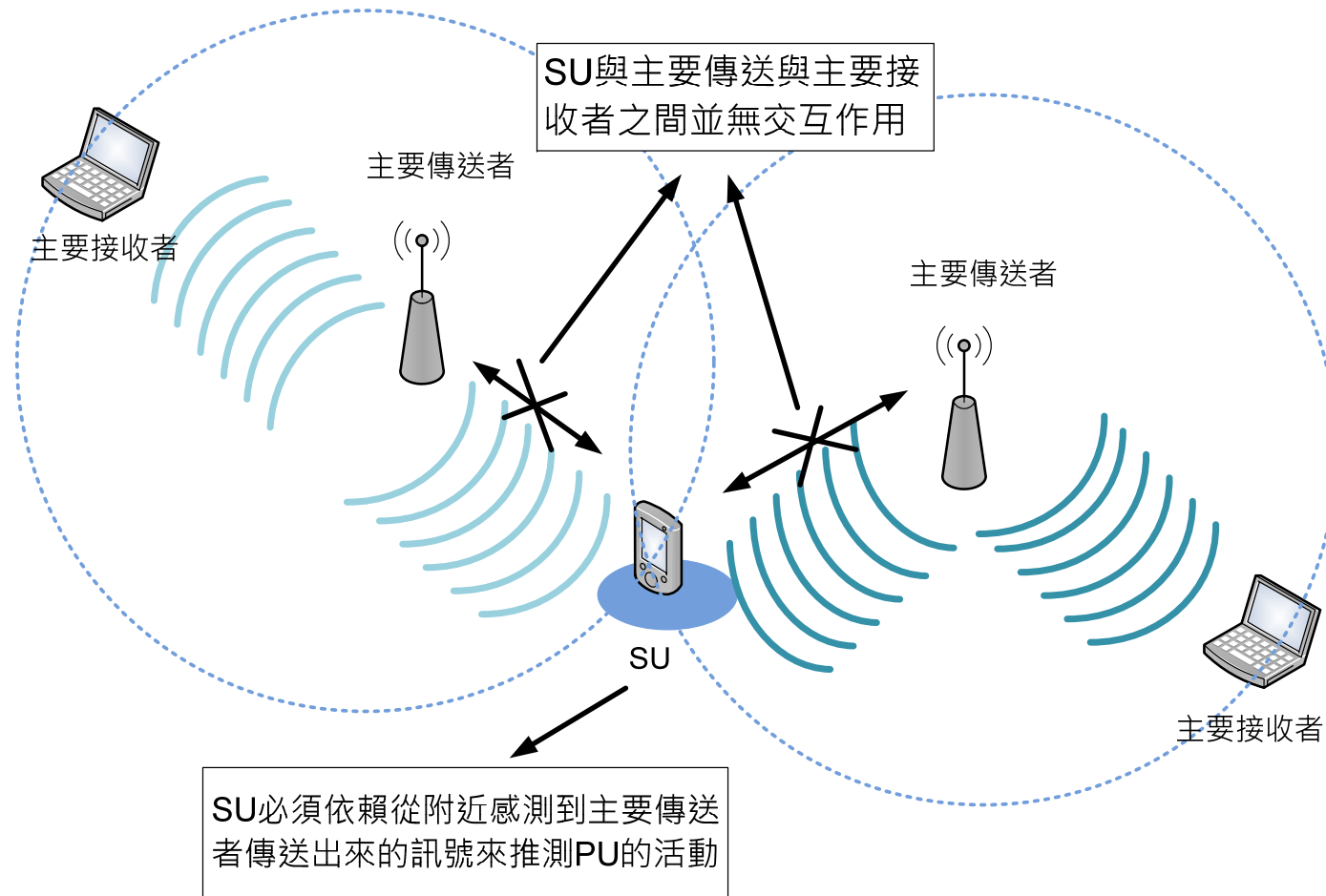
圖 10.2: CRAHNs 上的頻譜管理架構



頻譜感測 (Spectrum sensing)

- 頻譜感測主要有傳送者感測與接收者感測兩種技巧
 - 如圖10.3(a)所示，傳送者感測是依據SU感測到主要傳送者的信號，來感測可用的頻譜，而接收者感測則是用來感測是否有PU正在SU的通訊範圍內接收資料
 - 如圖10.3(b)所示，藉由感測主要接收者(即PU接收者)從局部震盪器(Local Oscillator簡稱為LO)洩漏出來的能量來判斷是否有PU正在接收資料，此能量會從無線頻道發射出來，然而訊號非常的微弱，SU通常很難判斷到底是雜訊干擾還是PU接收資料所洩漏出來的訊號，因此，目前大部分的研究還是專注於傳送者的感測。

圖10.3(a): 頻譜感測 - 傳送者感測



a

頻譜感測 (Spectrum sensing)

- 傳送者感測主要包含
 - 匹配濾波器檢測 (Matched filter detection)
 - 能量檢測 (Energy detection)
 - 特徵檢測 (Feature detection)
- 分別說明如下：

頻譜感測 (Spectrum sensing)

- 匹配濾波器檢測：當匹配濾波器輸出的取樣值大於界限值 (Threshold) 時則可判定頻譜被PU佔用，此方案雖然檢測快速，但是SU需要知道PU訊號的特性，而且還必須與PU同步，當有許多不同類型的PU時，SU需要安裝多組匹配濾波器才能檢測這些PU的訊號，因而增加了硬體的成本。

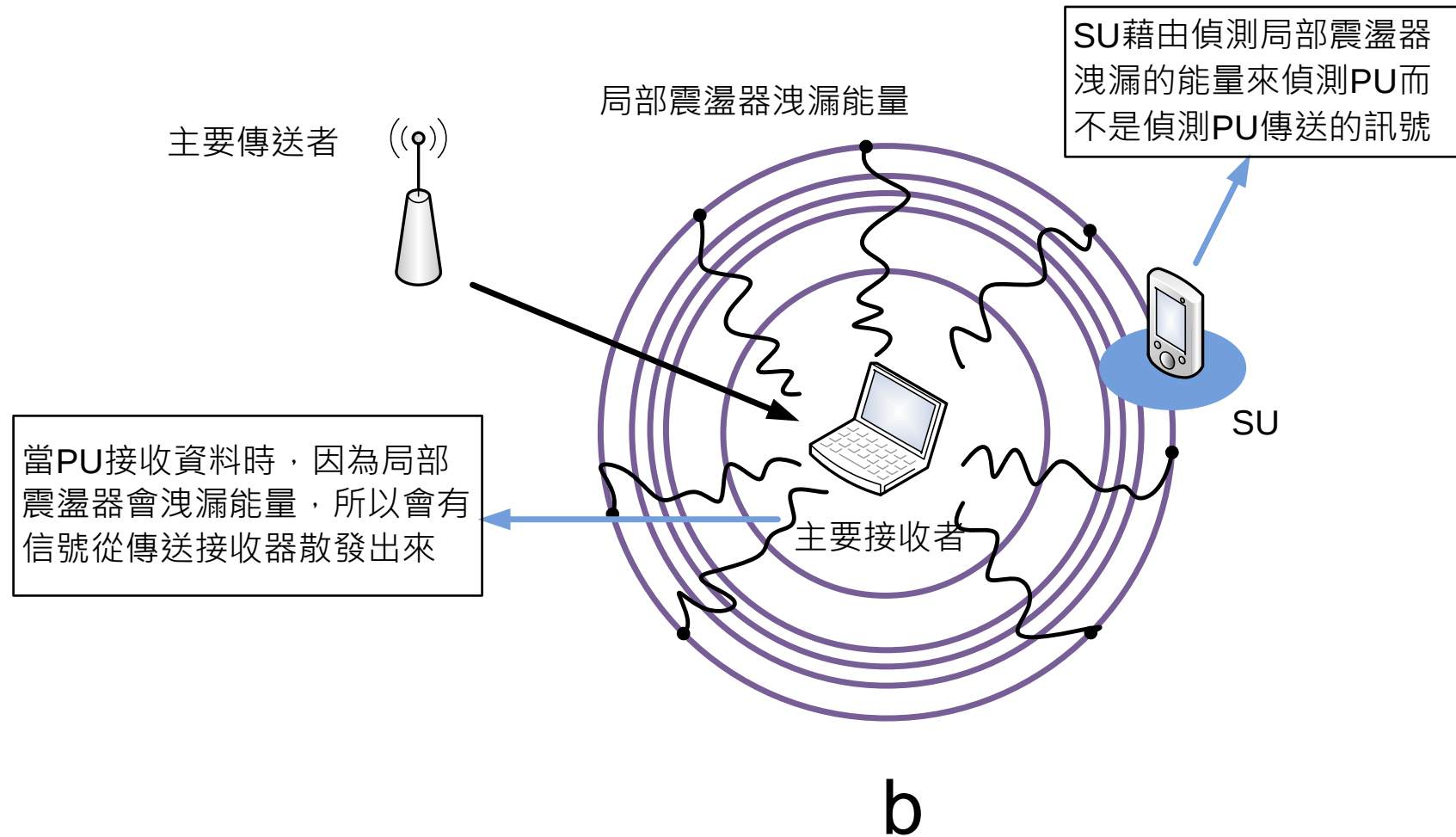
頻譜感測 (Spectrum sensing)

- 能量檢測：SU採用能量感測法時會依據接收到訊號的訊雜比 (Signal Noise Ratio簡稱為SNR) 來感測PU是否出現，然而當雜訊的強度不確定且SNR值低於界限值時，能量感測法將無法可靠的檢測訊號。此外能量感測法只能檢測訊號是否出現，而無法辨識訊號的類型，因此有時候會勿把SU的訊號當做是PU的訊號。

頻譜感測 (Spectrum sensing)

- 特徵檢測：特徵檢測藉由擷取信號的特徵如導頻信號 (Pilot signal)、循環前置碼 (Cyclic prefix)、符號傳輸率 (Symbol rate)、展頻碼 (Spreading code) 或調變的類型 (Modulation type) 來判斷PU的訊號是否出現，這個方法即使在雜訊的強度不確定的情形下也能可靠的感測訊號，而且還能區分不同的訊號類型，SU不必與其他的鄰居同步便能獨立的運作，特徵檢測主要的缺點在於需要複雜的運算，因此需要比較長的時間來感測頻譜。

圖10.3(b): 頻譜感測 - 接收者感測



頻譜決定 (Spectrum decision)

- CRAHMs必須具有從所有可用的頻帶挑選能夠滿足QoS需求的最佳頻道的能力，這個能力稱為頻譜決定。
- 頻譜決定包含兩個步驟：
 - 依據附近SU蒐集到的資訊以及PU網路的統計資訊找出每個頻帶的特性
 - 根據頻譜的特性挑選最適當的頻道

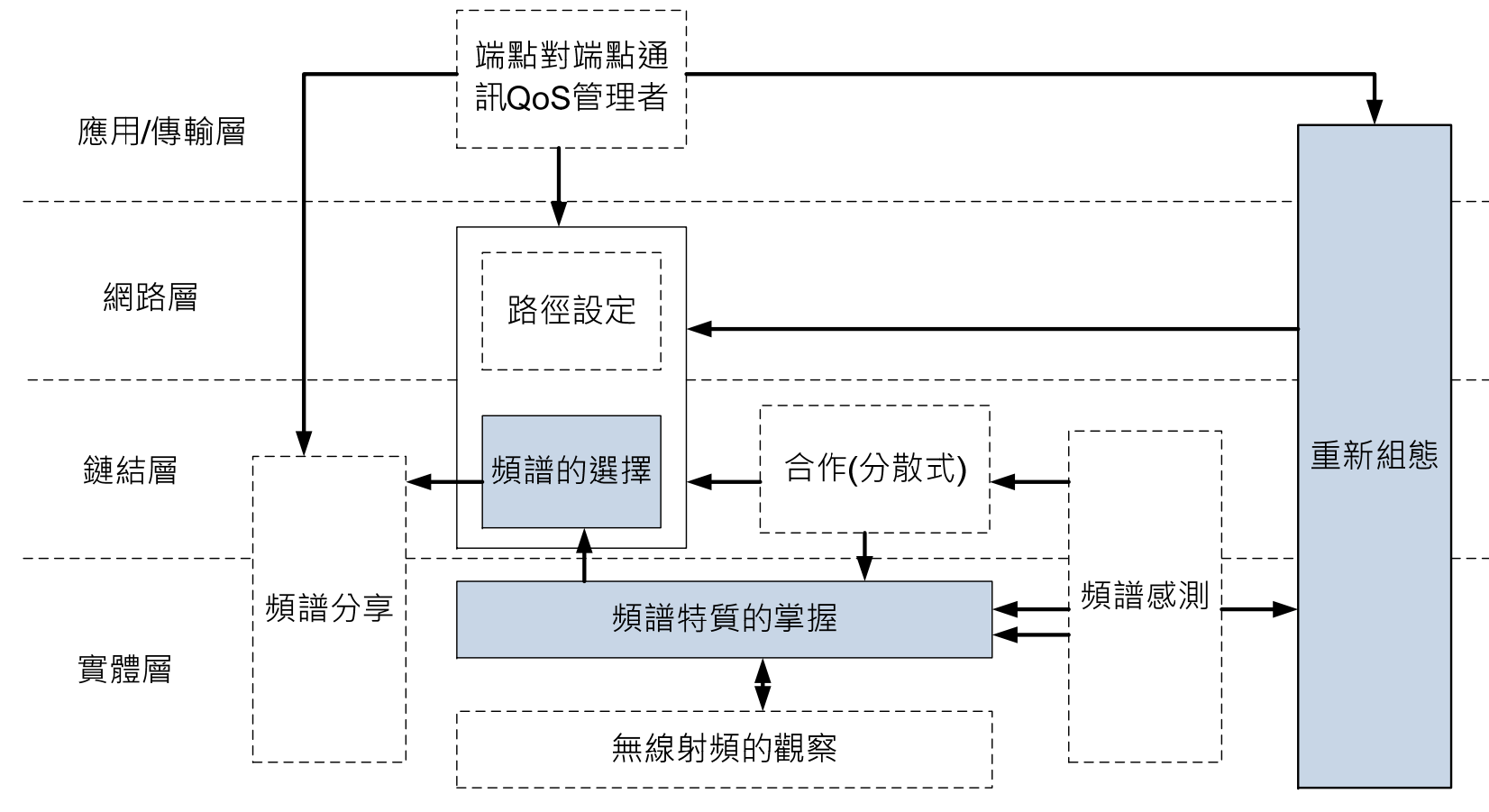
頻譜決定 (Spectrum decision)

- 頻譜決定的主要功能如下：
 - 頻譜特質的掌握 (Spectrum characterization)：根據觀察的結果，SU不只要了解每個可用頻道的特質還要掌握PU在這些頻道的活動模式
 - 頻譜的選擇 (Spectrum selection)：PU必須找出端點對端點路徑上每一步的最佳頻道以滿足端點對端點通訊QoS的需求，因此，在CRAHNS中，路徑的挑選必須與頻譜的選擇結合在一起
 - 重新組態 (Reconfiguration)：SU應該依據無線頻道的狀況與QoS的需求來調整通訊協定、通訊硬體與無線射頻的前端處理

頻譜決定 (Spectrum decision)

- SU在開始傳輸之前必須決定使用的頻譜，如圖10.4所示，SU藉由觀察接收到的訊號強度、干擾以及目前使用此頻譜的使用者個數，來決定使用的頻譜，SU應挑選最適合的可用頻道來滿足QoS的需求，當傳輸的品質下降時便應再次啟動頻譜決定的機制來挑選合適的頻道以維護傳輸的品質。

圖10.4: 頻譜決定的結構圖



頻譜分享 (spectrum sharing)

- 頻譜分享必須在無線頻譜變動的環境中分配通訊資源並協調SU的多重存取 (Multiple access) 以滿足QoS的需求而不能干擾PU的通訊。
- 頻譜分享包含了許多媒體存取控制 (MAC) 協定和資源分配的功能。
- 在CRAHNS因為缺乏中控者，頻譜分享必須由SU以分散式的方式決定。

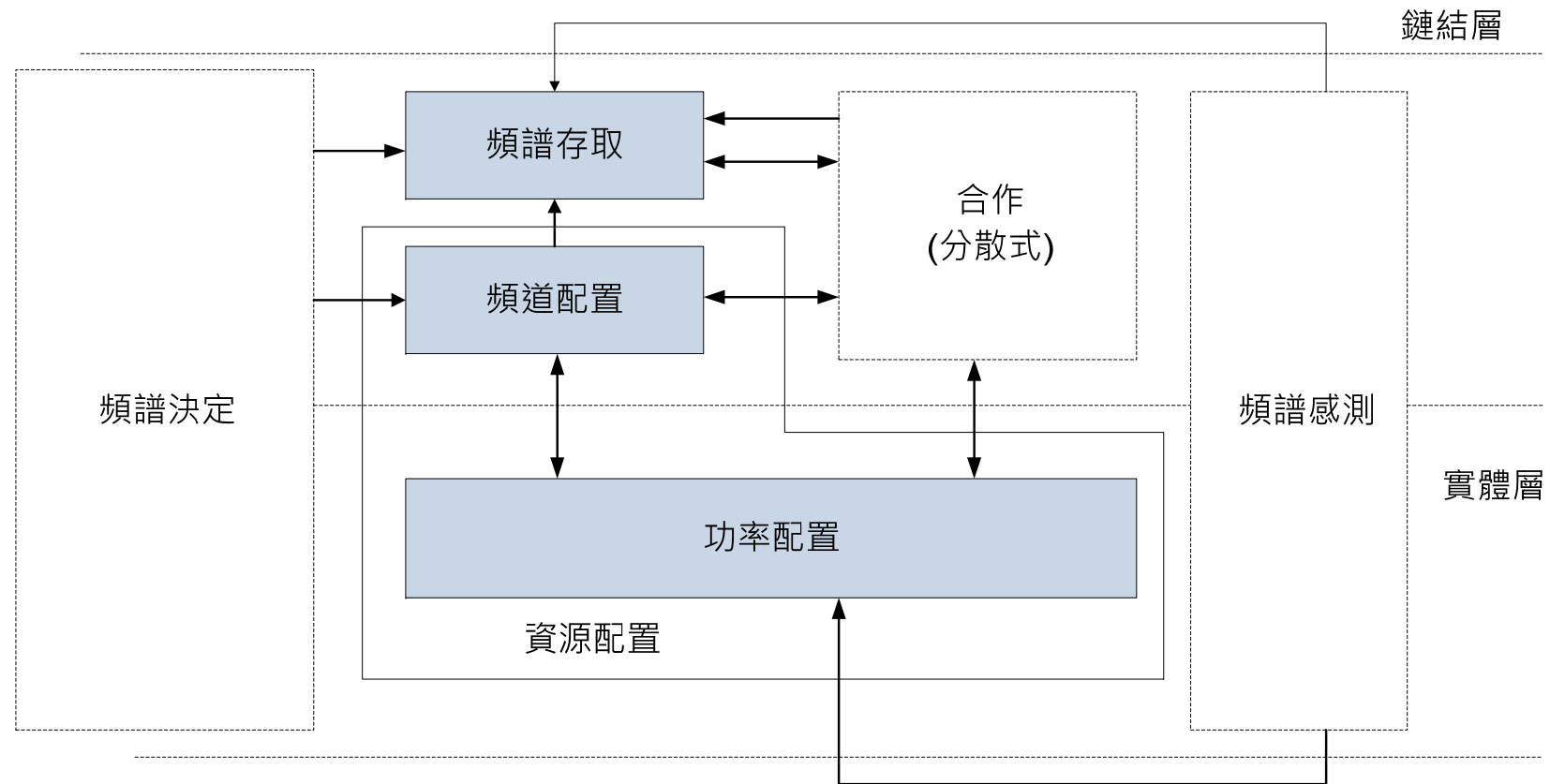
頻譜分享 (spectrum sharing)

- 圖10.5所示為頻譜分享的功能區塊圖，分別說明如下：
 - 資源配置 (Resource allocation)：SU會挑選式當的頻道 (頻道配置) 與調整傳輸的功率 (功率控制) 來滿足QoS的要求與資源分配的公平性。尤其是功率的控制，要避免干擾到PU。
 - 頻譜存取 (Spectrum access)：藉由決定誰可以存取頻道或何時可以存取頻道來讓多位SU可以分享頻譜的資源，因為同步的困難，大多採用隨機存取 (Random access) 的方式。

頻譜分享 (spectrum sharing)

- 一旦適當的頻帶藉由頻譜決定挑選後，在該頻帶的通訊頻道便可分配給SU，同時要決定適當的傳輸功率(功率配置)以避免干擾PU，接下來SU要決定何時可以存取該頻帶以避免傳輸時與其他SU發生碰撞(頻譜存取)。

圖10.5: 感知隨意無線電網路中頻譜分享的結構圖



頻譜移動性 (Spectrum mobility)

- SU通常被當做是頻譜的訪客 (visitor)，因此，如果PU需要SU使用的頻譜，SU必須切換到另一個閒置的頻譜來繼續通訊，這就稱為頻譜移動性。
- 為了達到頻譜移動性，SU必須轉移連線到沒被使用的頻帶，這種頻譜轉移稱為頻譜換手 (Spectrum handoff)。
 - 偵測到PU頻譜
 - SU因為移動性而造成進行中的通訊中斷
 - 目前的使用的頻帶無法滿足QoS的要求，此時頻譜換手便會發生。

頻譜移動性 (Spectrum mobility)

- 頻譜移動性的主要功能如下：
 - 頻譜換手 (Spectrum handoff)：SU轉換使用的頻帶並將連線的參數重新設定 (如運作的頻率與調變方式)
 - 連線管理 (Connection management)：頻譜切換必須與各層的協定結合以最小化頻譜切換所造成的通訊品質下降

頻譜移動性 (Spectrum mobility)

- 圖10.6所示為頻譜移動性的功能區塊圖，藉由結合頻譜決定，SU可在選定的路徑上決定要轉換的頻帶並將目前進行中的通訊切換至新的頻帶，SU必須注意維護目前的傳輸品質避免被切換的延遲所影響。

圖10.6: 感知隨意無線電網路中頻譜移動性的結構圖

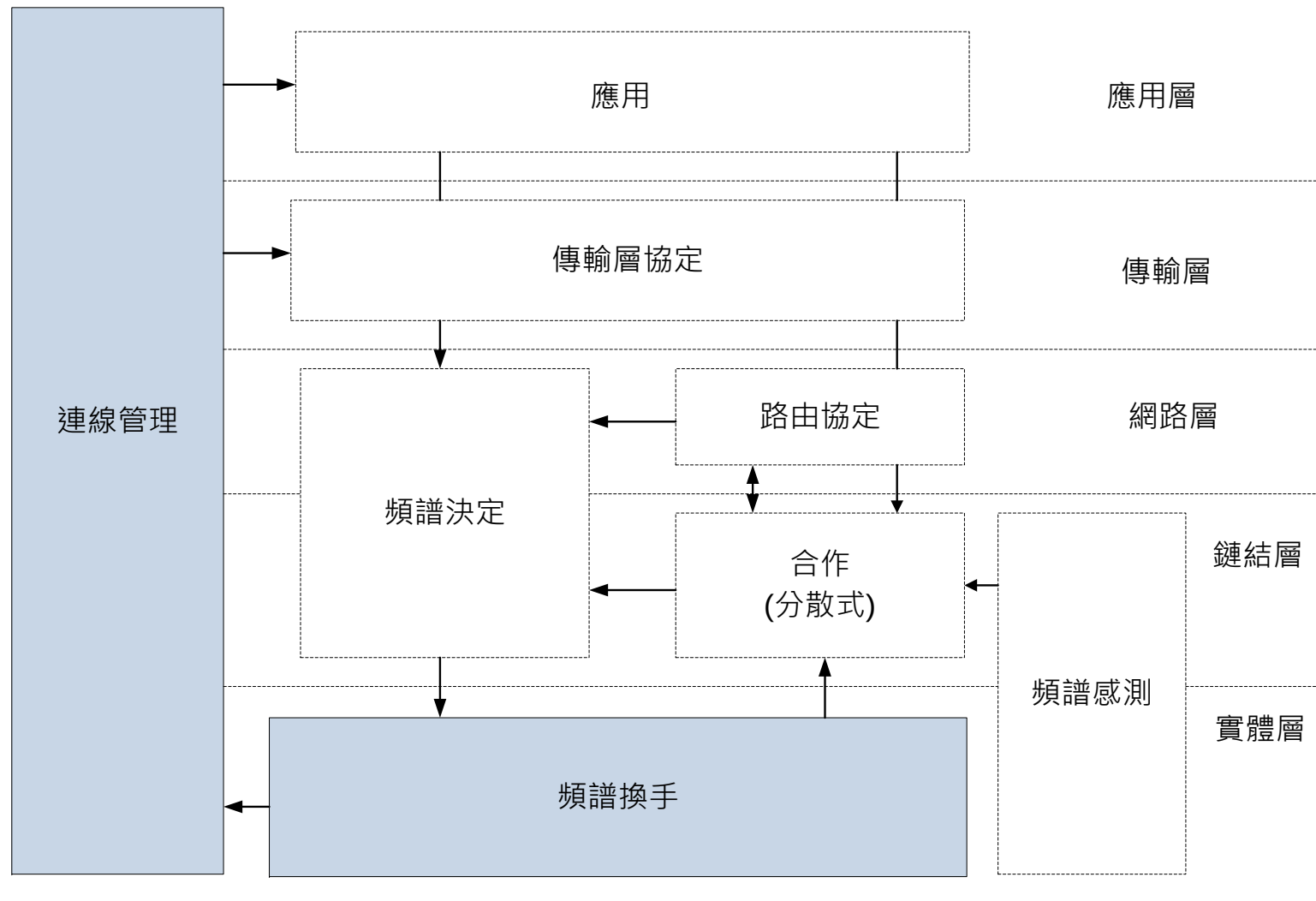


圖10.7: 感知無線電網路的媒體存取控制協定之分類

	隨機存取 (以類似CSMA/CA的機制隨機存取控制封包與資料)	時槽式 (控制與資料時槽時間同步)	混合式 (部分時槽部分隨機存取)
CR Centralized MAC	單一無線電 CSMA MAC	IEEE 802.22	DSA Driven MAC
CR Ad Hoc MAC	單一無線電 SRAC MAC HC-MAC 多重無線電 DOSS DCA-MAC	C-MAC	OS-MAC POMDP SYN-MAC Opportunistic MAC

有基礎架構的MAC協定

- 這種架構中通常有個中控的裝置(如基地台)負責管理網路的活動、同步與協調節點間的運作。
- 這個中控裝置通常是靜態的而且與涵蓋範圍內的SU形成一步的鏈結。
- 這個架構可以幫助並協調SU蒐集網路環境的資訊，以便決定頻譜。
- 依據存取頻道方式的不同分為以下的MAC協定：
 - 隨機存取(Random Access)協定
 - 時槽式(time-slotted)協定
 - 混合式(Hybrid)協定

隨機存取協定

- 以載波偵測多重存取 (Carrier Sense Multiple Access簡稱為CSMA) 為基礎的MAC協定。
- 藉由調整傳送功率與傳送速度來確保SU與PU可以共存。
- SU與PU的基地台是分開的，但涵蓋範圍可能有所重疊，SU與PU和他們所屬的基地台建立起直接的鏈結。

隨機存取協定

- 此協定的運作方式如下：
 - PU主要依循傳統CSMA的機制運作，PU在傳送RTS (request to send)到基地台之前會先感測媒體，如果資料可以傳輸，主要基地台(primary base station)會回覆CTS (clear to send)給PU
 - SU以類似的機制傳送資料，但是SU需要做較長時間的載波偵測，然後才能傳送RTS
 - SU的基地台會依據SU與基地台的距離以及雜訊的功率來決定目前傳輸的功率與資料傳輸率
 - SU一次只允許傳輸一個封包以便降低對於PU的干擾

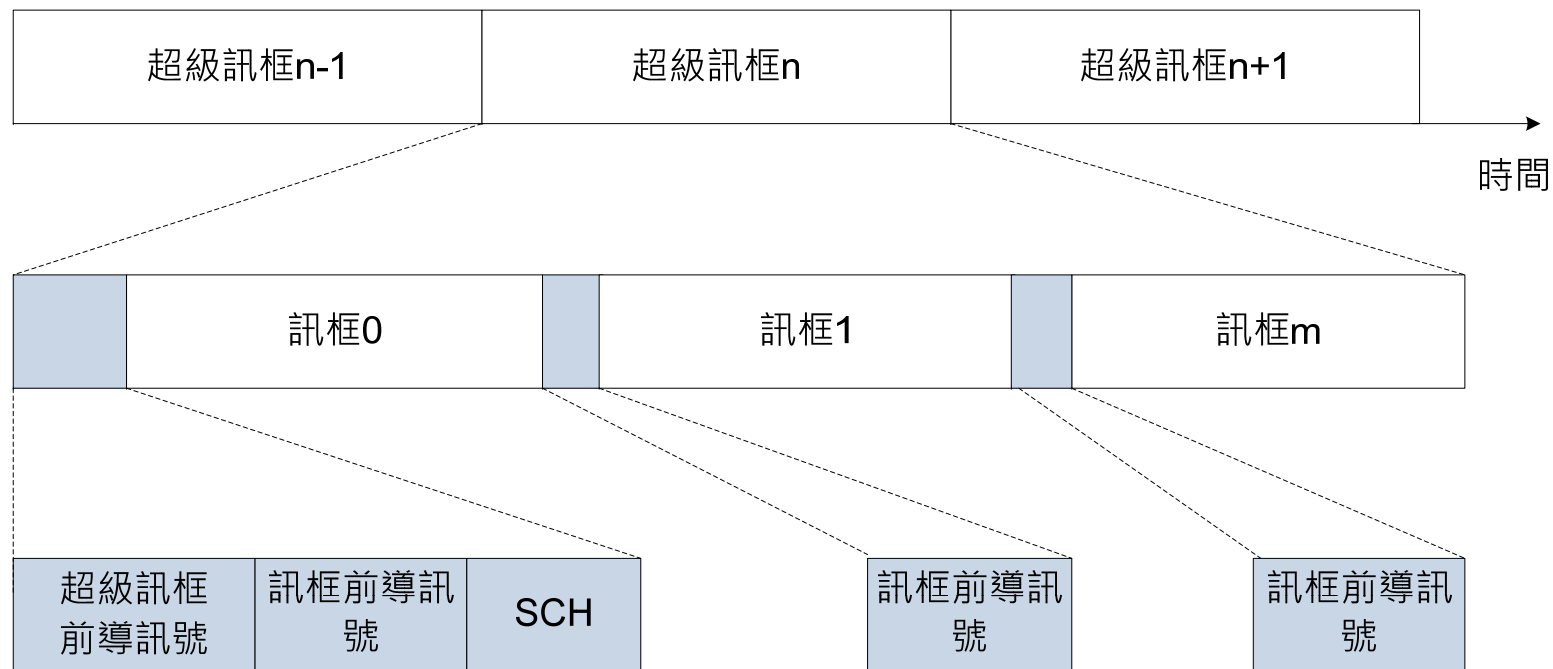
時槽式協定

- IEEE 802.22 [5] 是一個中控式的標準，利用基地台來控制頻譜的存取與分享，基地台負責管理自己所屬的細胞 (cell) 以及相關的SU。
- IEEE 802.22的MAC協定：
 - 下載 (Downstream簡稱為DS) 是採用分時多工 (Time division multiplexing) 的機制
 - 上傳 (Upstream簡稱為US) 則是採用依據要求而分配時槽的TDMA (Time Division Multiple Access) 機制

時槽式協定

- 訊框的階層式架構如圖10.8所示，最上層的是超級訊框 (Superframe)，每個超級訊框包含了好幾個由前導訊號 (Preamble) 帶頭的MAC層訊框所組成，每個超級訊框的開始控制表頭包含SU目前可用的頻道、不同頻寬的支援以及未來可存取頻譜的時間等資訊。

圖 10.8: IEEE 802.22 超級訊框的結構



時槽式協定

- MAC層的訊框包含DS與US子訊框，DS子訊框包含一個SU的封包資料，而US子訊框包含多個不同SU的封包資料，DS子訊框的前導訊號會處理同步以及頻道的評估，訊框的控制表頭包含DS-MAP與US-MAP的大小、頻道描述以及排程的資訊。
- IEEE 802.22的主要特色為廣泛的支援頻譜感測、頻譜復原並允許不同的使用者共存。

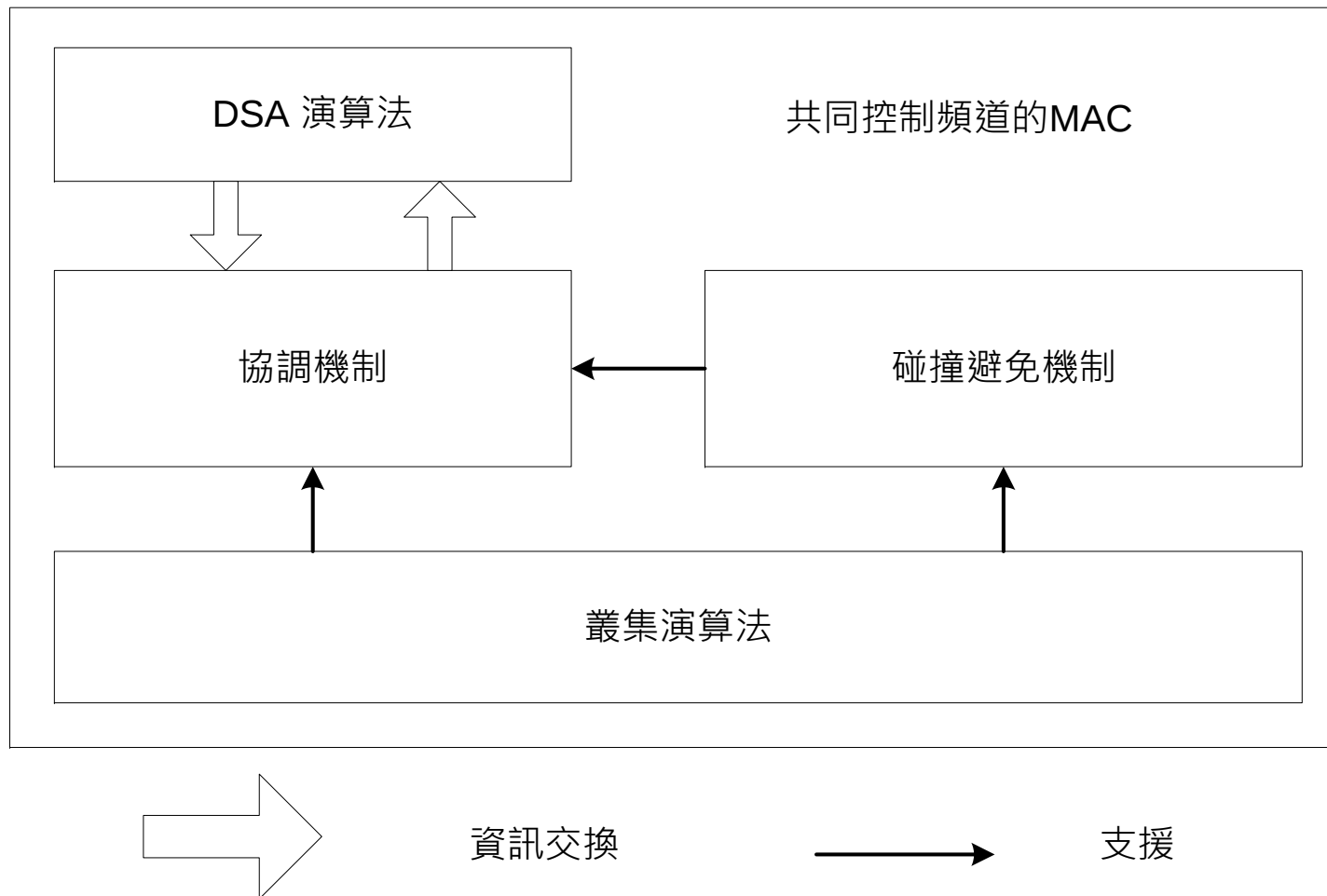
混合式協定

- 一個賽局理論的動態頻譜存取 (dynamic spectrum access) 協定，資料傳輸是在預先決定的時槽，而控制訊息則是採用隨機存取的機制，所以歸類為混合式的協定。
- 本協定採用叢集式的架構，賽局的策略是由位於叢集內的中控裝置管理。此MAC協定有高的頻譜使用率、無碰撞的頻譜存取而且能符合QoS的需求確保公平性。

混合式協定

- 這個協定的框架包含了DSA演算法、叢集演算法、協商機制以及碰撞避免等四個元件。DSA演算法利用賽局理論來讓SU可以避免碰撞、存取頻道並滿足QoS與公平的需求。
- 叢集演算法採用了六角形的叢集，每個叢集以位置當做識別代號 (identity)，節點通常會加入叢集中心離自己最近的叢集，本協定採用虛擬叢集頭 (virtual head簡稱為VH) 的觀念，帶有權杖 (token) 的封包為VH，VH會輪流傳遞給叢集內的節點以進行賽局。

圖 10.9: DSA-driven MAC 的框架



CR隨意網路的MAC協定

- 這類的協定通常沒有中控的裝置，所以有較佳的延展性(scalable)與佈署上的彈性，但是必須依靠鄰近節點的協調與交換資訊才能達成分散式的頻譜感測、共享與存取。
 - 隨機存取(Random Access)協定
 - 時槽式(time-slotted)協定
 - 混合式(Hybrid)協定

隨機存取協定

- 這個類別的MAC協定節點間通常不需要時間同步，而且通常是以CSMA/CA為基準。
- 這類協定包含：
 - Dynamic open spectrum sharing (DOSS) MAC
 - Distributed channel assignment (DCA) based MAC
 - Single radio adaptive channel MAC (SRAC)
 - Hardware constrained MAC

Dynamic Open Spectrum Sharing (DOSS)

- 動態開放頻譜共享(Dynamic Open Spectrum Sharing 簡稱為DOSS) MAC協定假設有三個無線傳送接收器分別負責控制、資料與忙碌聲調(Busy tone)的頻段
- 資料傳輸所用的頻帶會對應到忙碌聲調的頻帶，因此，當一個節點在一個給定的頻道傳送或接收資料時，其所對應的忙碌聲調頻帶也會發送忙碌的訊號
- DOSS MAC協定包含下列的步驟：
 - 設定三個運作的頻帶
 - 頻譜協調
 - 資料傳輸

Distributed Channel Assignment (DCA)

- 擴充IEEE 802.11的CSMA/CA協定
- 使用多個傳送接收器，並且有專屬的共同控制頻道用來發射訊號
- 協定的作業如下：
 - 維護頻譜資訊：每個節點會維護目前使用頻道列表 (Current Usage List簡稱為CUL) 以及空閒頻道列表 (Free Channel List簡稱為FCL) 等兩個資料結構
 - 資料傳輸：用RTS-CTS的握手機制

Single Radio Adaptive Channel (SRAC)

- 可以依據SU的需求動態的結合頻段
- 此協定採用類似分頻多工 (Frequency division multiplexing) 的機制，稱為跨頻通訊 (Cross-channel communication)，SU可用一個頻段傳送資料，而用另一個頻段接收資料
- 此協定的特色分別說明如下：
 - 動態的配置頻道 (Dynamic channelization)
 - 跨頻通訊：為了避免頻道的擁塞以及PU活動造成的干擾，SU可以分別使用不同的頻段來傳送與接收資料，SU可保留較大的頻段來傳送資料，而只保留較小的頻段來接收確認 (acknowledge) 的封包

Hardware Constrained (HC) MAC

- 考量硬體的限制之下如何有效的感測以及存取頻譜
- 硬體的限制包括單一傳送接收器運作上的限制、只擁有部分的頻譜感知能力以及頻譜匯集的限制等
- 感測時間的長短與感測的精確度是一種取捨
- 在只有一組傳送接收器的情形下，感測頻譜會減少資料的傳輸率
- 找出最佳的感測時間長度來獲得正確的感測結果

Hardware Constrained (HC) MAC

- HC-MAC的貢獻說明如下：
 - 感測決定 (Sensing decision)：本協定提出一套規則可以決定最佳的感測時間來獲得最大的資料傳輸率
 - 協定的運作 (Protocol operation)：HC-MAC包括競爭、感測與傳輸三個階段

時槽式 (Time-Slotted) 協定

- Cognitive MAC (簡稱為C-MAC) 協定是時槽式的MAC協定，C-MAC包含了匯聚頻道 (Rendezvous Channel簡稱為RC) 與備用頻道 (Backup Channel簡稱為BC) 兩個主要的觀念。
- 當PU出現，頻道被佔用時，可切換至備用頻道來使用。

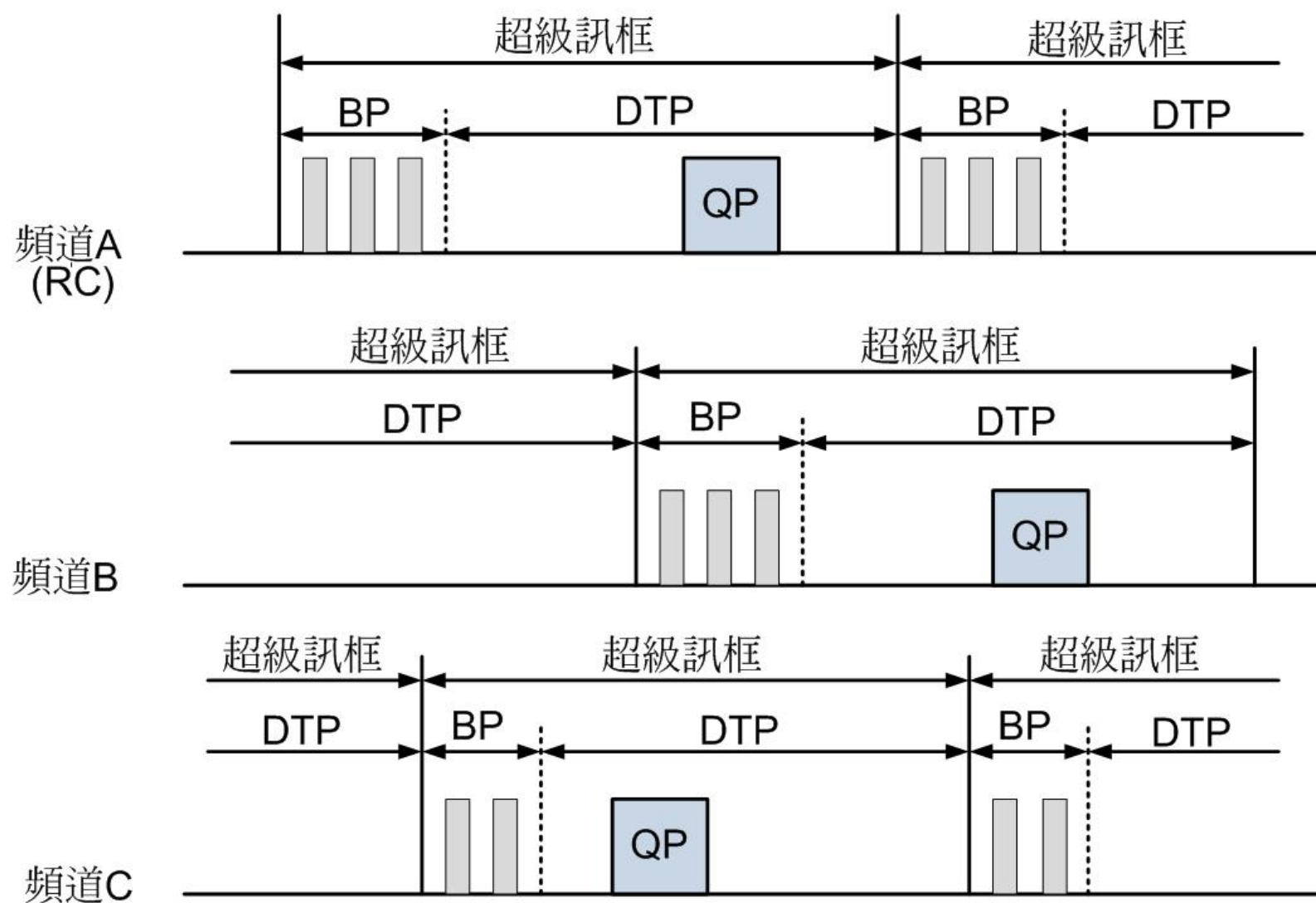
時槽式 (Time-Slotted) 協定

- 網路中最長時間不會被佔用或干擾的頻道會被挑選為RC，RC可用來
 - 協調節點
 - 發現鄰居
 - 分享每個頻帶的負載資訊
 - 交換排程資訊
 - 偵測PU
 - 預約多重頻道的資源

時槽式 (Time-Slotted) 協定

- 圖10.10所示為C-MAC在多頻道環境下超級訊框 (superframe) 的結構圖，在C-MAC每個頻帶會被切割成重複出現的超級訊框，每個超級訊框包含了信標時段 (Beacon Period簡稱為BP) 與資料傳送時段 (Data Transfer Period簡稱為DTP)。
- 當SU開啟電源時，會先掃描所有的頻帶，來決定可用的頻帶，在這些可用的頻帶中如果有聽到信標，便可選擇加入這個RC所屬的群組。

圖 10.10: C-MAC 多頻道下超級訊框的結構



時槽式 (Time-Slotted) 協定

- C-MAC的工作方式如下所述：
 - 分散式的信標 (Distributed beacon)：每個BP被切割為數個時槽，讓每個SU可以發送信標而不會受到干擾，若SU將搜集到的鄰居信標再次廣播，則可搜集到超過通訊範圍內的鄰居資訊
 - 頻道間的協調 (Inter-channel coordination)：SU會週期性的切換至RC來發送信標、時間同步以及蒐集鄰居的資訊，當SU要使用某個頻段或切換頻段時，也會在RC告知其他的SU。

時槽式 (Time-Slotted) 協定

- 共存 (Coexistence)：時槽的特性，讓C-MAC可以設定沒有重疊的安靜時段 (Quiet period) 以便正確的偵測PU的出現，而PU出現的訊息則可透過信標，可靠的告知其他的SU，此時，其中一個BC便會被挑選來頂替被佔用的頻道
- 負載平衡：由於信標帶有預約頻道來傳輸的資訊，因此根據交通負載的統計資訊，可以用來平衡每個頻帶的負載。

混合式協定

- Opportunistic spectrum MAC (OS-MAC)
- Synchronized MAC(SYN-MAC)
- Opportunistic MAC

Opportunistic spectrum MAC (OS-MAC)

- OS-MAC的運作方式如下：

- 網路初始化的階段 (Network initialization phase)：希望相互通訊的SU會構成叢集，新的SU可以選擇加入已存在的叢集或自己形成一個叢集
- 對話初始的階段 (Session initialization phase)：每個叢集的活動代表 (Active delegate) 會與其他成員溝通來挑選叢集的通訊頻段

Opportunistic spectrum MAC (OS-MAC)

- ❑ 資料通訊的階段 (Data communication phase)：叢集的成員使用IEEE 802.11的DCF機制來存取頻道
- ❑ 更新階段 (Update phase)：每個叢集的代表會利用共同控制頻道送出自己所屬叢集的交通資訊給鄰近叢集的代表
- ❑ 挑選階段 (Select phase)：當蒐集到鄰近叢集的頻譜使用統計資訊，叢集代表可以起始改變叢集的使用頻帶
- ❑ 派遣代表的階段 (Delegate phase)：下一個回合時，會派遣叢集中的另一個SU來接替原來的叢集代表

Synchronized MAC (SYN-MAC)

- 第二種類別為Synchronized MAC (SYN-MAC)[13]，SYN-MAC協定並不需一個共同的控制頻道，但是有一個專屬的傳送接收器來傾聽控制訊息，第二個傳送接收器則是用來傳送接收資料。

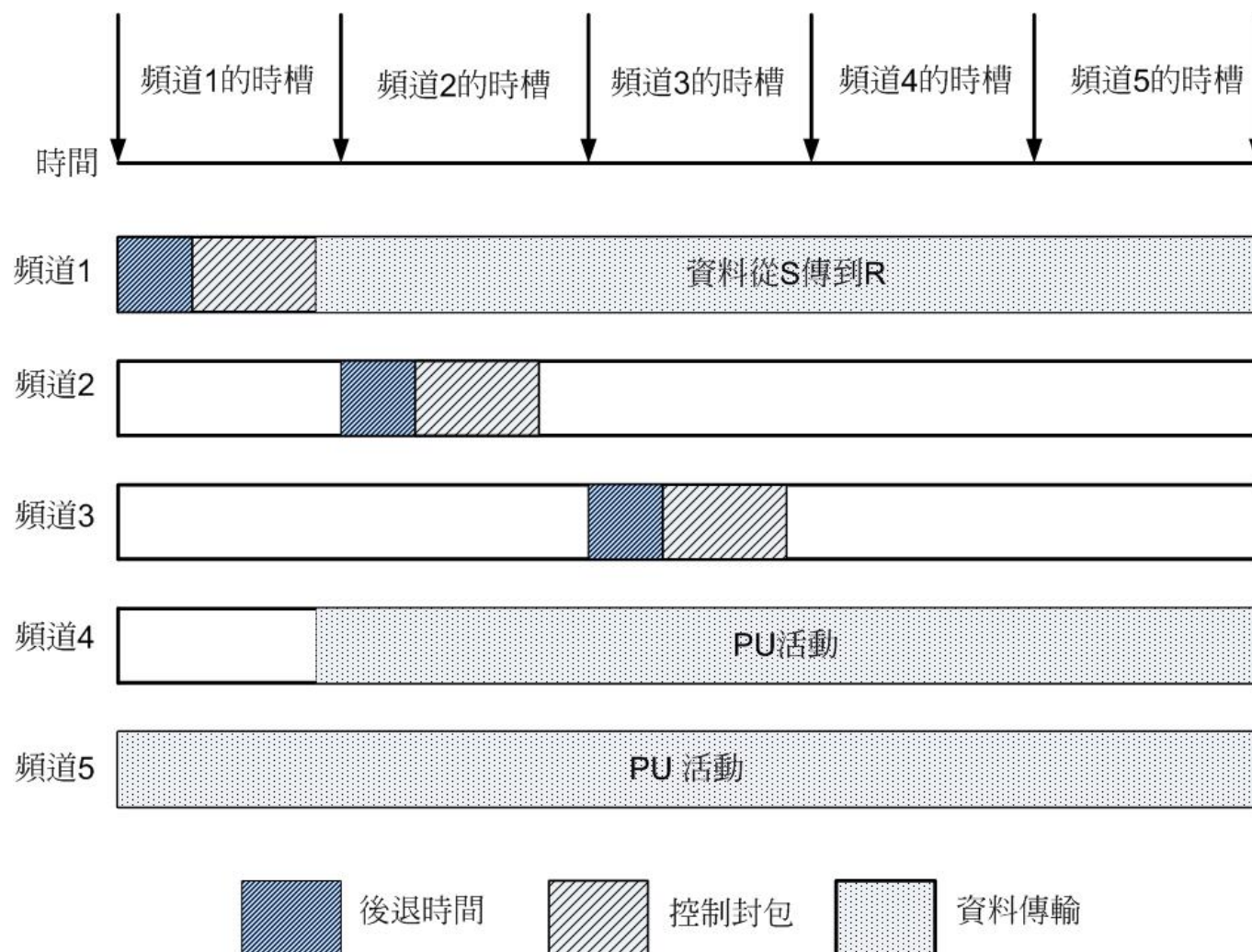
Synchronized MAC (SYN-MAC)

- SYN-MAC的主要做法如下：
 - 將時間切割成時槽，每個時槽代表一個資料頻道，只要沒有控制訊號，資料可在任何適當的頻道與時槽傳送
 - 控制訊號發送的頻道則隨著時間而改變，有點類似慢速的跳頻，在每個時槽的開始，SU會將控制訊號專用的傳送接收器切換到控制訊號在該時槽專屬的頻道
 - 如果有使用者想要傳送資料，會在此頻道發送信標，接收者在收到信標後，會回覆自己的可用頻道列表，而接下來的通訊則會從可用頻道列表中挑選的頻道來進行

Synchronized MAC (SYN-MAC)

- 圖10.11所示為SYN-MAC中控制以及資料封包的傳送例子，假設有5個時槽，每個時槽代表一個頻道，假設有兩個SU分別為S與R想要通訊，假設S的可用頻道為{1,2,5}，R的可用頻道為{1,3,5}，節點S挑選頻道1當做通訊的頻道，節點S等待頻道1可以傳送控制訊號的時槽到來，然後採用類似IEEE 802.11 DCF的機制，等待一個隨機後退時間後，開始競爭頻道的使用，如果競爭成功則可以開始傳送資料。

圖 10.11: SYNC-MAC 控制以及資料封包的傳送



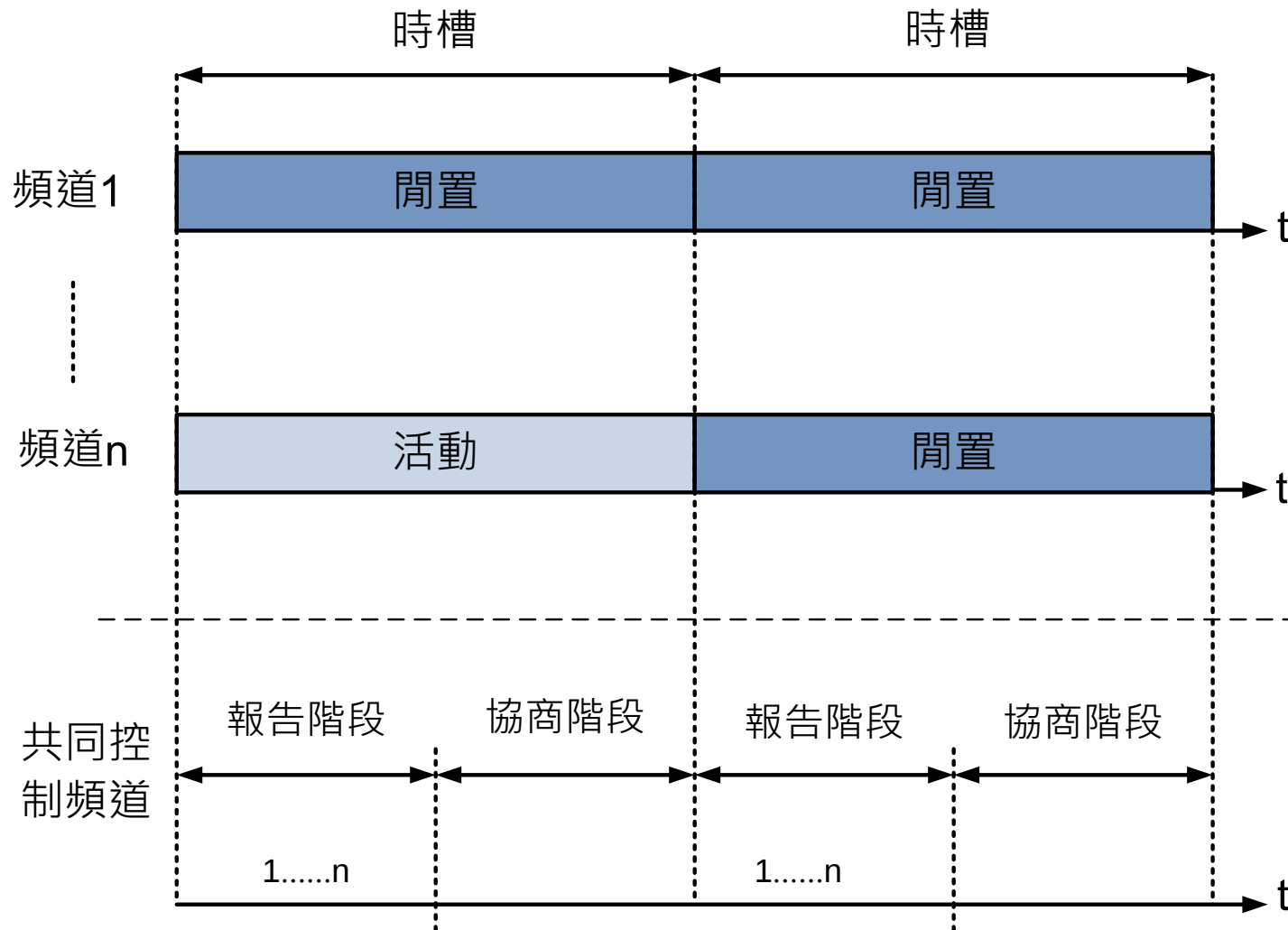
Synchronized MAC (SYN-MAC)

- 另一個例子是假設節點A、B與C的可用頻道分別為{1,2}、{2,4}與{2,3}，假設節點A與C為節點B的鄰居，如果節點B感測到PU目前正在使用頻道4，節點B必須送出控制封包來告知節點A與C其可用頻道已經改變，節點B等到頻道2的專屬時槽的到來，然後等待一個隨機後退時間 (backoff time) 後，利用頻道2傳送訊息給節點A與C。

Opportunistic MAC

- 使用兩個傳送接收器，一個傳送接收器是針對共同控制頻道，另一個則可以動態的調整到任何選定的頻帶，如圖10.12所示。
- 有執照的頻道切割為一個個的時槽用來傳輸資料，而共同控制頻道則是在報告階段 (Reporting phase) 切割為時槽，跟在後面的協商階段 (Negotiation phase) 則為隨機存取。

圖 10.12: Opportunistic MAC 的工作原理



Opportunistic MAC

- 共同控制頻道包含兩個階段：
 - 報告階段(Reporting phase)：報告階段切割為 n 個小時槽，其中 n 為頻道的個數，在每個時槽的開始，SU會感測其中一個頻道
 - 協商階段(Negotiation phase)：在協商階段，SU藉由以競爭為基礎的演算法來協商

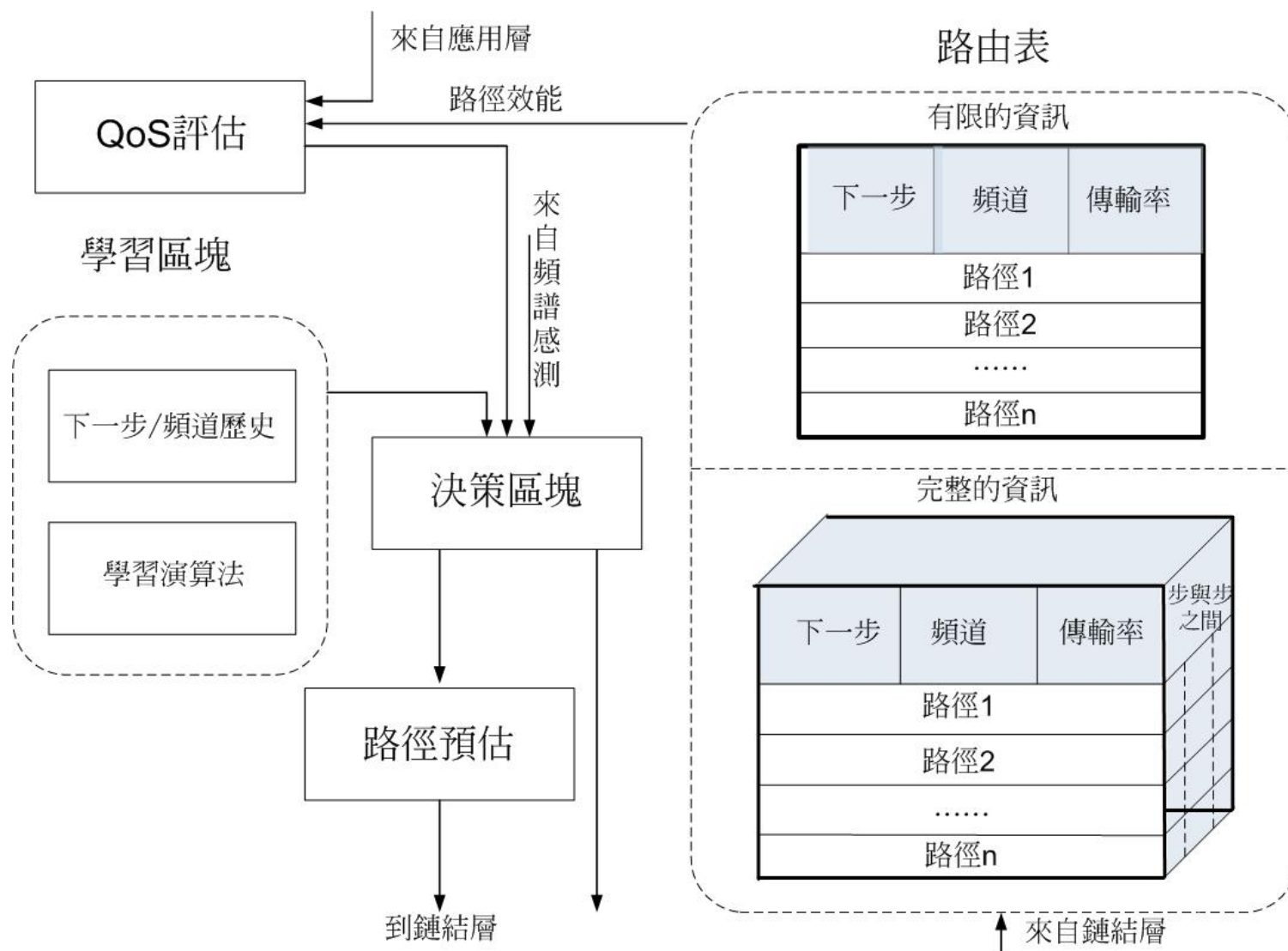
感知無線電網路的路由協定

- 典型的隨意路由表只記錄下一步的資訊，而對於CR網路，路由表則必須擴充以便包含頻道、傳輸率、調變等與每一條鏈結相關的資訊
- 頻道的切換會造成一些延遲，因而影響到端點對端點通訊的效能

感知無線電網路的路由協定

- 感知無線電網路的路由協定依據獲得的支援不同分為
 - 頻譜決定 (Spectrum decision)
 - 結合頻譜決定與PU感知 (PU awareness)
 - 結合頻譜決定與重新組態 (Re-configurability)

圖10.13: 感知無線電網路上路由協定的架構



具備頻譜決定的路由協定

- MSCRP (Multi-hop single-transceiver CR routing protocol)：具有頻譜感知能力且沒有共同控制頻道的路由協定，作者提出一個依據延遲分析而設計的頻道分配演算法，此演算法的目標在於改進鏈結的使用率，並在切換頻道的代價與獲得的傳輸效益之間取得一個平衡點

具備頻譜決定的路由協定

- Delay-sensitive resource management in multi-hop cognitive radio networks：分散式資源管理的演算法讓網路中的節點可以交換資訊，此演算法將多跳式的感知無線電網路中交換資訊的延遲與花費列入考慮，網路節點具備了動態利用可用頻道以及根據交換資訊學習網路環境的能力

具備頻譜決定的路由協定

- Probabilistic path selection in opportunistic cognitive radio networks:每個鏈結 (link) 的權重是依據機率來計算的，鏈結上每個可用頻道被PU干擾的機率、接收到的訊號強度以及PU佔用的比率都會列入計算。
- SU會計算自己到可能的目的地的預期延遲，然後採用距離向量 (Distance-vector) 的機制來決定每一步該如何走以形成最佳路徑。

具備頻譜決定與PU感知的路由協定

- CR網路的路由協定必須避免干擾到正在進行通訊的PU，因此，路徑選擇時應儘量避開PU高頻率活動的區域。
- 以路徑為中心的頻譜分配架構 (Path-centric spectrum assignment framework簡稱為Cog-Net) 針對每個節點建構一個多層的圖，每一層對應到一個頻道，而SU則是圖中的節點。

具備頻譜決定與PU感知的路由協定

- 垂直的邊代表一個節點可切換的多個頻道，如果一個節點可以透過某個頻道與別的節點通訊，則這兩個節點間會有一條水平的邊連接這兩個點。
- 垂直邊的權重代表頻譜切換所需的時間，水平邊的權重則代表頻譜存取的延遲。

具備頻譜決定與PU感知的路由協定

- 最小權重路由協定 (Minimum Weight Routing Protocol簡稱為MWRP) 所針對的架構是每個SU都配備有針對不同無線通訊技術的傳送接收器如IEEE 802.11或蜂巢式無線通訊標準。每個傳送科技都會賦予權重，此權重與涵蓋距離成正比。
- 此路由協定的目標在於挑選適當的節點與傳送系統以便找出一條累加權重最小的路徑，可以用最小的代價將訊息送達目的地。

具備頻譜決定與重新組態的路由協定

- 當PU來臨而造成頻譜的改變時，這類的路由協定有能力復原路徑。
- SPEAR (Spectrum-aware routing protocol) 協定在路徑建立的階段會辨識好幾條可用的路徑，目的節點會挑選最終運作的路徑，而路徑上每一條鏈結所用的頻道也是在這個階段保留的。如果區域性的調整失敗，則SPEAR協定會從來源端重新啟動路徑建立的程序。

具備頻譜決定與重新組態的路由協定

- STOD-RP (Spectrum-Tree based On-Demand routing protocol) 協定藉由在每個頻帶建立頻譜樹 (Spectrum-tree) 來簡化頻譜決定與路徑選擇之間的合作，偵測到最多的可用頻譜或是有最長頻譜可用時間的節點會成為此頻譜樹的樹根。

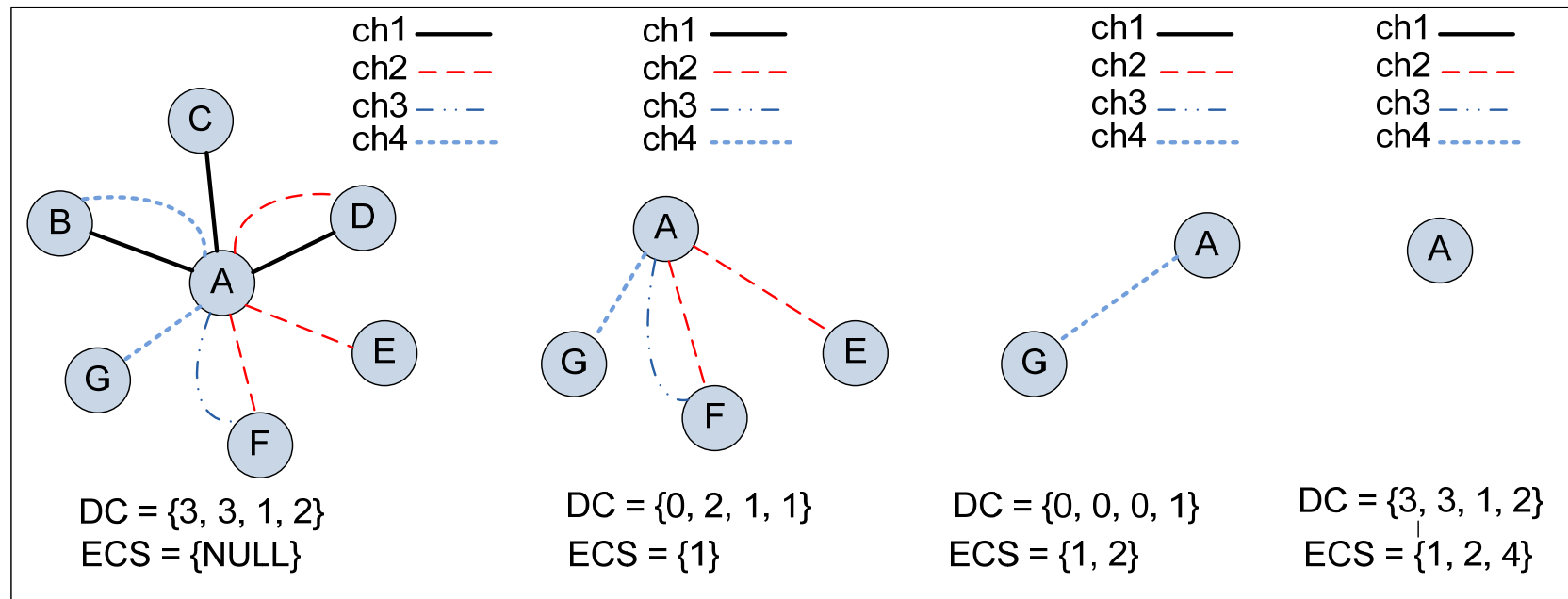
具備頻譜決定與重新組態的路由協定

- STOD-RP協定結合了樹狀主動式的路由以及請求式 (on-demand) 的路徑發現機制。
- 挑選路徑的衡量指標包含SU的QoS需求以及PU的活動統計資訊。
- SRREQ (Spectrum RouteRequest) 封包包含了衡量指標，目的節點可依據累計的衡量指標來挑選最佳的路徑。

感知無線電網路的廣播與群播協定

- 在感知無線電網路每個節點可使用的頻道並不是固定不變的，如果對所有可用的頻道廣播所造成的延遲與代價又太高。
- 因此，必須利用感測到的頻譜資訊，來設計更有效率的廣播排程。
- 重要的廣播與群播協定：
 - 選擇廣播 (Selective Broadcasting)
 - 最小時間廣播 (Minimal Time Broadcasting)
 - 群播通訊 (Multicast Communications)

圖10.14: 選擇廣播協定中挑選必要頻道集合



選擇廣播

- 選擇廣播 (Selective Broadcasting) 協定會先蒐集鄰居的頻譜使用狀態，然後先挑選可以覆蓋最多節點的頻道加入必要頻道集合 (Essential Channel Set簡稱為ECS)，此程序會一直持續直到所有的節點都被覆蓋為止，而後再依據頻道涵蓋節點數的多寡，依序對ECS中的頻道廣播。

選擇廣播

- 圖10.14是選擇廣播協定挑選必要頻道集合的過程，其中DC (Degree of Channel) 代表每一個頻道的分支度 (即此頻道所能涵蓋的節點數)，圖中節點A要廣播訊息給鄰居，DC的初值為 $\{3,3,1,2\}$ ，其中頻道1的分支度最高，所以先將頻道1加入ECS。
- 移除已被頻道1涵蓋的節點，重新計算DC的結果為 $\{0,2,1,1\}$ ，此時頻道2的分支度最高，因此將頻道2加入ECS，最後再將頻道4加入ECS，DC變為 $\{0,0,0,0\}$ 代表所有A的鄰居節點都被涵蓋，之後節點A便可依序分別在頻道1,2,4廣播。

最小時間廣播

- 針對以TDMA為基礎的感知無線電網路提出了一個最短時間的廣播排程。廣播的排程是由來源節點計算與發起的，來源節點知道網路的拓樸與每個節點可用頻道的資訊。
- 用整數線性規劃(Integer Linear Programming簡稱為ILP)的公式來計算廣播的最佳排程，但是此ILP公式的計算要耗費很多時間。

最小時間廣播

- 兩個啟發式 (Heuristic) 的演算法：

- 第一個演算法給予每個節點優先順序，位於從來源節點到最遠節點最短路徑上的節點擁有比較高的優先權，此演算法包含兩個階段，第一個階段依據節點與來源節點的距離將每個節點分階層，然後針對每一階層挑選傳送節點、接收節點與使用的頻道。第二階段將這些傳送的設定分派到每一個時槽
- 第二個演算法針對每一個時槽挑選傳送節點與傳送頻道，讓最多的接收節點可以被服務而又不會造成碰撞。在每一個時槽從已經擁有訊息的節點中挑選傳送節點，希望以最少的傳送節點涵蓋最多還沒有收到訊息的節點而又不會造成碰撞

群播通訊

- 目標在最小化所需的網路資源來滿足每組群播的會談 (session) 所需的資料傳輸率
- 以跨層式的策略將排程與路由合併考量，並將此問題公式化為混合整數線性規劃 (Mixed-integer linear program)，並提出了一個多項式時間複雜度的演算法來解決此問題

群播通訊

- 在CR網路中，每個CR節點 i 可以感測自己與欲傳輸節點 j 之間的所有路徑，藉由不同的路徑創造不同節點間連接的session，因此每一個目標節點可能成為別的session的中繼節點
- 為預防多個傳輸在相同的頻道發生，造成流量過大的，依據每個鏈結計算傳輸流量，若超過設定的界限值，則尋找下一條可能的路徑做傳輸，藉此達到增加傳輸到達率的效果

感知無線電網路與賽局理論

- 賽局理論 (game theory) 是一種數學工具用來分析許多決策者的策略互動，最早的賽局理論可用來發現兩人零和遊戲的解答
- 合作性的賽局理論出現，可用來分析一群個體的最佳策略，讓他們可以相互改進他們在遊戲中的狀態
- 納許均衡 (Nash equilibrium) 的提出讓非合作性 (Non-cooperative) 的賽局理論往前邁進了一大步

感知無線電網路與賽局理論

- 在賽局理論的框架中研究感知無線電網路的重要性
 - 藉由建立網路使用者 (包含PU與SU) 動態頻譜共享的賽局模型，網路使用者的行為可以藉由正規化的賽局結構來分析
 - 賽局理論提供我們頻譜分享最佳化的許多標準
 - 非合作性的賽局理論是賽局理論中一個最重要的分支，讓我們可以針對動態頻譜共享問題，僅使用鄰近的資訊便可推導出有效率的分散式方法

賽局理論的分類

- 非合作式賽局與納許均衡 (Non-cooperative and Nash equilibrium)：假設網路上的使用者大多是自私而且只專注於最大化本身頻譜的使用
- 經濟賽局、拍賣賽局與機制設計 (Economic games, auction games, and mechanism design)：包含頻譜的定價與拍賣，在頻譜市場裡，頻譜資源被當做像是貨品一樣被交易
- 合作賽局 (Cooperative games)：在合作頻譜分享賽局中，網路使用者針對如何使用與分配頻譜資源達成協議
- 隨機賽局 (Stochastic games)：在隨機頻譜分享賽局中，網路使用者根據環境的改變與其他使用者的策略調整自己的策略

非合作式賽局與納許均衡

- 納許均衡 (Nash Equilibrium 簡稱為NE) 是瞭解非合作賽局理論的重要觀念，當有兩位或更多的使用者互動的做出他們的決策，假設所有的玩家都將別的玩家決策列入考量而採用最佳的策略，最後達成的均衡狀態便是NE。

非合作式賽局與納許均衡

- 當存在多種均衡狀態時，就必須從中挑選較佳的均衡，佩瑞羅最佳化 (Pareto optimality) 可用來協助剔除一些較差的均衡，而一些精鍊 (Refinement) 的方法可以用來縮減賽局可能的結果，剔除一些不可能的行為。

非合作式賽局與納許均衡

- NE常常因為自私玩家的過度競爭而受害造成賽局的結果沒有效率。包含使用定價策略、重複賽局公式化(Repeated game formulation)與關聯式的均衡(Correlated equilibrium)等方法可以用來改進NE的效率。
- 通常玩家是市場裡的買家也是賣家，玩家的目標是最大化收益。

經濟賽局、拍賣賽局與機制設計

- 將經濟賽局應用到感知無線電網路的理由如下：
 - 經濟模型適用於SU頻譜的市場，在此市場中，PU可以出售未使用頻譜的使用權給SU。PU扮演賣家，有動機去出售暫時沒用到的頻譜來換取金錢上的收益，而SU扮演買家，也許想要付錢來使用頻譜資源傳送資料。
 - 經濟學上的賽局並不只局限於應用在買家與賣家的情境，也可擴展應用到其他感知無線電網路的情境。
 - 感知無線電網路要成功必須結合科技、策略與市場，從經濟的觀點來了解感知無線電網路並發展有效的程序(如拍賣機制)來管理頻譜的市場是非常重要的。

合作賽局

- 在合作頻譜分享賽局中，網路使用者達成了公平而有效率的分享頻譜資源協議。
- 重要的合作頻譜分享賽局有兩種分別為議價賽局 (Bargaining game) 與聯合賽局 (Coalitional game)。
- 議價賽局是一種有趣的合作賽局，每個人都有機會與他人達成互利的協議。
- 在這個賽局中，個別的玩家都有利益上的衝突，除非玩家同意否則無法達成協議。
- 聯合賽局則描述了一組玩家可以與其他玩家形成合作群組來改進大家的收益。

隨機賽局

- 隨機賽局考慮了不同代理人之間的相互競爭，是馬可夫決策程序(Markov Decision Process簡稱為MDP)的延伸
- 在隨機賽局中有一組狀態(State)的集合以及行動集合(Action set)的收集Ccollection)，每位玩家有一組行動集合
- 賽局會持續進行一定的階段數，每位玩家會嘗試著去最大化目標函數(Objective function)，目標函數可以被定義為折扣收益的預期總和

隨機賽局

- 賽局是一序列的階段所構成的，在開始的階段，賽局處於某種狀態，當玩家選擇執行他們的行動時，賽局會依據某個機率轉移到一個新的隨機狀態，轉移的機率是依據目前的狀態與每一位玩家的行為所決定的。
- 此時，每位玩家會獲得一些收益，此收益是依據目前的狀態與選擇的行為而決定的。

本章回顧

- 介紹了感知無線電網路以及其重要的子類別-感知無線電隨意網路，並比較了行動隨意網路與感知無線電隨意網路的不同。
- 在頻譜不足而免費頻道擁擠的環境中感知無線電網路成了提昇頻譜的使用率並提升通訊的品質與效能的最佳解決方案。
- 在感知無線電網路中，頻譜感知與頻譜管理是非常重要的作業。
- 賽局理論在感知無線電網路上的應用，其目的在於希望所有的玩家(可能包含SU與PU)都能獲得最大的收益。

習題

1. 請說明感知無線電網路由哪些成員所構成？其特性為何？(10-1)
2. 請說明感知無線電隨意網路與行動隨意網路有何異同。(10-2)
3. 頻譜管理的功能有哪些？(10-3)
4. 依據存取媒體的方式不同，感知無線電隨意網路的媒體存取控制協定分為哪三類？各有何特色？(10-4)

習題

5. 請畫圖說明感知無線電網路上路由協定的架構。(10-5)
6. 請說明選擇廣播與最小時間廣播的運作方式。(10-6)
7. 賽局理論應用在頻譜分享上共分為哪四類，請說明之。(10-7)

參考文獻

1. Y. Yuan, “Cognitive Radio Networks: From System and Security Perspectives”, Google Inc.
2. Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Kaushik R. Chowdhury, “CRAHNS: Cognitive radio ad hoc networks”, Journal of Ad Hoc Networks, 2009
3. C Cormio, KR Chowdhury, “A survey onMAC Protocols for Cognitive Radio Network,”. Journal of Ad Hoc Networks, Volume 7, 2009, pp. 1315–1329

參考文獻

4. S.-Y. Lien, C.-C. Tseng, K.-C. Chen, “Carrier sensing based multiple access protocols for cognitive radio networks,” in: Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), May 2008, pp. 3208–3214.
5. C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, S. Shankar, “IEEE 802.22: The first world-wide wireless standard based on cognitive radios,” in: Proceedings of IEEE DySPAN, November 2005, pp. 328–337.

參考文獻

6. C. Zhou, C. Chigan, “A game theoretic DSA-driven MAC framework for cognitive radio networks,” in: Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), May 2008, pp. 4165–4169.
7. L. Ma, X. Han, C.-C. Shen, “Dynamic open spectrum sharing for wireless ad hoc networks,” in: Proceedings of IEEE DySPAN, November 2005, pp. 203–213.
8. P. Pawelczak, R. Venkatesha Prasad, Liang Xia, Ignas G.M.M. Niemegeers, “Cognitive radio emergency networks – requirements and design,” in: Proceedings of IEEE DySPAN, November 2005, pp. 601–606.

參考文獻

9. L. Ma, C.-C. Shen, B. Ryu, “Single-radio adaptive channel algorithm for spectrum agile wireless ad hoc networks,” in: Proceedings of IEEE DySPAN, April 2007, pp. 547–558.
10. J. Jia, Q. Zhang, and X. Shen, “HC-MAC: a hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, pp. 106–117.

參考文獻

11. C. Cordeiro, K. Challapali, “C-MAC: A cognitive MAC protocol for multichannel wireless networks,” in: Proceedings of IEEE DySPAN, April 2007, pp. 147–157.
12. B. Hamdaoui, K.G. Shin, “OS-MAC: an efficient MAC protocol for spectrum-agile wireless networks,” IEEE Trans. Mobile Comp. 7 (8) (2008) 915–930.
13. Y.R. Kondareddy, P. Agrawal, “Synchronized MAC protocol for multihop cognitive radio networks,” in: Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), May 2008, pp. 3198–3202.

參考文獻

14. H. Su, X. Zhang, “Opportunistic MAC protocols for cognitive radio based wireless networks,” in: Proceedings of Annual Conference on Information Sciences and Systems, March 2007, pp. 363–368.
15. H. Ma, L. Zheng, X. Ma, Y. Luo, “Spectrum-aware routing for multi-hop cognitive radio networks with a single transceiver,” in: Proceedings of the Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom), 15–17 May 2008, pp. 1–6.

參考文獻

16. H.-P. Shiang, M. van der Schaar, “Delay-sensitive resource management in multi-hop cognitive radio networks,” in: Proceedings of the IEEE DySPAN, October 2008.
17. H. Khalife, S.S. Ahuja, N. Malouch, M. Krunz, “Probabilistic path selection in opportunistic cognitive radio networks,” in: Proceedings of the IEEE Globecom, November 2008.

參考文獻

18. Y. Xi, E.M. Yeh, “Distributed algorithms for spectrum allocation, power control, routing, and congestion control in wireless networks,” in: Proceedings of the ACM MobiHoc, September 2007, pp. 180–189.
19. C.W. Pyo, M. Hasegawa, “Minimum weight routing based on a common link control radio for cognitive wireless ad hoc networks,” in: Proceedings of the International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), August 2007, pp. 399–404.

參考文獻

20. A. Sampath, L. Yang, L. Cao, H. Zheng, B.Y. Zhao, “High throughput spectrum-aware routing for cognitive radio based ad hoc networks,” in: Proceedings of the International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), May 2008.
21. G. Zhu, M.D. Felice, I.F. Akyildiz, “STOD-RP: a spectrum-tree based ondemand routing protocol for multi-hop cognitive radio networks,” in: Proceedings of the IEEE Globecom, November 2008.

參考文獻

- 22. Yi Song And Jiang Xie, "Selective Broadcasting In Multi-hop Cognitive Radio Networks", IEEE Sarnoff Symposium, 2008, pp. 1-5.
- 23. Chanaka J. Liyana Arachchige, S. Venkatesan, R. Chandrasekaran, and Neeraj Mittal, "Minimal Time Broadcasting In Cognitive Radio Networks", Distributed Computing And Networking, 2011.

參考文獻

- 24. C. Gao, Y. Shi, Y. T. Hou, H. D. Sherali, H. Zhou, "Multicast Communications in Multi-Hop Cognitive Radio Networks," IEEE Journal on Selected Areas In Communications, 2011, pp.784-793.
- 25. B. Wang, Y. Wu, K.J. R. Liu, "Game theory for cognitive radio networks: An overview," Computer Networks, 2010, pp. 2537-2561.