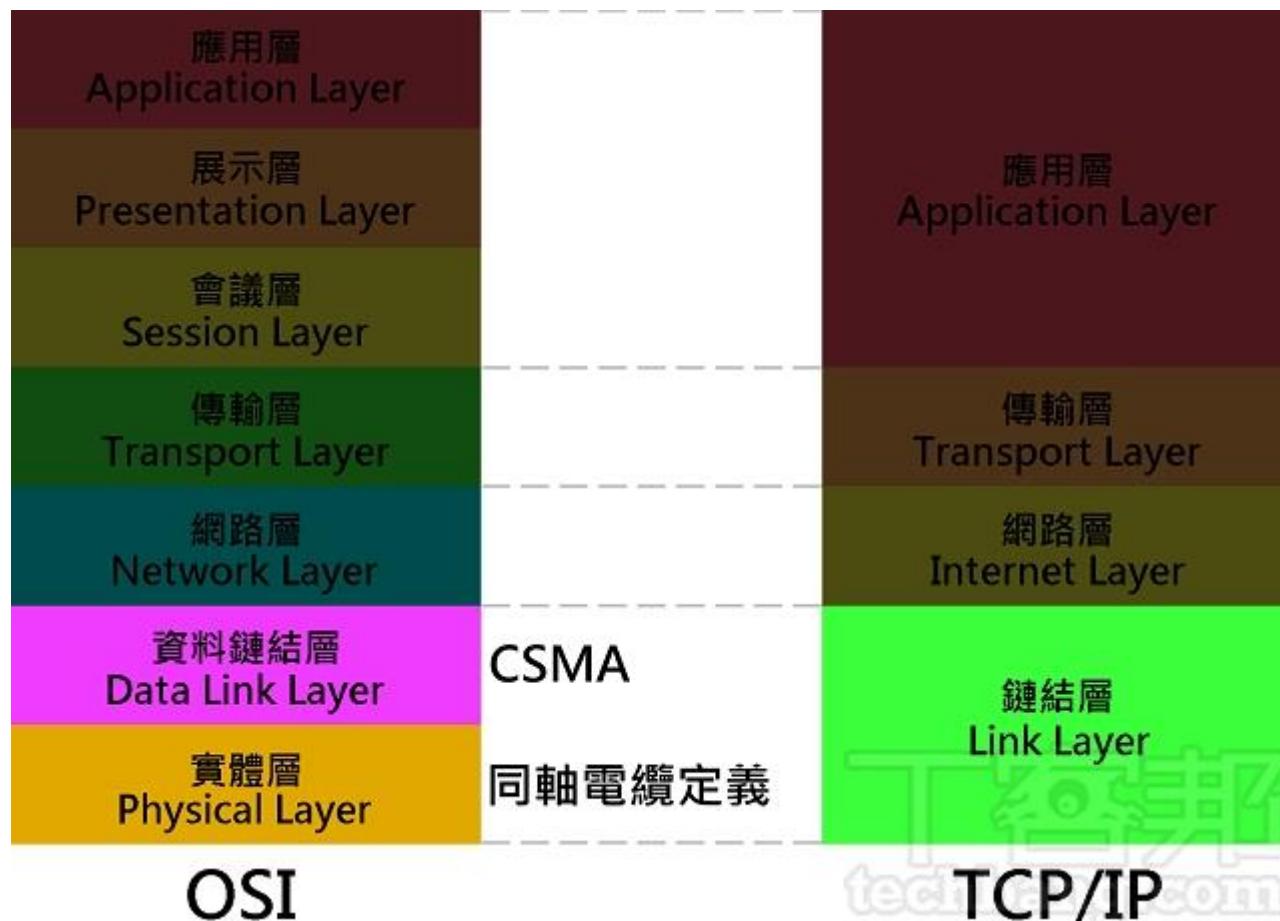


## 網路架構大概論 4— 網路底層的訊框傳送法則

這次我們走入網路的更底層，TCP/IP 網路模型的第一層或是 OSI 網路模型的第二層，了解訊框實際上在有線和無線網路上傳輸的策略，此部分已相當接近網路傳輸的最底層，再下去就是將訊框轉換為電氣/光學規格在媒體上傳送。



▲CSMA 和同軸電纜在網路分層架構的對應關係

### 802.3

上次講完 IP，此次就是更底層的網路傳輸方式，在 OSI 網路架構屬於 L2 資料鏈結層的 CSMA（Carrier Sense Multiple Access，載波偵測多重存取）載波偵測多重存取網路通訊協定，定義在 IEEE 802.3 當中。由於當時主要的實體傳輸媒介為同軸電纜，也就是你家電視接收無線或有線電視訊號的那條電纜，IEEE 802.3 也就把同軸電纜一同定義成為 OSI 架構的 L1 實體層，CSMA 和同軸電纜也就正好對應 TCP/IP 模型的 L1 鏈結層。不過因為現今主流傳輸媒介為 RJ-45 雙絞線，同軸電纜的部分只會跟著 CSMA 稍微提到一些。

現在的 LAN (Local Area Network) 大多都脫離不了 IEEE 802.3 的標準範疇，由於 802.3 下面還有許多更改版規格，我們先從最基礎的功能開始談起，也就是以同軸電纜作為連結媒介，傳輸速度最大只有 10Mbps 的原始版本。

## CSMA

IEEE 802.3 使用了一種稱為 CSMA 的技術作為核心，因為在較為早期的網路，線材作為匯流排看待，任何連上此網路匯流排的電腦都可以在其上傳輸資料；但就像菜市場攤販叫賣一樣，大家同時說話很容易聽不清楚芹菜 1 把 10 元、西瓜買一送一的特價資訊，電腦也需要有一套傳輸規則，避免大家同時傳輸資料造成錯誤，而此規則就是 CSMA。

CSMA 載波偵測多重存取的規則就像其名稱一樣，為了避免在其它電腦傳輸資料時造成干擾，當某台電腦想要傳輸時，會先監聽傳輸媒介是否正在使用，如果沒有其它電腦正在傳輸，代表線路目前是空閒狀態可立即使用；如果監聽的結果是線路正在使用，則持續保持監聽狀態，直到線路空閒，這就是 CS (Carrier Sense) 的由來。

另外一方面，由於大家都位在同一匯流排上，當某部電腦正在傳送資料時，則所有位於匯流排上的電腦都會接收到這份資料，電腦處理與否的關鍵在於傳送訊框表頭所包含的 MAC (Media Access Control) 位址是否跟自己相符，如果兩者一致就接收下來進行後續的處理，不同就表示這份資料不是給我的，不進行處理；這種同一匯流排可供多台電腦存取的特性，就是 MA (Multiple Access) 的由來。

## CSMA/CD

實際上在傳輸訊框時，僅使用 CSMA 策略會造成傳輸速率下降，因為它沒有辦法確保多台電腦在同一時間，傳輸資料時所造成的訊框碰撞現象。因為在此之前監聽發現沒有電腦使用網路，多台電腦同時以為線路是空閒狀態，進行傳輸時就會造成訊號重疊在一起，接收方無法正確收到訊框。所以實際應用加入了 CD (Collision Detection) 變成 CSMA/CD，對於碰撞的發生進行偵測並處理，提高線路傳輸效率。基本策略與 CSMA 相同，如果線路目前是空閒狀態，則可以進行傳輸工作，但不同的是傳輸工作進行時，偵測工作也同時進行著，如果傳輸中偵測到了不是自己所送出的訊號，就立刻停止自己的傳輸工作，進入碰撞偵測的後續處理。

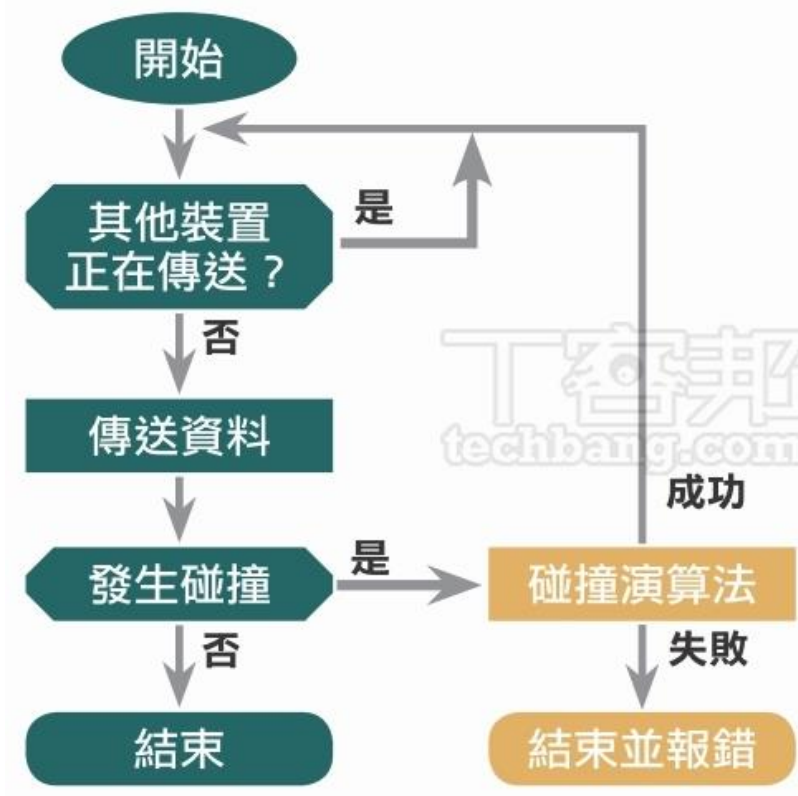
偵測到訊框碰撞之後，立即停止原先的傳輸工作，連續發出一串 32 bit 干擾訊號，用以提醒此網路匯流排其它的裝置發生碰撞。接著等待一段隨機時間，再次嘗試因碰撞而未傳輸完畢的訊框。等待時間不固定，是為了盡量讓裝置們不要再次發生碰撞。

jam signal 的發送長度

jam signal 是 32 bit 長的亂數，或者直接發送 1 也可以，主要是讓發送方了解到發生碰撞，以及讓接收方的訊框 CRC 結果失敗，丟棄此訊框。

在 Ethernet 中，最大的架設環境下，距離最遠的兩端點訊號時間差可達 232 bit 傳輸時間，也就是說，當 A 電腦發送 231bit 之後，與 A 最遠的 B 電腦若已傳輸 1bit，下個傳輸 1bit 的時間就會偵測到 A 電腦送來的訊號，才會偵測到碰撞發生，停止傳輸。而傳輸 32 bit 長度的 jam signal 是為了讓 A 電腦更容易辨識，過短的 jam signal 無法保證 A 電腦得知碰撞發生。

Ethernet 訊框最短長度 64 Byte 也是因為 232 bit 的傳輸時間差而設計出來的，因為當 A 電腦發送之後，最遠的 B 電腦需要經過 232 bit 傳輸時間後才可收到訊號；若是碰撞發生，回傳給 A 電腦的碰撞訊號也要 232 bit 的傳輸時間，一來一往之下就是 464 bit（58 Byte），為了確保 A 電腦佔據網路夠久的時間偵測 B 電腦傳來的碰撞訊號，以及電腦單位經常使用 2 的次方影響，就制訂出了 64Byte 這個最短訊框長度。



▲ CSMA/CD 的發送流程

## 隨機時間的計算

設計協定一定要考慮最好和最差的狀況，如果發生碰撞後嘗試傳輸時再次發生碰撞，那麼等待時間將不再是隨機亂數，等待時間改採「二元指數後退演算法」（binary exponential backoff algorithm）。

我們假設第幾次發生碰撞為  $n$  ( $n \leq 16$ ，如果  $n > 16$ ，會放棄傳送訊框，並向網路架構的上一層報錯)， $t$  為  $n$  和 10 取最小值， $r$  為一個倍數， $r$  的值在  $0 \leq r < 2t$  ( $n$ 、 $t$ 、 $r$  皆為包含 0 的正整數)。

如果今天發生第一次碰撞， $n$  為 1，1 和 10 的最小值為 1，推導出  $0 \leq r < 2$ ，所以  $r$  的值有可能為 0 或 1，再乘上一個時槽的時間（10Mbps 的時槽為  $51.2\mu\text{s}$ ），因此是  $0\mu\text{s}$  或是  $51.2\mu\text{s}$ 。所以當第一次碰撞之後，將以隨機的方式再從  $0\mu\text{s}$  或是  $51.2\mu\text{s}$  當中選一個；因此有可能碰撞發送 jam signal 之後立刻補送訊框出去，或是等  $51.2\mu\text{s}$  之後再傳送。第二次碰撞以此類推，將在  $0\mu\text{s}$ 、 $51.2\mu\text{s}$ 、 $102.4\mu\text{s}$  中隨機選擇 1 種作為等待時間。

如果今天發生第十一次碰撞，11 和 10 的最小值為 10，所以  $r$  最多就是 1023，等待時間最多為  $52377.6\mu\text{s}$ （約 52ms），從第十一次碰撞到第十五次碰撞都是如此。

由於網路速度的不同，時槽的秒數也不同，10Mbps 的訊框最短為 64 Byte，1 個時槽為  $51.2\mu\text{s}$ ；100Mbps 網路的訊框最短為 64 Byte，1 個時槽為  $5.12\mu\text{s}$ ；1Gbps 網路的訊框最短為 512 Byte，1 個時槽為  $4.096\mu\text{s}$ 。10Gbps 以上的網路已不使用 CSMA/CD，所以根本不會發生碰撞（詳情後述）。

## CSMA 監聽 / 發送策略

在監聽線路是否忙碌的方法上，也分成許多不同的作法，Ethernet 採用 1-persistent（1-堅持法），相對的還有 0-persistent（0-堅持法），在這兩者中間尚有 P-persistent（P-堅持法）和 non-persistent（非持續法）。

### 1-persistent

持續監聽傳輸媒體上是否正處於忙碌狀態（資訊傳送中或發生碰撞），當傳輸媒體一有空閒，就立刻傳送資料。

### P-persistent

持續監聽傳輸媒體上是否處於忙碌狀態，如果傳輸媒體空閒，則根據事先定義的  $p$  機率值決定下一步要繼續監聽或是立即傳輸資料。 $P$  是直接傳輸的機率， $1-P$ （此為 1 減  $P$ ）是持

續監聽的機率，P-堅持法所設定的參數通常需要斟酌其它因素考量（網路上的電腦數量、資訊傳輸密度、各台裝置間收發的比例等），較為複雜。

### **non-persistent**

如果偵測到傳輸媒體是空閒狀態，則立刻傳輸資料。如果偵測到傳輸媒體目前是忙碌狀態，則會隨機等待一段時間後再監聽。此策略與 P-persistent 相比，比較不容易發生碰撞，媒體利用率會比較好，但相對來說傳輸延遲就會增加。

### **O-persistent**

是英文，不是數字，這個策略以完全公平為導向，在此策略中，每個裝置都會有個傳輸順序（通常網路中會有個裝置負責管理），第一台裝置傳輸完 1 個時槽後，就輪到第二台裝置傳輸 1 個時槽，第二台傳輸完後接著第三台，以此類推。每台裝置都會持續的監聽傳輸媒體上的資料，以便確定自己該在什麼時候傳輸。

當 Ethernet 採用 CSMA/CD 時，採用 1-persistent 策略，P-persistent 策略則是使用在 Wi-Fi 的 CSMA/CA 上。O-persistent 比較常用在控制環境下，因為傳輸資料量不大，各裝置間都可以在一定的時間內搶到線路所有權。

### **時槽（time slot）**

時槽定義為在最大網路佈建的情況下，最短的訊框從網路中最遠的 2 點來回 1 次所需要的時間，會受到網路速度（傳輸頻率）和最短訊框的大小所影響。網路速度越快、時槽越短；訊框越小、時槽越短。

### **單工、半雙工、全雙工**

假設現在有 A、B 點，如果資訊只能從 A 點傳至 B 點，或是 B 點傳至 A 點，則這種傳輸方式稱為單工，常見的例子有廣播式協定等。

雙工指的是 A、B 兩點的資訊均能夠相互傳輸，而雙工又可再細分為半雙工和全雙工。半雙工的 A、B 兩點雖然能夠相互傳輸資訊，但在同一時間內只能從 A 點向 B 點傳輸，或是由 B 點向 A 點傳輸，無法同時進行，像是無線電；而全雙工能夠在同一時間內讓 A、B 兩點相互傳送資訊。

### **CDMA 的缺點**

雖然說 Ethernet 採用的 CDMA/CD 有針對碰撞發生進行偵測，確保發送和接收到的訊框是完整的，但是卻無法保證碰撞不會發生，特別是當線路上的裝置越來越多時，碰撞的發生

次數將成指數級成長，加上所採用的 1-persistent 策略在高傳輸量時的效率不佳，珍貴的傳輸時間和資源都會被浪費在處理碰撞和等待時間上。

幸好後來的 802.3x 制定出 full-duplex（全雙工）傳輸方式，將原始的 half-duplex（半雙工）模式加以改良。switch（交換器）的發明直接讓網路傳輸脫離訊框碰撞的苦海，就算是較多裝置的網路也不會讓傳輸效率下降。

### **媒體讓全雙工成為可能**

最初的網路是採用類似現今傳輸電視訊號的同軸電纜，規格標準為 10BASE5 或 10BASE2，內部結構是單芯銅線，外層使用編織金屬網包覆，達到阻隔雜訊和接地功能。同一時間內只能有 1 台裝置傳輸，運作在半雙工的狀態。

後來傳輸媒體漸漸的從同軸電纜移到雙絞線（顧名思義，內部線路兩兩成對，相互扭轉在一起），原先使用雙絞線傳輸只是為了佈建方便，讓同一條線材可以同時傳輸電話和網路訊號。

採用雙絞線的佈線方式不但方便，更重要的是一開始所定義的接頭規格就有 8 個觸點，保留 4 個觸點只取用 4 個觸點，2 個做為發送，2 個作為接收，相當於直接佈建 2 條同軸電纜，1 條用於發送，1 條用於接收，這個改變使得網路從半雙工變為全雙工。此外同軸電纜需要的收發器、終端電阻也在使用雙絞線後消失，佈建成本更低，因此相當快速的取代同軸電纜成為 Ethernet 主流的傳輸媒介。

### **switch 讓 CSMA/CD 殞落**

導線線材數增多，實現全雙工傳輸，但最容易降低網路傳輸速度的碰撞問題依然沒有解決。switch 交換器的出現，正好解決這個問題，透過 1 個小小的技巧解決掉多裝置網路容易發生訊框碰撞的情況。

較早出現的 hub 網路裝置，僅負責將許多訊號線聚合在一起，或是作為長距離網路的電子訊號放大之用，hub 只負責把某條線路傳來的訊號，加以放大並從其它的線路傳遞出去。switch 做的事情更為聰明一些，它能夠自動學習哪台電腦在哪條網路線上，傳給 A 裝置的訊框就會從 A 裝置和 switch 連接的網路線傳輸，不會跑到別的地方去。由於 A 裝置和 switch 之間的這條線路將相當於獨立佔有，不會有其它裝置的訊框跑過來，也就不會發生碰撞。

switch 辨識訊框的 MAC 位址，和其傳來的網路介面（網路線插孔）進行綁定的動作，即可依據訊框 MAC 位置決定要從哪個網路介面傳輸。

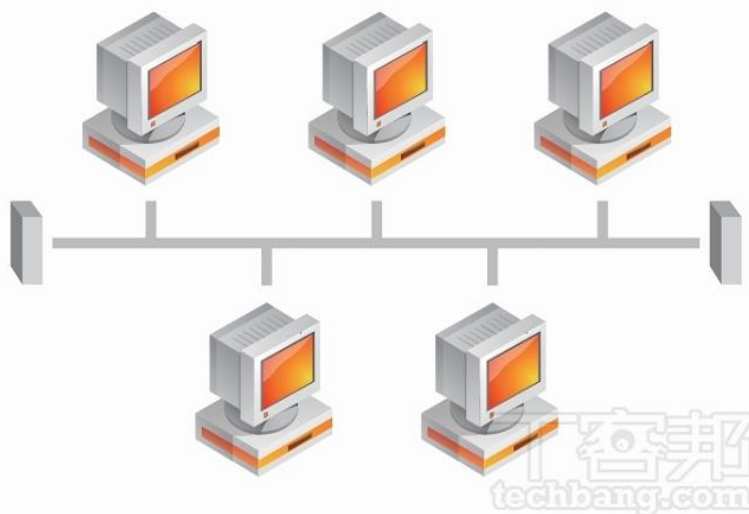
由於線路獨佔的特性，網路拓模形態也從過去的 bus 匯流排，變更為由 switch 為中心的 star 星狀拓模。switch 也允許網路上的裝置線路速度不一致，10/100/1000Mbps 皆可裝設在同一網路中。

### 全雙工新版流量控制

在採用 CSMA/CD 的半雙工傳輸模式下，如果接收端裝置效能不足，無法快速處理傳送端送來的訊框，想要請傳送端降低傳送速率，但半雙工模式無法同時進行雙向傳輸，沒有辦法告知對方我快吐了。此時有 2 種作法，第一種就是直接在網路上造成訊框碰撞，對方偵測到之後就會進入碰撞之後的處理演算法，而這演算法本身就有降低傳輸速率的功效。第二種就是由接收端直接發出傳輸訊框，另一端就會以為線路上有其它電腦要傳輸，自己就會停下來，以上 2 種針對半雙工傳輸模式的流量控制方法統稱為 back pressure。

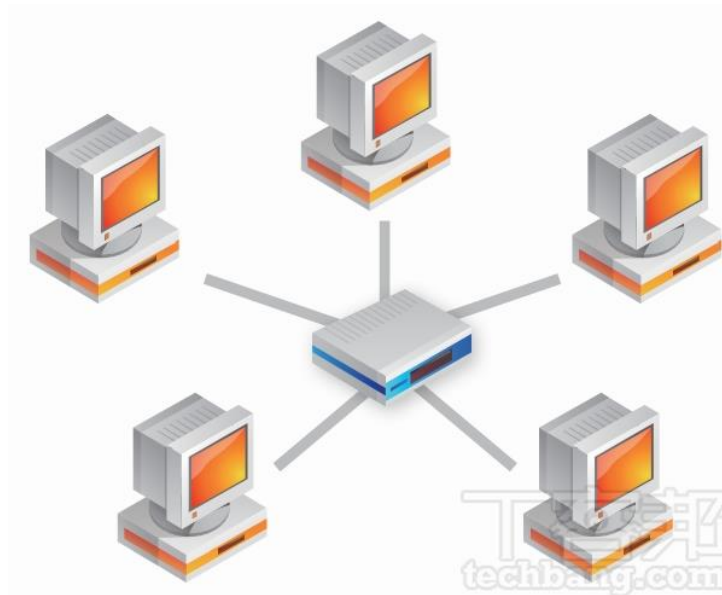
使用流量控制可減少緩衝區溢位，訊框資料遺失，導致資料必須重新傳遞的現象，讓線路使用率提升。

進步到全雙工傳輸之後，由於傳送和接收分別在獨立的線組上執行，CSMA/CD 被拋棄，根本就不會產生碰撞；於是可以直接告訴對方我快滿了，請降低傳輸速度避免訊框遺失。支援全雙工傳輸模式的裝置都會持續監控自身的緩衝區，當緩衝區內部的資料快要到達緩衝區的頂點，便會發出 pause 訊框，發送的裝置收到後便會降低傳輸速率。



▲ 大家共用 1 條線的 bus 匯流排網路拓模

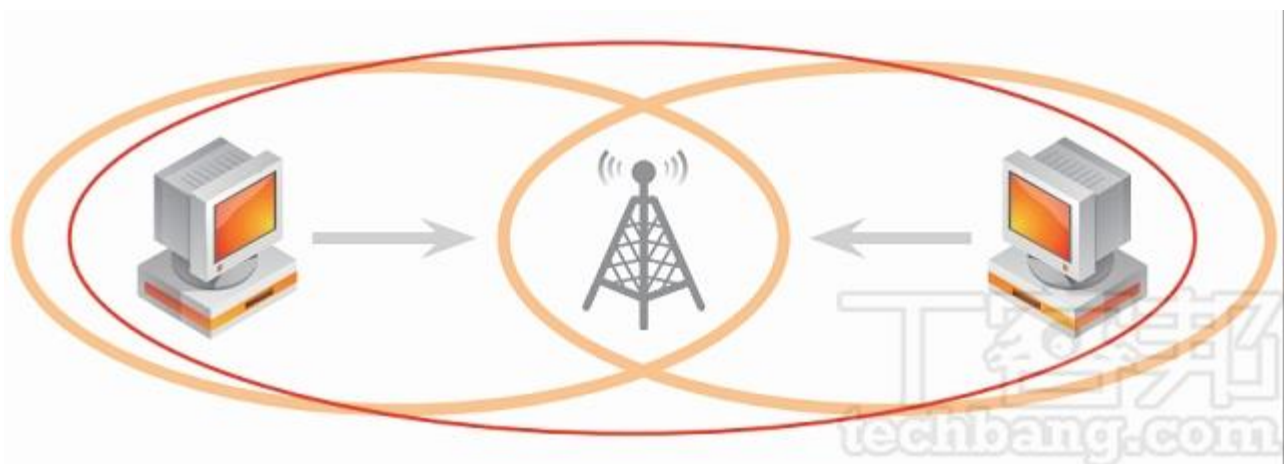




▲ 各台裝置分別占有獨立線路的 star 星狀拓撲

### 無線使用 CSMA/CA

雖然 CSMA/CD 在有線網路的範圍中，已被全雙工和 switch 所避免掉，在 GbE 網路環境裡已相當少用，10GbE 規格裡更是直接被拿掉半雙工支援，hub 也不復存在。但在無線網路中，CSMA 還活得好好的，因為使用空間作為介質傳遞訊號，很難限定訊號只在特定範圍內傳播。無線環境還有個相當特殊的「隱藏節點」狀況，如下圖所示：



▲ 無線網路的特殊現象，由於無線訊號無法傳遞太遠，兩側的裝置無法得知對方的存在

由於無線訊號會根據傳輸距離而逐漸遞減，A、B 點和基地台的距離都要在雙方的無線訊號涵蓋區之內才可進行通訊，但 A、B 點卻因距離問題都不在對方的訊號範圍內，無法得知對方的存在，如果同時發送訊號給基地台，基地台部分必會發生碰撞。由於無法相當有



效的偵測碰撞的存在，無線傳輸無法使用 CSMA/CD，而是盡量避免碰撞的發生，使用 CSMA/CA（Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance）。

### 發送之前隨機等待

CSMA/CA 一樣也是先偵測傳輸媒體的狀態，如果忙碌中就不進行傳輸。但當偵測到媒體空閒時，並不像 CSMA/CD 直接傳輸資料，而是再等待一段隨機時間後，如果媒體依然空閒，才進行資料的傳輸。同時，傳輸資料後必須收到確認訊息後才算傳輸成功；若沒有收到確認訊息，則代表接收端有狀況發生，可能是上述的隱藏節點造成碰撞，也有可能是其它原因，總之傳輸端會重新傳送 1 次資料。

### RTS/CTS

在無線網路傳輸標準 802.11 之中，還有個選用功能能夠避免碰撞的發生，就是啟用 RTS/CTS（Request To Send/Clear To Send）。

在裝置傳送無線訊號之前，會先向基地台傳送 RTS 訊號，請求傳輸許可，若基地台感測到目前空間無裝置使用，便會發送 CTS 訊號給裝置，告知其准許傳輸。如果同時有多個裝置同時向基地台發送 RTS，則基地台只會給其中 1 台 CTS 訊號允許傳輸，便不會造成訊框碰撞。

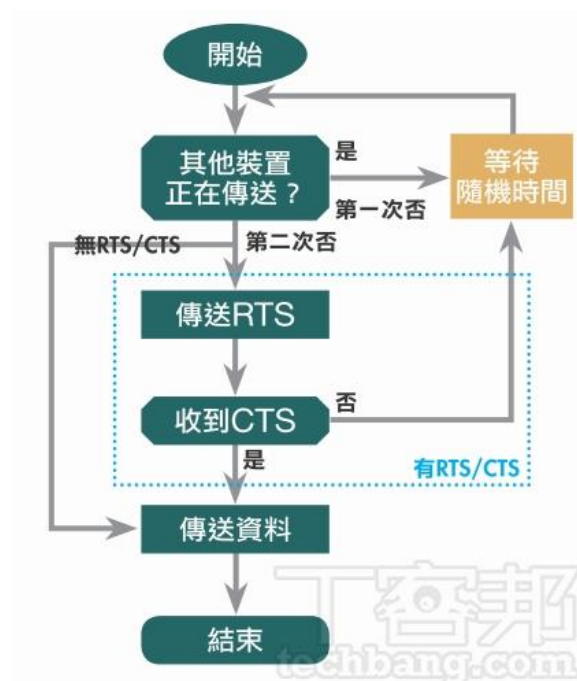
事實上這個 RTS/CTS 的交握協議在傳輸小量資料時較無效率，因此在實作上會有個 RTS 門檻值，一旦要傳送大於這個值的資料，就開始進行 RTS/CTS 的交握協議，如果比這個訊框小就不使用 RTS/CTS。

以上所述在無線訊號的範疇裡屬於 DCF（Distributed Coordination Function，分散式協調功能），需要傳送方自行去搶傳送資源，應此又稱為競爭式服務。另外一種是由 AP 負責輪詢各台裝置，唯有被問到的裝置才能傳輸資訊，為 PCF（Point Coordination Function，集中式協調功能），屬於非競爭式服務。PCF 由 AP 集中管理各裝置的發送，所以不會造成訊框碰撞，也避免掉隱藏節點的問題。但由於 PCF 屬於選配功能，實際應用上還是以 DCF 占大多數。

### RTS 門檻值的小八卦

如果讀者家中的 AP 提供 RTS 門檻值選項，其實大家可以觀察一下預設值為多少，絕大多數設定在最大的 2346 或是 2347，所以大於 2346 byte 的訊框才會啟用 RTS/CTS 功能，而無線網路的訊框最大為 2436 byte（包含訊框主體和其它控制除錯部分），換言之當 RTS 門檻值設定在 2346 或 2347 時，也就是關閉 RTS/CTS 功能。如果家中使用較多無線

產品，或是附近的 AP 實在太多，干擾嚴重，就建議把 RTS 門檻值往下調，可以提升傳輸速度與品質。但是如果無線網路環境簡單，則建議保持預設值即可。其實這只是個經驗法則，最佳的 RTS 門檻值需要不斷的依據當地無線網路狀況，持續做實驗才可找出最佳設定。



下一次將會說明無線網路的規格，無線網路比較特殊一點，像是常見的 54Mbps、150Mbps、300Mbps 指的都是 OSI 網路模型 L1 的部分，或許可以談到 DSSS（直接序列展頻）、OFDM（正交分頻複用）等技術。