



Chapter 2

無線電接取技術

Radio Access Technologies

課程目標

- 這個章節針對行動通訊中無線電傳輸的基本原理、電磁波運作的特性與方式，進行入門的介紹。內容包括：
 - 比較類比信號（analog signal）與數位信號（digital signal）的傳輸方式
 - 討論無線電波傳輸的情形以及模型的建立
 - 簡介調變（modulation）技術。
 - 就電磁波干擾問題的解決方案，針對通道編碼（channel coding）與交錯放置（interleaving）加以介紹。

章節目錄

- 簡介
- 類比與數位信號
- 無線電波的傳輸與模型
- 調變
- 展頻
- 通道編碼與交錯分配
- 總結

Section 2.1

簡介

Introduction

無線電的傳輸


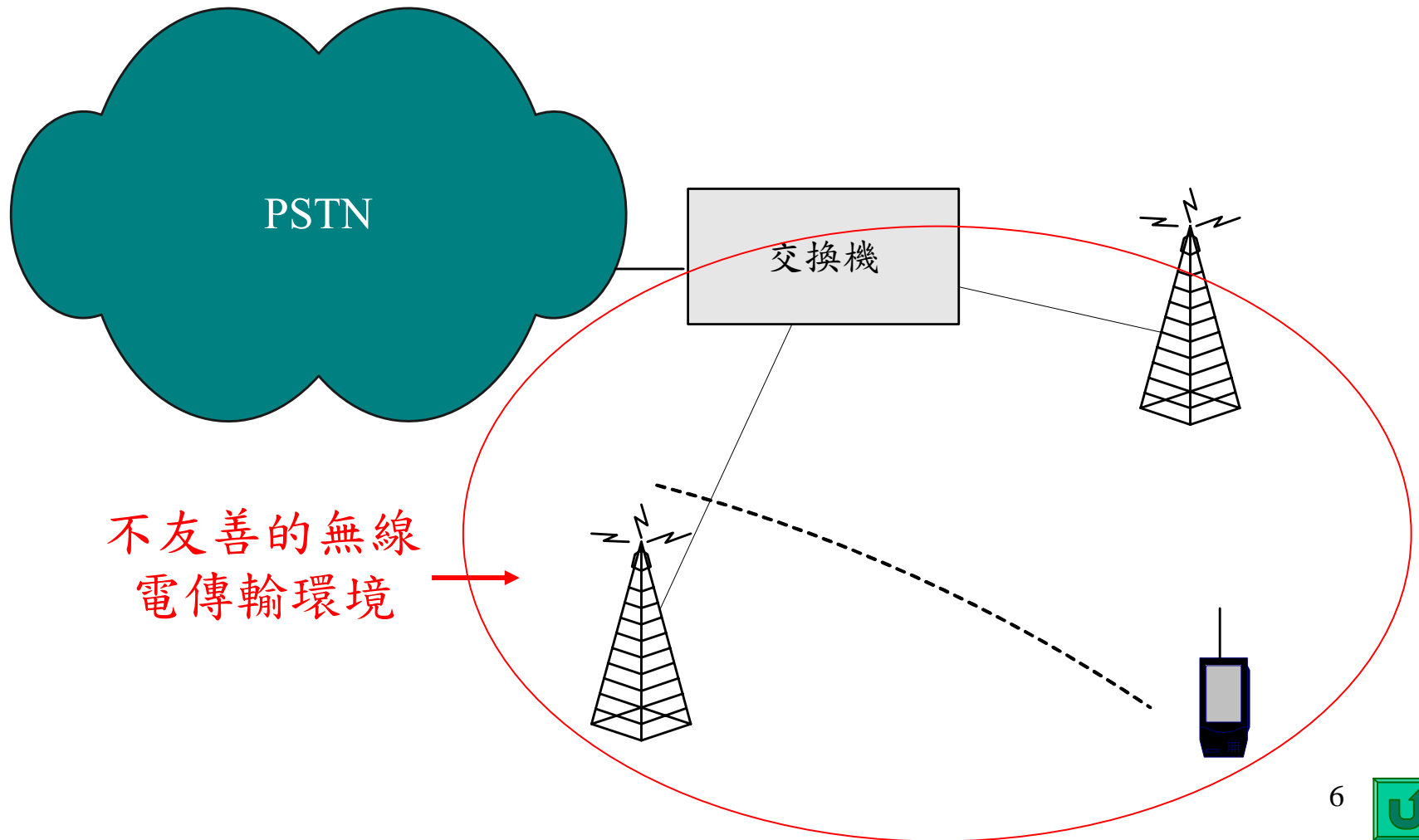
- 無線電傳輸的原理在於藉由變動的電場及磁場交互感應而產生的電磁波，傳遞至遠端。
- 電磁波的傳遞無需介質，真空中也可以傳送。
- 在行動通訊系統中，無線電傳輸所扮演的功能便是手機與基地台之間的資訊傳遞。 
- 無線電波的傳遞可能會暫時受障礙物的屏蔽，導致通訊品質不良。為了能在傳輸情況難以控制的大自然環境中，確保傳遞內容的正確性與有效性，許多相關技術被發展出來以解決問題。

圖 2-1 無線電傳輸在個人行動通訊網路的關係



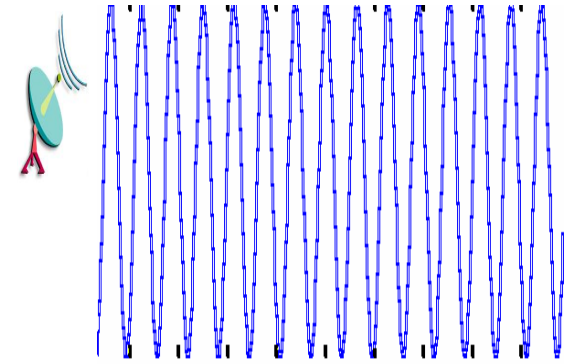
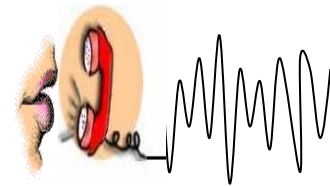
Section 2.2

類比與數位信號

Analog and Digital Signal

類比訊號

- 在大自然中的信號，均以類比的型態存在。
- 類比信號的特色是信號在時間軸上連續，也就是在任何時間點上，都會有對應的信號值。
- 若在傳遞的過程中信號衰減或是受到環境的干擾，造成了波形的改變，稱為失真。傳送類比的信號，必須小心保持它的波形，因為波形一旦失真後，不易回復成原始的形狀。



數位化 (1/2)

- 數位化 (Digitalize) : 將大自然存在之類比信號，轉換成一群 0 與 1 的序列信號。

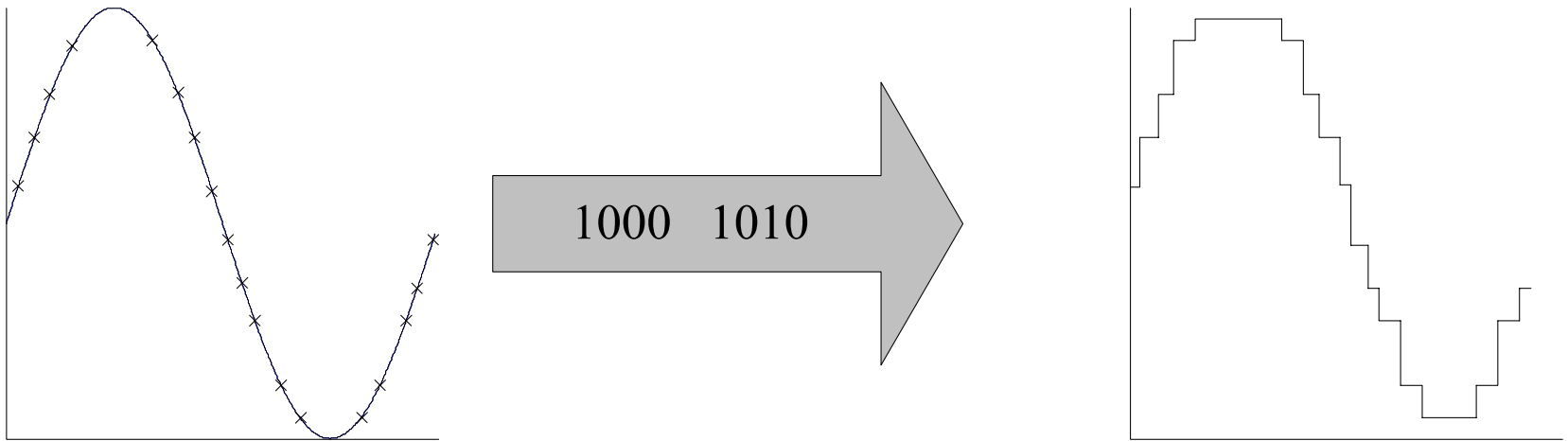
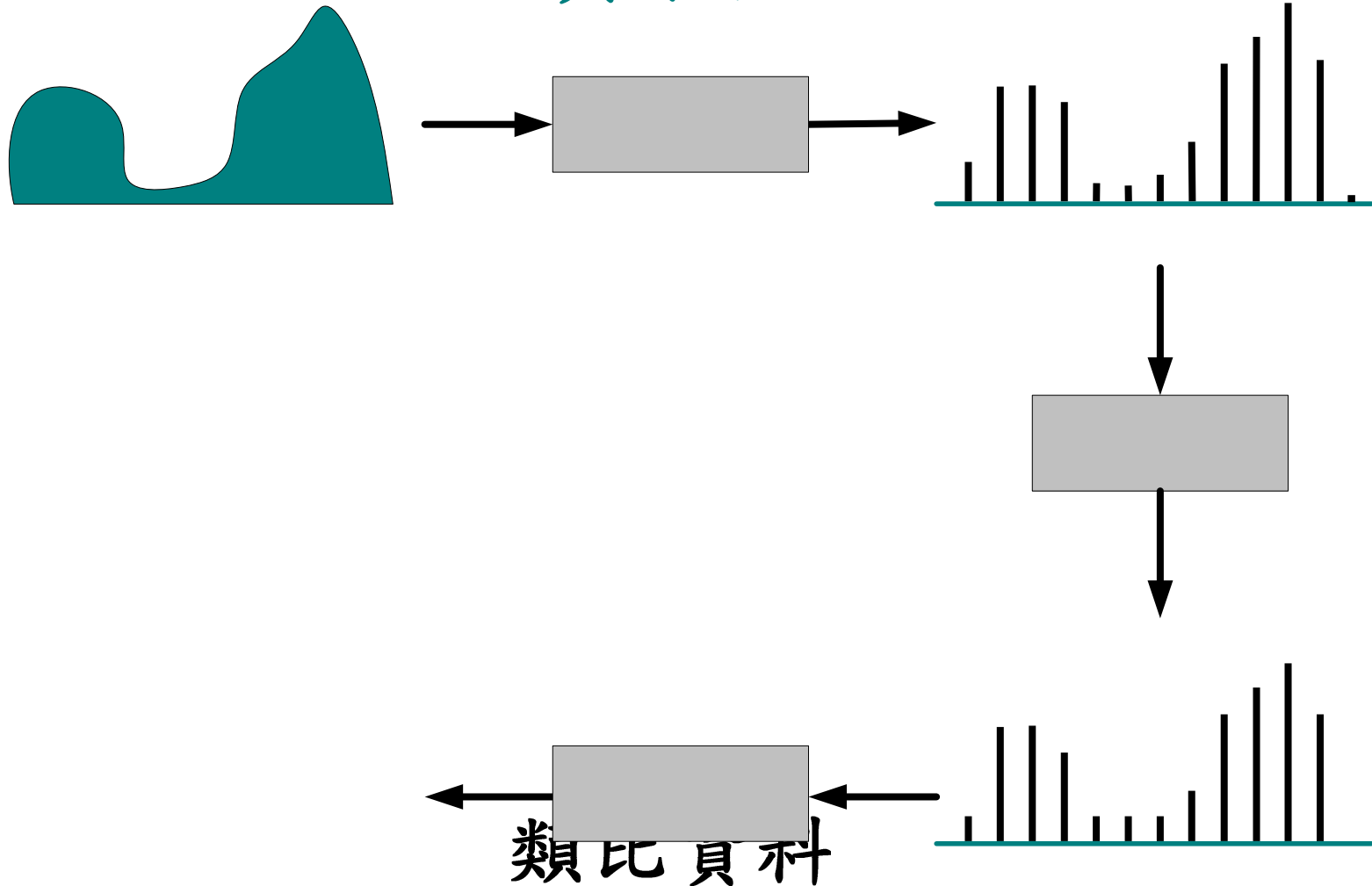


圖 2-3 類比信號的數位化

數位化 (2/2)

- 當通訊系統傳送 0 與 1 的數位信號時，由於 0 與 1 傳送時的波形是固定的有規則的，如遇雜訊干擾而變形，可用先進的通訊技術將其回復成原來形狀，或能偵測出錯誤而要求重新傳送。故利用數位技術傳送信號漸漸成為電信的主流。
- 類比信號的數位化過程基本上分為三部分：取樣（sampling）、量化（quantization）及編碼（coding）。

圖 2-2 類比信號經取樣量化及編碼將其數位化



取樣

- 連續的類比信號每隔固定的時間，取出一個值，稱為取樣。
- 原本在時間軸上連續的信號，在取樣後變成非連續的信號，被稱作離散信號（discrete signal）。
- 在單位時間內取樣的次數，稱為取樣頻率（sampling rate）。
 - 例如每秒取8000個數值，則取樣頻率為8000Hz。

取樣定理

- 取樣定理（Sampling Theorem，即Nyquist Theorem）：取樣頻率需高於所欲取樣之類比信號的最高頻率的2倍，才能還原成原始的類此信號。
- 若以人類聲音為例，其頻率範圍約在300至3400Hz之間，因此PSTN電話系統的語音信號取樣頻率為每秒8000次。

量化

- 若要以有限長度 0 和 1 字串表示離散信號的振幅數值，就只能表現出有限數目的振幅數值，每個可表現的數值稱為量化準位（level）。
 - 例如用 4 bit 就只能表現 16 個量化準位。
- 對於每一個取樣點的振幅，分別以最接近的量化準位來代表之，這個動作稱為量化（quantization）。
- 其取樣點與量化準位之間的差距，稱為量化誤差（quantization error）。

編碼

- 編碼（coding）：以一組欲先設定的 0 或 1 所組成的數字字串，來表示所規劃的所有的量化準位。
- 以PSTN常用之脈碼調變（Pulse Code Modulation, PCM）為例，是使用8位元編碼，共256個準位來表示人的聲音。取樣頻率為8KHz，意味著每秒傳輸64,000個位元，換言之，資料量的傳輸速率為64,000bps。

Section 2.3

無線電波的傳輸與模型

Radio Transmission and Modeling

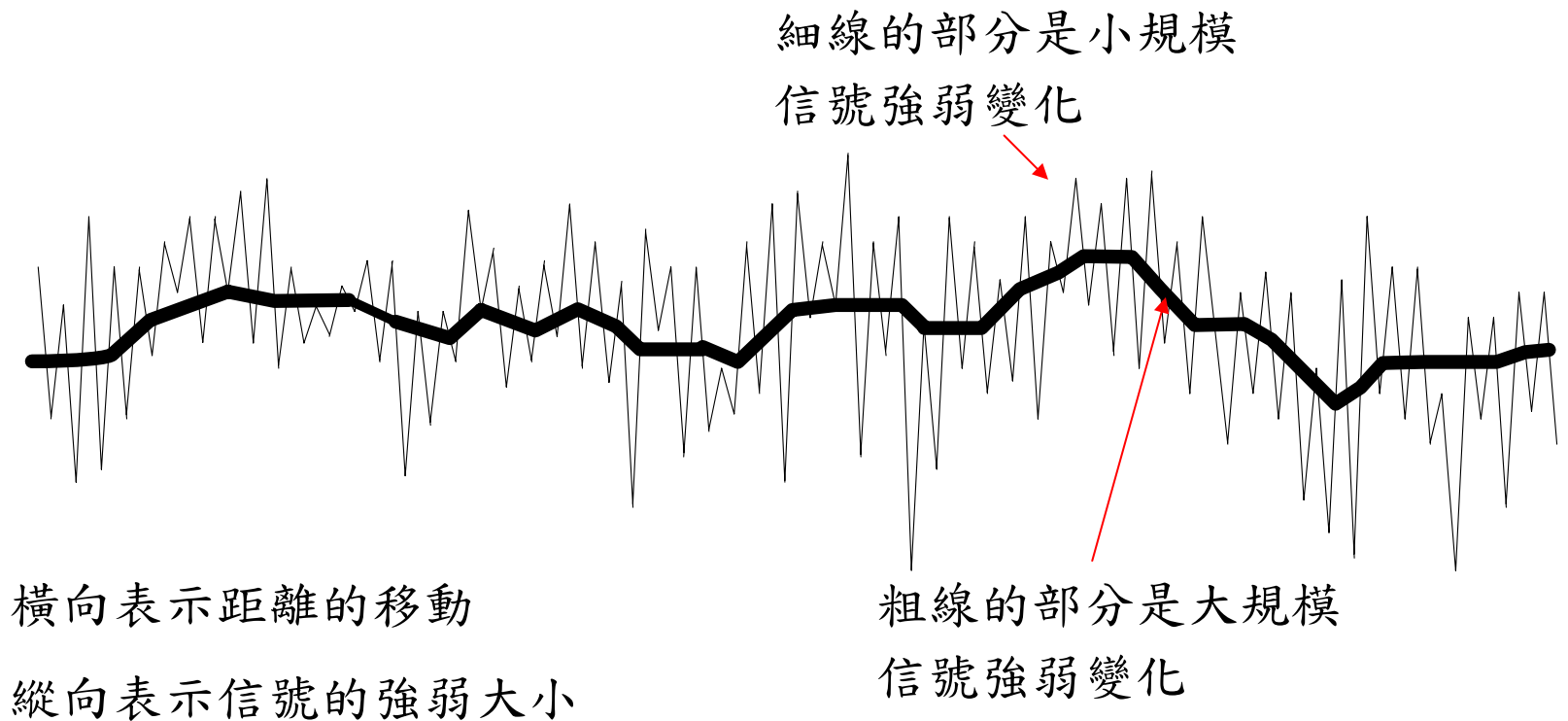
電磁波的傳遞

- 影響電磁波在空氣介質中傳送形態的三個機制
 - 反射 (reflection)
 - 繞射 (diffraction)
 - 散射 (scattering)
- 為了能猜測環境對電磁波的影響，許多的傳輸模型被提出，希望能預測電磁波傳輸時的特性。

傳播損失（Propagation Loss）

- 當電磁波遇到障礙物（包括空氣與水氣）時，會造成能量消耗。
- 影響電磁波傳播的因素分成兩大類：
 - 大規模的影響因素
 - ✓ 傳播的影響因素是針對收發機之間距離遠近，以及受到外在傳輸環境變動情形下的影響。
 - ✓ 主要是預測這個無線電波平均信號的強度，在時間軸上取得一個平均的信號強度進行比較。
 - 小規模的信號強度比較
 - ✓ 分析在很短暫的時間內，信號強弱改變的情況。
 - ✓ 可能是因為週遭物體的移動，或者是如雷雨等自然環境改變所造成的情形。

圖 2-4 電磁波信號強弱變化的情形

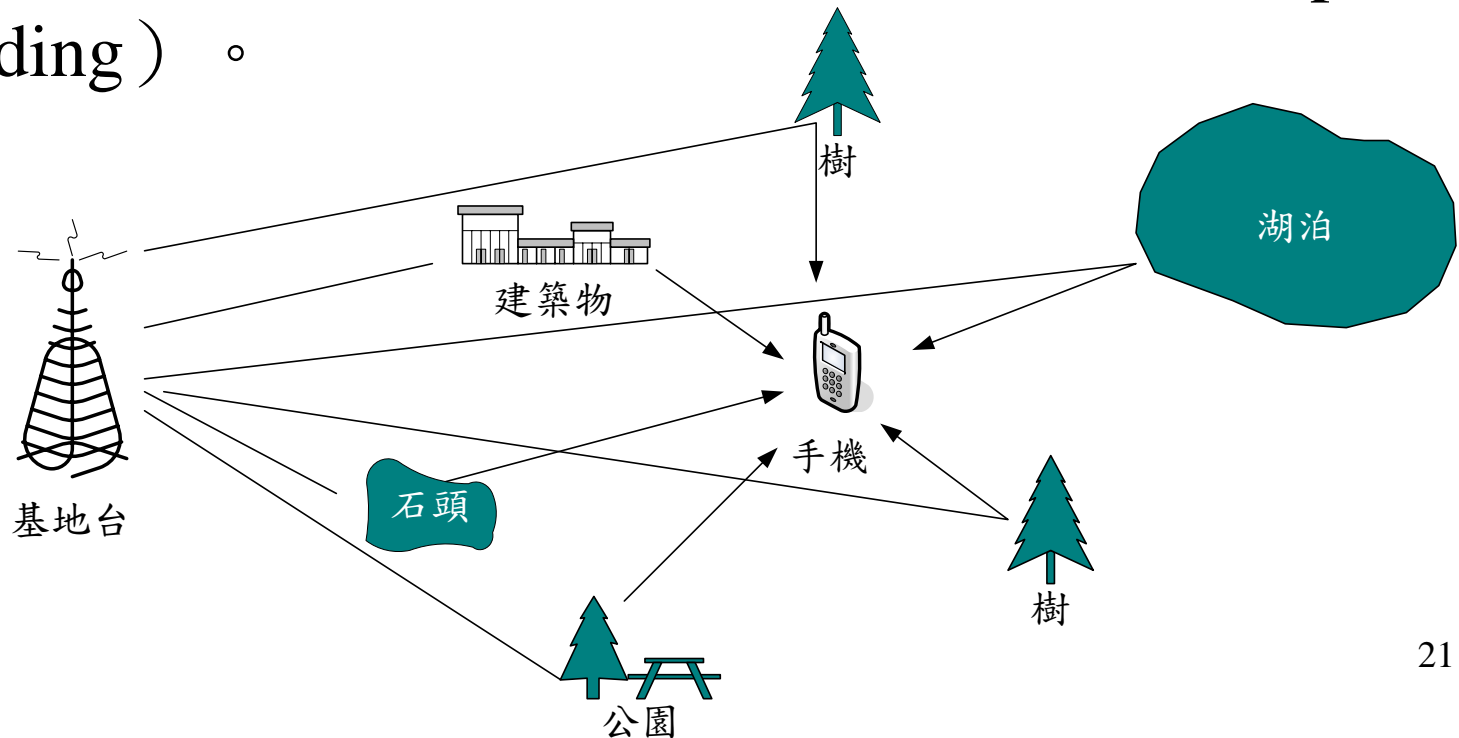


影響無線電波信號強弱的三大類因素

- 路徑衰減 (path loss)
- 慢速擾動 (slow fading) 或屏蔽現象 (shadowing)
- 快速擾動 (fast fading)

圖 2-5 無線電傳播影響因素

- 當無線電波遇到障礙物時，會產生各種傳導現象，造成許多不同路徑的無線電波被手機所接收，這種現象即所謂多重路徑效應（multi-path fading）。



無線電波傳輸模型 (Propagation Model)

- 在複雜的無線電波傳輸環境下，若能對無線電波傳輸的情況做個模型化的描述，將有助於系統業者規劃與建置基地台。
- 無線電波傳輸模型是用於“在已知無線電發射機與接收機之間的距離時，預測收到無線電波的信號強度”。
- 但對於短時間內信號改變的情形並不考慮，所以它取的是一個平均信號強度值的動作。
- 建立模型之後，便可進一步利用此模型去預測類似傳輸環境下無線電波信號的強弱。

Okumura-Hata Model

- 用於模擬郊區（urban）大涵蓋範圍基地台的無線電波發射特性

$$L(\text{urban})(dB) = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log h_{te}) \log d$$

- L表示傳輸路程中電波強度衰減的情形
- f_c 是指這個無線電傳輸的頻率，傳輸的頻率範圍要求在150MHz到1500MHz範圍之內。
- h_{te} 是發射機天線的高度，在35~250公尺之間。
- h_{re} 是接收機的高度，1~10公尺之間。
- d是發射機與接收機之間的距離。
- a是表示一個校正的因素。

影響無線電波傳輸的因素 (1/2)

- 所在地區整體特性，是城市、郊區，或是空曠的開放地區。
- 發送端傳送天線與接收端接收天線的高度。
- 無線電載波頻率。
- 無線電發射機與接收機之間相對的距離（基地台與手機間的距離）。
- 量測地區內建築物平均的高度、街道寬度、建築物之間疏密的程度等。

影響無線電波傳輸的因素 (2/2)

- 道路的走向，是否會阻礙電磁波的傳送，或者是一個通道的效益讓信號更容易地傳送。
- 室內量測的房間隔間性質（固定水泥牆或活動隔間板），會影響電磁波信號衰減。
- 發送及接收端之間隔樓層（牆）數、樓層面積、隔間窗戶所佔比例、隔間材質、樓層功能（辦公室、教室或商店）等考慮因素。
- 建築物建材（水泥、木造屋或鐵皮屋）。譬如在台灣有許多鐵皮屋，它是在一些做電磁波信號量測的先進國家，較少用到的建材。

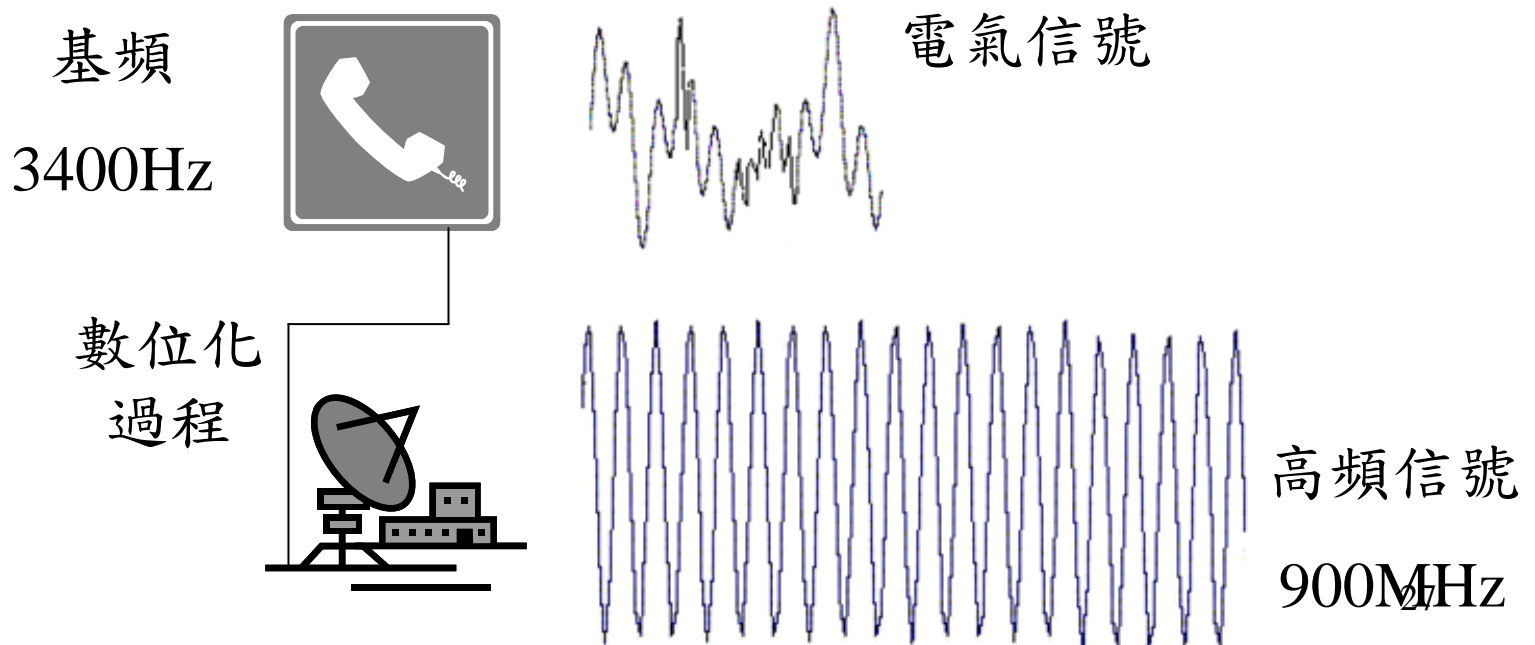
Section 2.4

調變

Modulation

圖 2-6 調變

- ▶ 語音轉變成的電氣信號並無法在空氣中做遠距離的傳輸，所以必須要將其轉換成高頻無線電波信號以傳送至遠處，這樣的動作稱為調變。



調變 (modulation) (1/3)

- 在行動通訊系統中，若希望將語音等資料轉成電磁波在空氣中傳送，不管是轉成類比信號或轉成數位信號傳遞，都還需要更多的處理。
- 將欲傳送的原始信號編碼放入一個載送的高頻電磁波中，而這個載送電磁波是適合在大氣自然環境中傳送的。
 - 這個高頻無線電波，稱為**載波** (carrier)。
 - 原始信號被稱為**進行調變的信號** (modulating signal) 或基頻的信號。
 - 轉換成的高頻信號被稱為**已調變的信號** (modulated signal)，適合無線電波傳送。

調變 (modulation) (2/3)

- 已調變的信號從發射機發送出來後，透過無線電介面傳送到接收機。接收機接到信號後，執行調變相反的動作，把它還原成原始信號，稱為解調變 (demodulation) 。
- 調變技術是將原始信號型態轉換成適合於傳輸介質的傳輸信號型態，以提高傳輸效能之技術。

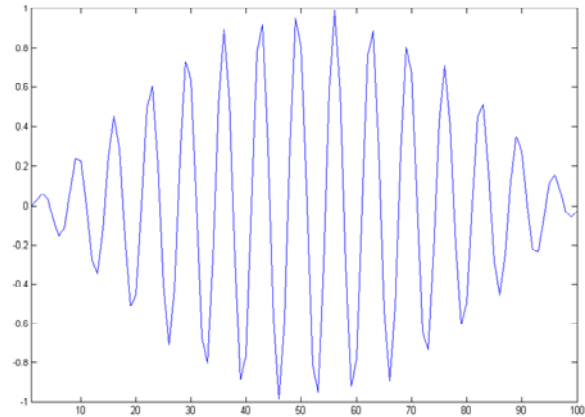
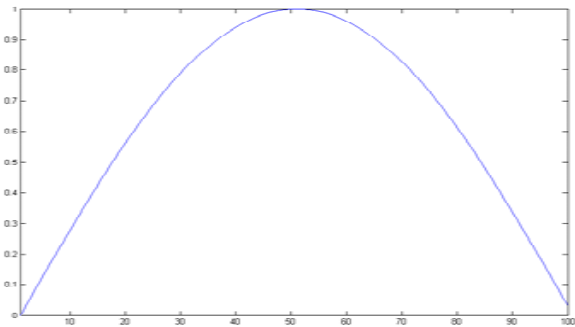
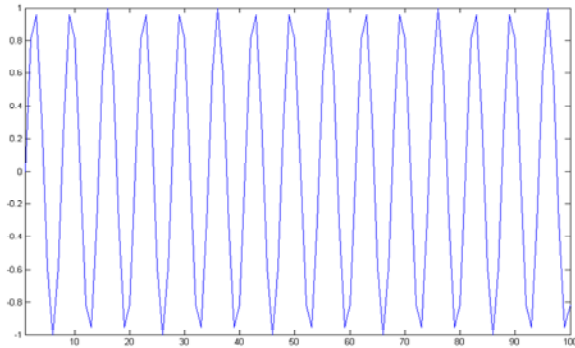
調變 (modulation) (3/3)

- 如果原始信號是類比信號，就需要類比調變與解調變的技術 (analog modulation & demodulation) 。
- 如果原始信號是數位信號，一樣需要將數位信號轉成適合的特定通道傳送，這一類被稱為數位調變與解調變 (digital modulation & demodulation) 。

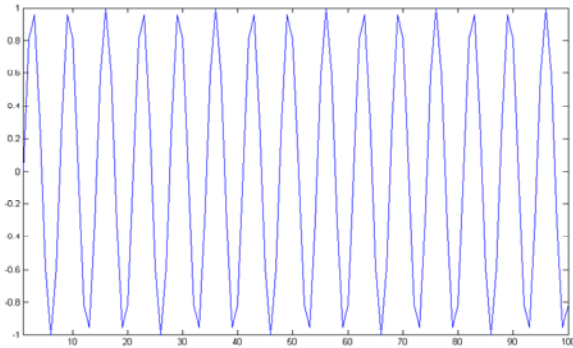
類比調變

- 若要以無線電傳送類比信號，將類比信號載入無線電波傳送有多種方式，其原理都是嘗試改變載波某些特徵來表現原始的信號。
- 載波有三個重要參數可做為調變的因素，即利用載波的振幅、頻率、或相位的變化來表示原始信號。
 - 振幅調變（Amplitude Modulation，AM）
 - 頻率調變（Frequency Modulation，FM）
 - 相位調變（Phase Modulation，PM）

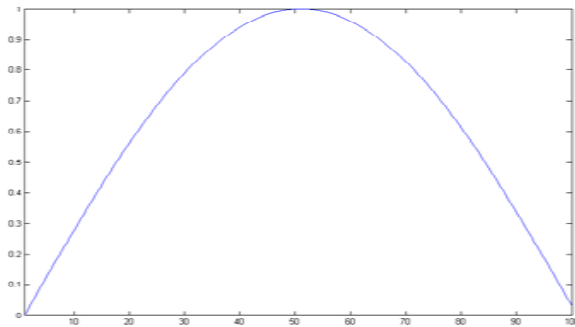
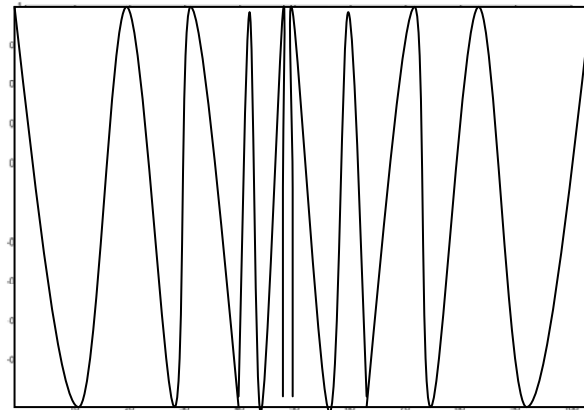
圖 2-7 調幅過程



調頻過程



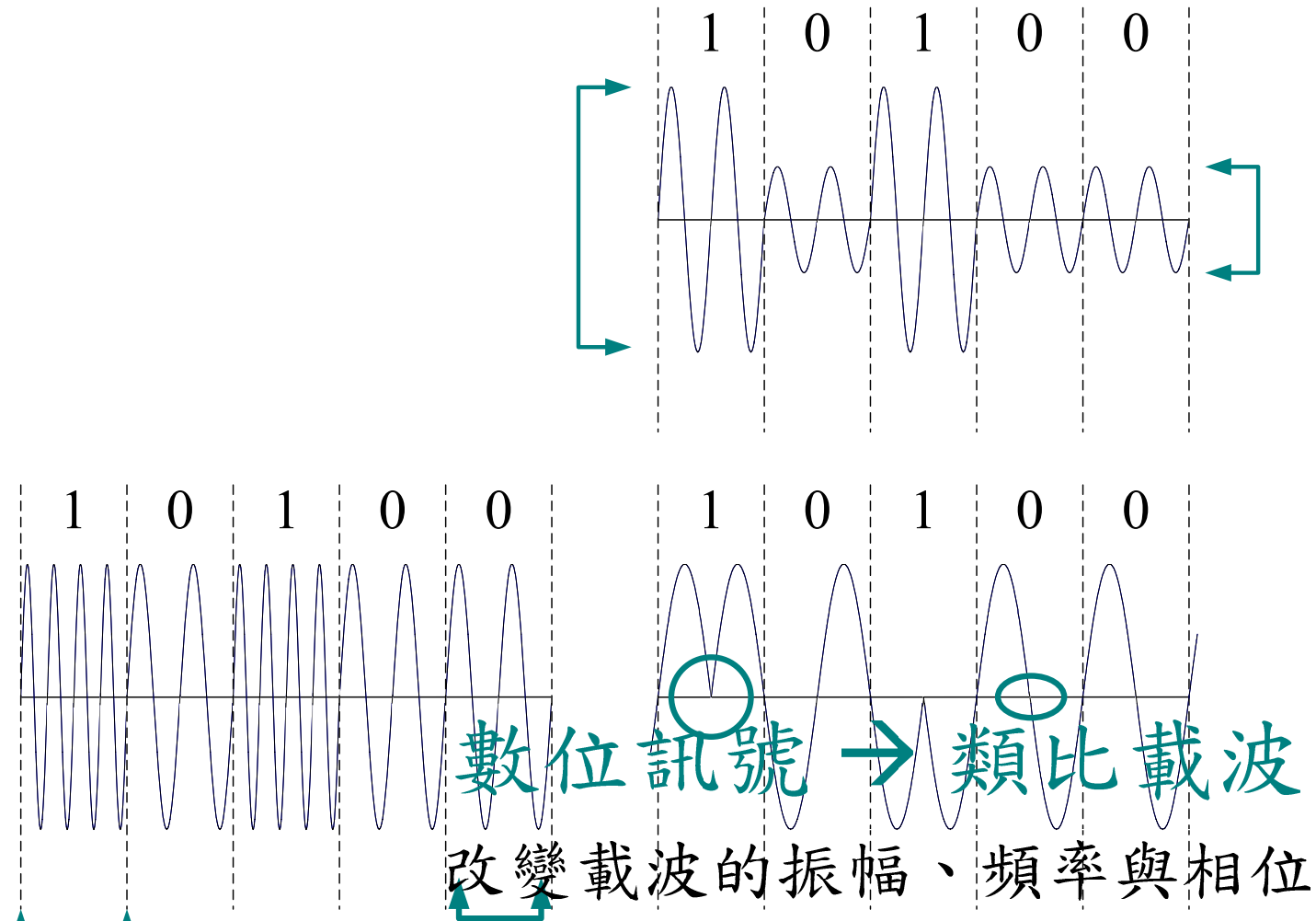
調頻



數位調變 (1/2)

- 直接將 0 或 1 的數位信號以電脈衝 (pulse) 利用實體線路傳送，這是屬於基頻調變的範疇，不在此說明。
 - 例如脈碼調變 (Pulse Code Modulation, PCM)
- 就行動通訊系統而言，為了無線電遠距離的傳送，就需要將數位信號轉換為類比高頻載波來傳送。
- 在數位調變中亦可以使用載波振幅、頻率、或相位的三種變化方式將 0 與 1 表現出來。

圖 2-8 數位調變的載波



數位調變 (2/2)

- 可以進行錯誤的偵測及錯誤更正。
- 可以進行加解密的工作，確保通訊安全。
- 希望能夠以簡單不貴的調變技術，提供低位元錯誤率（bit error rate），避免行動通訊無線電傳送的不友善環境（如多重路徑和信號衰減）的影響。
- 至於在效能運用上，數位調變技術可朝**能量有效利用**與**頻寬有效利用**兩個方向。

數位調變技術的分類

- 線性振幅數位調變 (linear modulation)
- 固定振幅數位調變 (constant envelope modulation)
- 整合線性及固定振幅之數位調變 (combined linear and constant envelop modulation)
- 展頻 (spread spectrum modulation)

線性振幅數位調變

- 調整信號的相位角以表現 0 與 1。
- 頻寬的使用顯得有效率，但輸出功率較差。
 - 二階相移鍵控（Binary Phase Shift Keying，BPSK）
 - 差動相移鍵控（Differential Phase Shift Keying，DPSK）
 - 四階相移鍵控（QuadriPhase Shift Keying，QPSK）

線性振幅數位調變技術 BPSK

- 利用兩信號（0與1）間相位差180度（ π ）做調變。

$$S_{BPSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \theta_c) \quad 0 \leq t \leq T_b$$

$$S_{BPSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \pi + \theta_c) \quad 0 \leq t \leq T_b$$

- f_c 表載波信號、 θ_c 表相位角
- E_b 是每個位元的傳輸能量、 T_b 是每個位元的傳輸時間

- 因為接收端要偵測信號的相位的變化，所以傳收雙方須要同步。

圖 2-9 線性振幅數位調變技術 DPSK

- 利用相位是否變化表示 0 與 1。
- 不需要同步信號以及一些相關的電路，所以它可以降低信號接收端電路的複雜性。

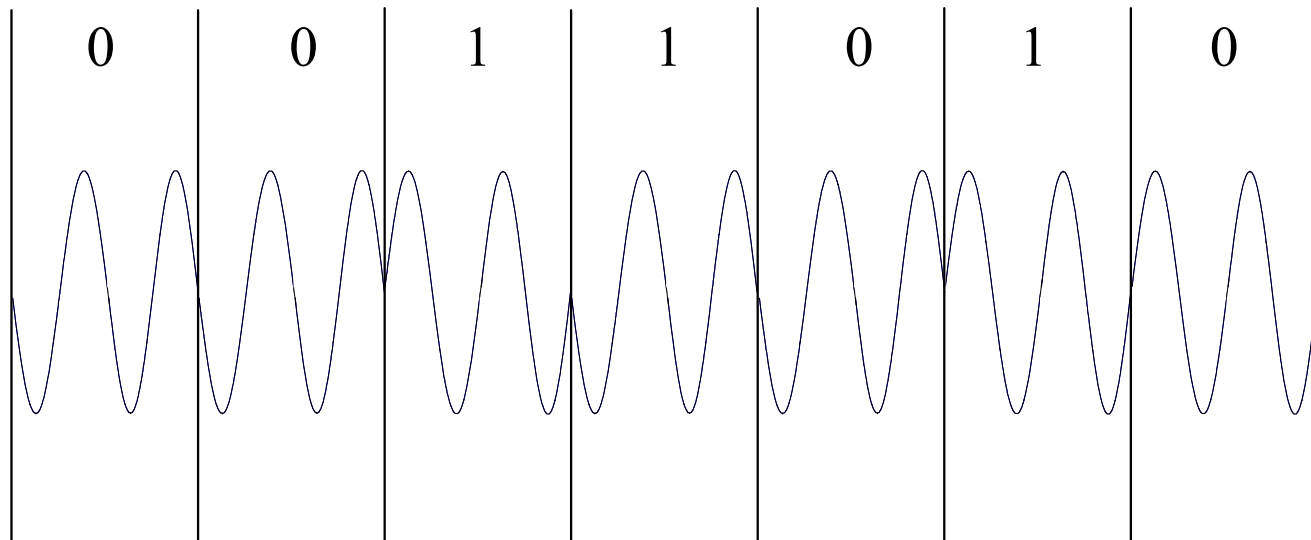


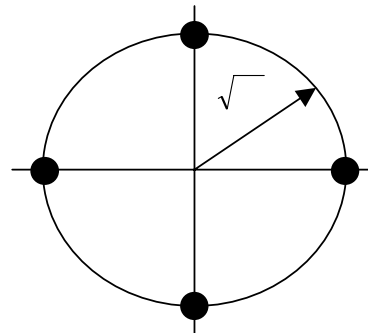
圖 2-10 線性振幅數位調變技術 QPSK

➤ 用 4 種不同相位的類比信號來表示長度為 2 個位元的數位信號。

- 依序可以表示數位信號 00、01、10 及 11。

$$S_{QPSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos \left[2\pi f_c t + (i-1)\frac{\pi}{2} \right]$$

$$0 \leq t \leq T_b \quad i = 1, 2, 3, 4$$



- E_b 跟 T_b 分別代表信號的能量及傳輸位元的時間， i 的值由 1 依序到 4，代表傳輸信號有這 4 種可能。

固定振幅數位調變

- 載波信號的振幅是一個常數。
- 利用改變載波信號頻率來區分位元 0 與 1：
 - 二階頻移鍵控（Binary Frequency Shift Keying，BFSK）
 - 非連續性BFSK（Discontinuous Binary Frequency Shift Keying，D-BFSK）
 - 連續性BFSK（Continuous Binary Frequency Shift Keying，C-BFSK）。

二階頻移鍵控 BFSK

- 根據這個輸入信號0或1的值，在兩個頻率之間作交替變換的動作。

$$S_{BFSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c - 2\pi\Delta f)t \quad 0 \leq t \leq T_b$$

$$S_{BFSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c + 2\pi\Delta f)t \quad 0 \leq t \leq T_b$$

- f_c 表載波信號、 Δf 表相位差
- E_b 是每個位元的傳輸能量、 T_b 是每個位元的傳輸時間

非連續性 (D-BFSK)

- D-BFSK 是利用兩個獨立、產生不同頻率的振盪器，而在這兩個振盪器中選定所代表的信號為 0 或為 1。
- 在信號交替的過程中，會造成不連續現象。

$$S_{FSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_H t + \theta_1) \quad 0 \leq t \leq T_b$$

$$S_{FSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_L t + \theta_2) \quad 0 \leq t \leq T_b$$

連續性 BFSK (C-BFSK)

- C-BFSK技術能夠使得即使所欲表達的原始信號在不連續的情況下，而載波信號的相位，依然是連續的。
- 技術上是以對信號進行積分的動作，如同下面的數學式。

$$S_{FSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos[2\pi f_c t + \theta(t)] = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos\left[2\pi f_c t + 2\pi\kappa_f \int_{-\infty}^t m(\eta) d\eta\right]$$

$$0 \leq t \leq T_b$$

整合線性及固定振幅之數位調變

- 整合相位角、頻率改變兩種方式。
- 同時利用載波信號振幅及相位的改變，就能夠代表更多種信號的狀態。
 - M-ary相移鍵控（M-ary Phase Shift Keying，MPSK）
 - M-ary正交振幅調變（M-ary Quadrature Amplitude Modulation，QAM）
 - M-ary頻移鍵控（M-ary Frequency Shift Keying，MFSK）

圖 2-11 整合線性及固定振幅之數位調變技術 MPSK

- 用一個固定的一個相位角 $2\pi/M$ ，來區隔所要代表的信號狀態。

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi}{M}(i-1)\right)$$

$$0 \leq t \leq T_b$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

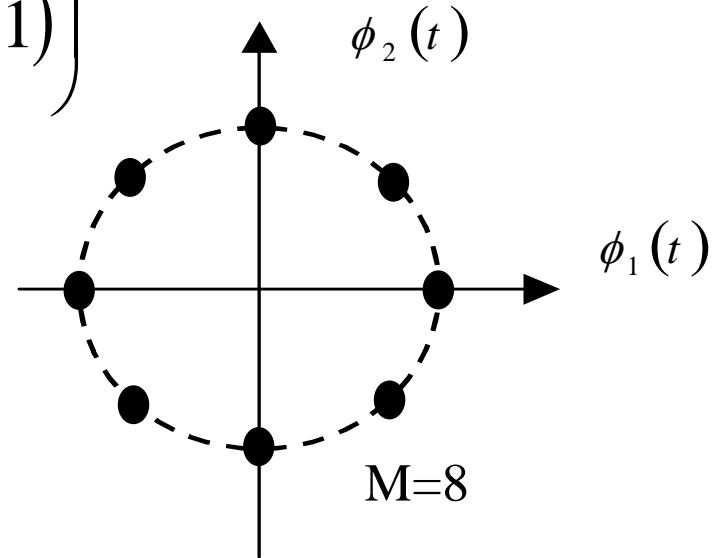
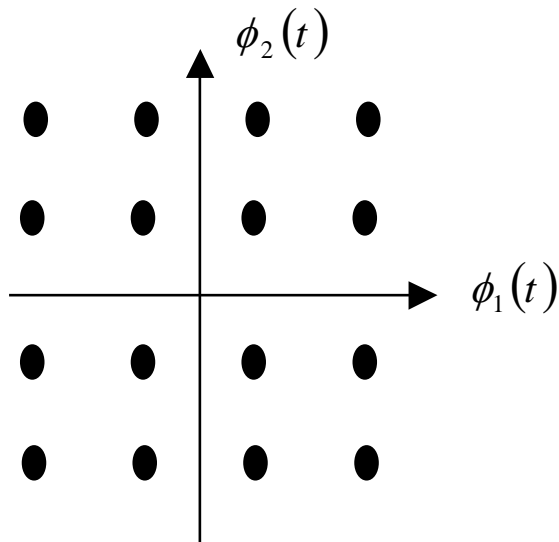


圖 2-12 整合線性及固定振幅之數位調變技術 (16-QAM)

- 利用三角餘弦與正弦的函數的組合，分別代表我們所要代表的信號狀態。
- 各個信號之間的振幅或者是距離並不是相等的



$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} a_i \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} b_i \sin(2\pi f_c t)$$

$$0 \leq t \leq T_b$$

$$M=16$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

M-ary 頻移鍵控 (MFSK)

- 用載波頻率之間的一個區隔，來表示所欲傳送的數位信號。
- 信號的頻率間隔，是二分之一的信號時間長短，同時彼此是互相垂直的 (orthogonal)。

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos\left[\frac{\pi}{T_b}(n_c + i)t\right] \quad f_c = n_c/2T_b$$

$$0 \leq t \leq T_b$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

Section 2.5

展頻

Spreading Spectrum

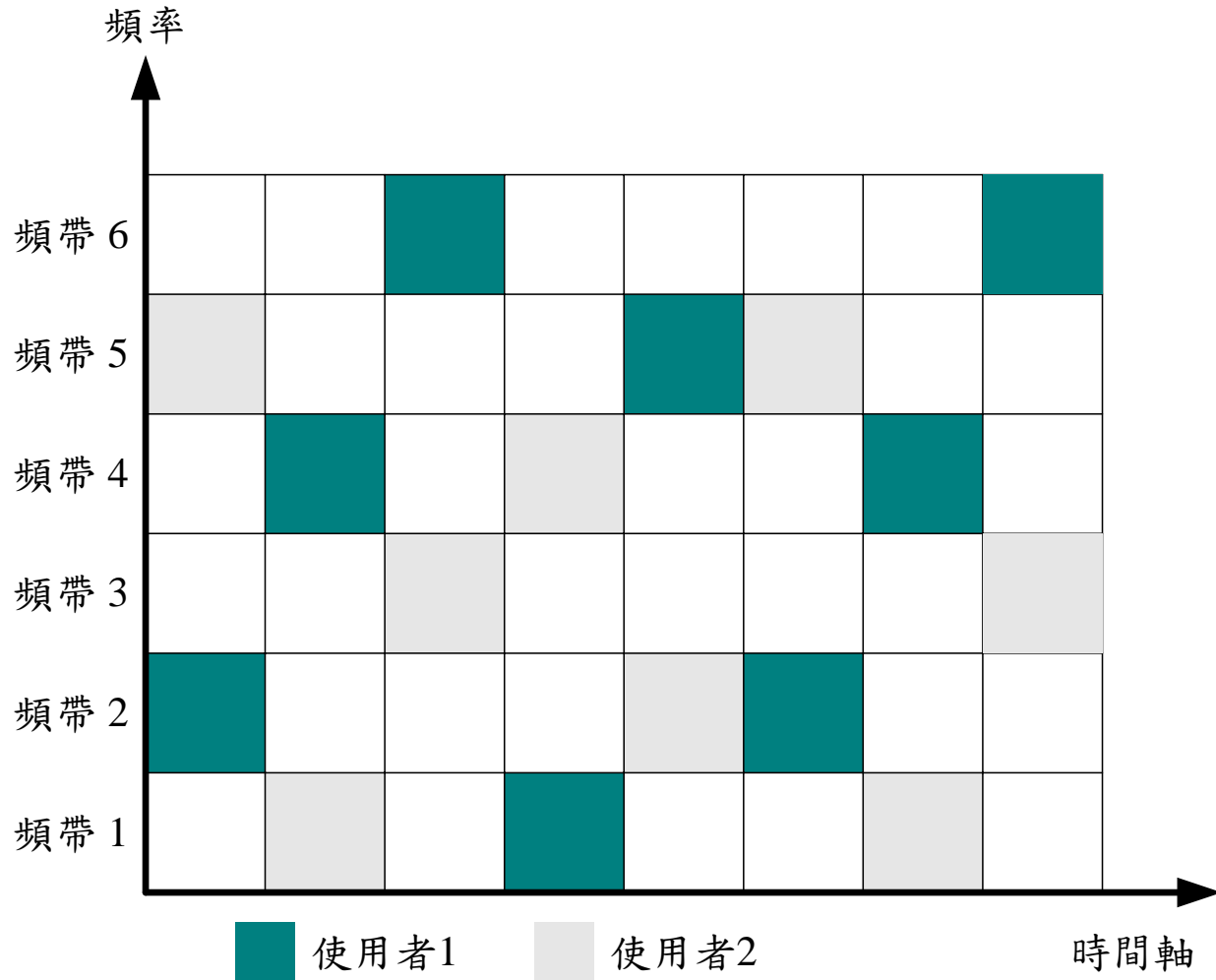
展頻

- 前面所談的各種調變技術，是希望用於傳輸信號的頻寬，也就是所使用通訊頻率的資源，能夠愈少愈好，提供更多的使用者來分享無線電資源。
- 相反的展頻顧名思義就是將所需要使用的頻帶的寬度，加以延展開來，使用更大的頻寬。
- 展頻調變技術通常分為兩類技術：
 - 跳頻展頻（Frequency Hopping Spread Spectrum，FHSS）
 - 直接序列展頻（Direct Sequence Spread Spectrum，DSSS）

跳頻展頻 (FHSS)

- 在信號傳輸的過程中，週期性地改變所使用的載波頻率，將一個原始信號使用的頻道，分散到一個很大的頻寬中。
- 在行動通訊系統中，跳頻被用於減輕干擾源的影響，增加系統的容量，以便服務更多的使用者。

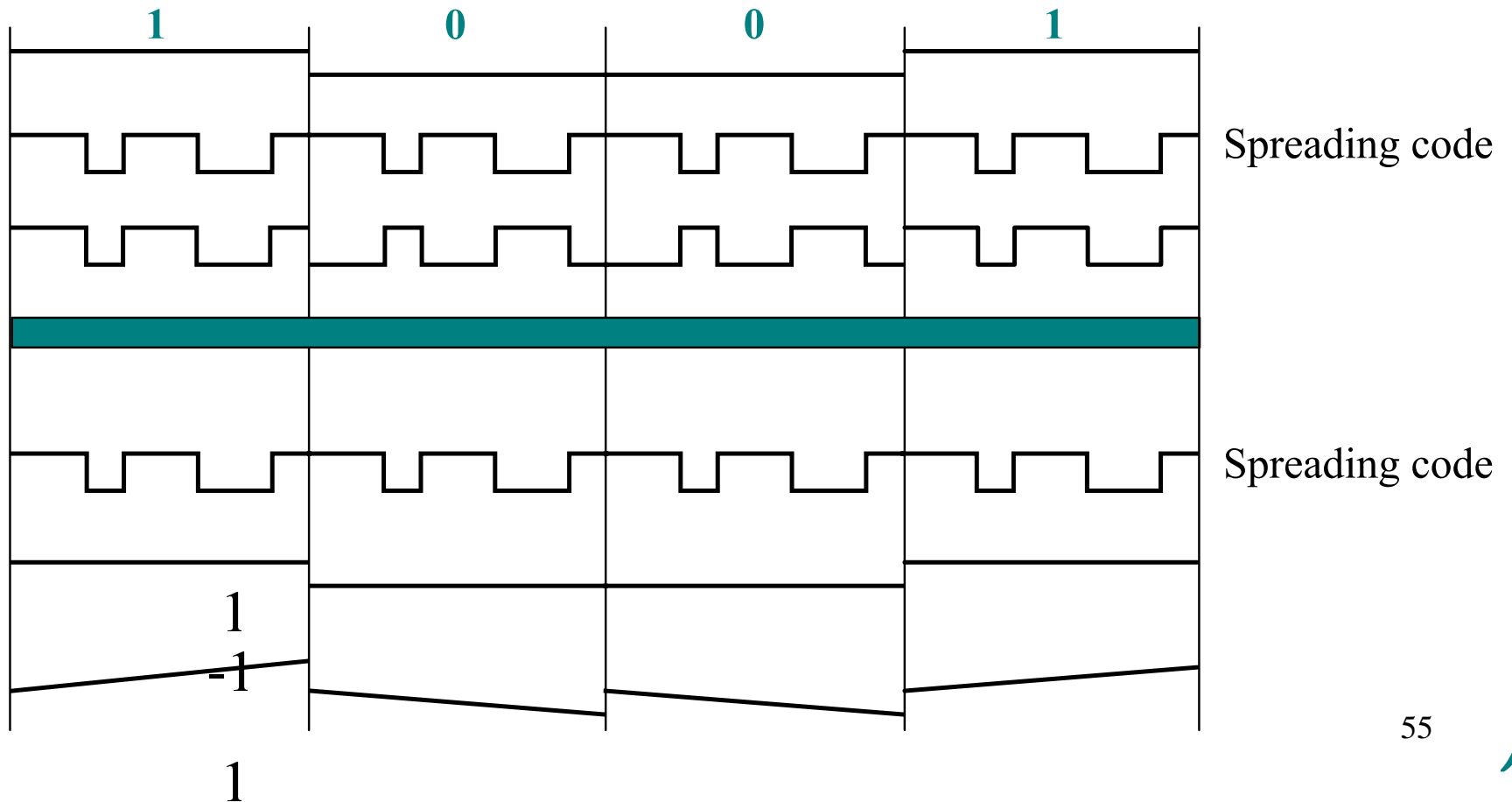
圖 2-13 跳頻展頻的示意圖



直接序列展頻 (DSSS)

- 將要傳送的信號直接乘上一串很長的位元碼（像是一串128個位元的0101...0101，碼中每個位元被稱為chip）。
- 一個0或1的原始信號，必須用許多的傳輸信號（chip）來表示，因此所需的頻帶會因此展開，成為一個寬頻的信號。
- 由於展頻通訊是將信號延展開來使用很大的頻寬，因此傳送的能量也分散於整個頻寬中。
- 較不怕受到其它無線電波的干擾，具有抗雜訊的優良能力。

圖 2-14 展頻與解展頻



Section 2.6

通道編碼與交錯分配

Channel Coding and Interleaving

降低傳輸錯誤率

- 對於具有即時性語音資料，無法在資料發生錯誤時重傳，所以在底層努力降低傳輸錯誤率是非常重要的。
- 可能的解決技術
 - 通道編碼 (channel coding)
 - 交錯放置 (interleaving)

通道編碼

- 利用編碼的方式加入額外的碼，以達到通道編碼的二種目的：錯誤偵測（error detection）與錯誤更正（error correction）。
- 加上額外的位元後，資料量會增加，是這種技術所必須付出的代價。
- 有兩類的編碼技術
 - 區塊編碼（block coding）
 - 迴旋計算編碼（convolution coding）

GSM 的通道編碼 (1/2)

- 將語音編碼後的 260 位元，分類成為三大類，依序為：非常重要的 50 位元、重要的 132 位元以及不重要的 78 位元。
- 非常重要的 50 位元資料經過區塊編碼成為 53 位元，與重要的 132 位元加上 4 位元尾碼後，經過迴旋計算編碼，成為 378 位元的數據資料。最後再配合不重要的 78 位元資料，成為總共擁有 456 位元的資料區塊。
- 此資料區塊利用 20ms 的時間進行傳送，因此語音傳送的速率為 $456\text{bits}/20\text{ms}=22.8\text{kbps}$ 。

GSM 的通道編碼 (2/2)

160 Speech samples = 2080 bits (20ms)

speech codec (RPE-LTP Encoder)

total 260 bits

非常重要的50 bits

較不重要的
78 bits

次重要的
182 bits

3-bit CRC

53 bits

1/2-rate convolution codec

4 Tail bits

378 bits

total 456 bits

Bit interleaver (456 bits分散到 8 bursts)

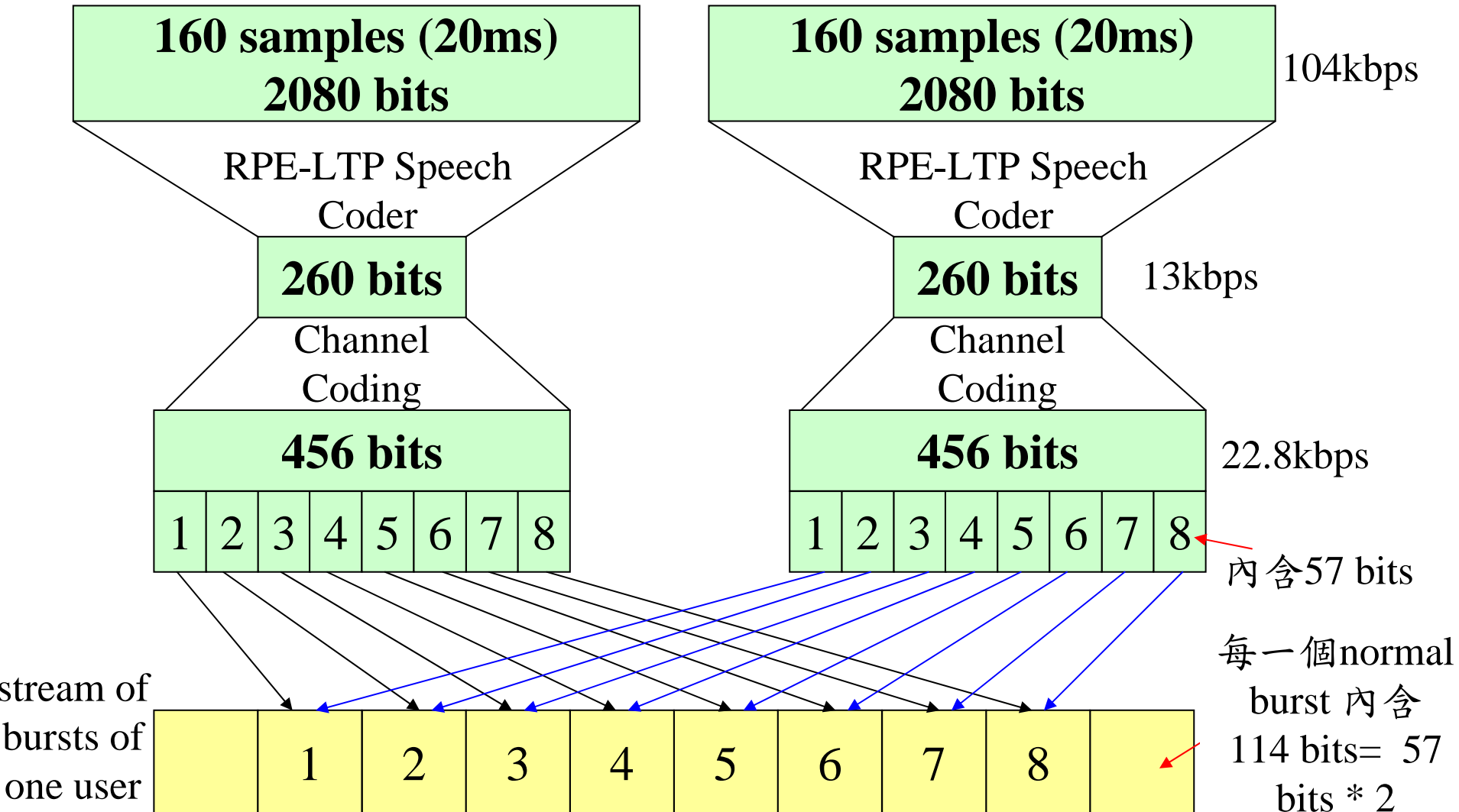
交錯放置

- 在不增加任何額外的傳輸資料量的情況下，降低受到干擾時產生資料傳輸錯誤的情形。
- 對於一些非常重要的語音資料，在傳遞的過程中，希望不要把它集中在某一個短暫的時間進行傳輸。
- 交錯放置是將要傳輸的資料，不是依據時間的順序傳送，而交錯地放置於不同的傳輸時段來傳送。
- 會產生延遲的現象。

GSM 的交錯放置 (1/2)

- GSM系統將編碼後的 456 位元交錯地放置在 8 個不同的時段，各有 57 個位元，每次送出二個時段的資料。
- 一旦遇到干擾造成錯誤，損失兩個時段的資料，理論上相當於失去四分之一的資料。但因原始資料經過交錯分散，失去的資料並不連續。對於接收端而言，可利用前述的通道編碼等，進行傳輸資料的錯誤偵測與更正，以此大幅降低資料傳輸的錯誤率。

GSM 的交錯放置 (2/2)



Section 2.7

結語

Summary

結語

- 無線電傳輸部分一直是行動通訊系統的瓶頸點，也是工程師們投注大量人力物力發展各種先進技術的領域。
- 瞭解這些無線電傳輸原理，對於瞭解行動電話系統的運作會有很大的幫助。

Homework

- 一 選擇題 (1)- (8)
- 二 問答題 1, 3, 5, 7