

科學圖書大庫

通 訊 系 統

(增訂本)

編著者 徐永德

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

通訊系統

編著者 徐人德

徐氏基金會出版

編輯要旨

本書係依據教育部於民國六十五年六月公布之五年制工業專科學校電子工程科暫行課程標準編輯而成。供電子工程科第四學年下學期。全學期三學分，每週授課三小時，共四十八小時之用。

全書以介紹通訊系統之概況為主，注重各種不同系統之應用範圍。儘量減少深奧之理論及繁雜之計算。又因數位系統日漸重要，有取代日前類比系統之趨勢，故若干部分係以數位的觀點來討論。

書中疏誤之處，尚望各位先進不吝指教是幸！

目 錄

編輯要旨

第一章 通訊理論之基本概念

1-1 通訊系統	1
1-2 消息之定量	4
1-3 消息之傳遞速度	6
1-4 傳遞速度與頻帶寬度	7
1-5 雜音之影響	9
1.5-1 白雜音	10
1.5-2 脈衝雜音	11
1.5-3 串音	11
1.5-4 串調雜音	12
1.5-5 回音	12
1.5-6 電平之突然改變	13
1.5-7 結言	13
1-6 消息之分配及交換	13
1-7 傳輸單位	15
1.7-1 基本單位	16
1.7-2 傳輸絕對單位	17
1.7-3 雜音測量單位	19
1.7-4 相對單位	21
1.7-5 dB 之功率電平的 相加	22

第二章 有線傳輸

2-1 概說	24
2-2 電話線之傳輸特性	24
2.2-1 損失	24
2.2-2 無限長線	25
2.2-3 衰減	26
2.2-4 相位	27
2.2-5 特性阻抗	28
2.2-6 反射	28
2.2-7 駐波比	30
2.2-8 阻抗	31
2-3 電纜	32
2.3-1 市內電纜	32
2.3-2 長途電纜	33
2-4 加荷	34
2-5 串音	36
2.5-1 磁力耦合	36
2.5-2 電力耦合	36
2.5-3 串音的測量	37
2.5-4 串音減輕方法	38
2.5-5 串音衰減量	39
2-6 同軸電纜之傳輸特性	39
2.6-1 概說	39
2.6-2 同軸電纜的特性阻 抗	40
2.6-3 同軸電纜的傳輸特 性	40

2.6-4 諧振線之應用	41
2-7 波導管	43
2.7-1 電波在波導管內之 型態	44
2.7-2 截斷波長	45
2.7-3 波導波長	48
2.7-4 相速與群速	49
2.7-5 尺寸選擇	49
2.7-6 波導管之阻抗	50
2-8 光纖維管	51
2.8-1 大氣層	52
2.8-2 光纖維管	52
2.8-3 光纜通訊系統簡介	55

第三章 無線傳輸

3-1 無線電波之傳播	57
3.1-1 大氣層的結構	57
3.1-2 電波傳播方式	58
3.1-3 各種電波之特性及 其用途	60
3-2 自由空間衰耗	61
3-3 繞射	61
3-4 散射	63
3-5 視線內之電波衰落	64
3.5-1 K型衰落	64
3.5-2 導層型衰落	65
3.5-3 大氣中之電波衰落	66
3-6 射頻與天線之指向性	66
3-7 消息頻帶寬度與射頻之 關係	68
3.7-1 發射種類	68
3.7-2 頻帶寬度	70
3.7-3 調幅收發訊機	71

3.7-4 調頻收發訊機	72
3.7-5 CCIR 對微波頻 帶的指配勸告	74

第四章 調 變

4-1 概述	75
4-2 振幅調變	75
4.2-1 調幅	75
4.2-2 調幅波之相量表示	78
4.2-3 調幅波之能量	80
4.2-4 雙邊帶抑制載波調 幅	82
4-3 角度調度	83
4.3-1 頻率調變	83
4.3-2 相位調變	86
4.3-3 調頻邊帶結構	89
4.3-4 調相波分析	92
4.3-5 調頻之頻帶寬度	93
4.3-6 調頻與調相之比較	94
4.3-7 調頻波之相量表示	95
4-4 脈波調變	96
4.4-1 抽樣	97
4.4-2 訊號之重建	99
4.4-3 抽樣定理	100
4.4-4 抽樣脈波寬度之影 響	101
4.4-5 實際訊號重造的考 慮	103
4.4-6 抽樣與脈衝	104
4.4-7 博幅調度	106
4.4-8 PAM之訊號與雜 音	107
4.4-9 抽樣及保持	107

4.4-10	平頂抽樣	109
4.4-11	抽樣與保持電路	112

第五章 劃時多工制

5-1	概說	113
5-2	劃頻多工制	113
5.2-1	頻率轉換	114
5.2-2	CCITT 調變計劃	114
5.2-3	劃頻多工制之結構	117
5.2-4	劃頻多工制載波機 電路說明	119
5.2-5	運用方式	125
5.2-6	各部份簡單說明	125
5.2-7	信號方式	132
5-3	劃時多工制	135
5.3-1	PCM系統	137
5.3-2	TDM系統在實用 上的考慮	138
5.3-3	同步	141
5.3-4	量化	150
5.3-5	PCM輸出脈波	152
5.3-6	博碼調變解調器	159
5.3-7	TDM-PCM時間 分割多工化	160
5-4	博碼調變訊號之壓縮	162
5.4-1	線性量化之缺點	162
5.4-2	壓伸作用	163
5.4-3	對數壓伸作用	164
5.4-4	壓伸量化電平	165
5.4-5	壓伸後博碼調變之 信號雜音比	166

5.4-6	壓伸器	166
5-5	博碼調變訊號與雜音	167
5.5-1	量化誤差	167
5-6	PCM終端機	171
5-7	單極性與雙極性	172
5-8	再生中繼器	172
5-9	PCM之特徵	174

第六章 數據傳輸

6-1	概說	175
6-2	數據通信系統	177
6.2-1	線上與線外系統	177
6.2-2	即時系統	178
6.2-3	分時作業系統	179
6.2-4	數據通信系統的分 類	179
6-3	數據之傳輸	179
6.3-1	標準電碼	179
6.3-2	二元符號之波形	180
6.3-3	傳輸方式	181
6.3-4	數據傳輸速率	182
6-4	數據傳輸電路	183
6.4-1	直接式傳輸	184
6.4-2	數據傳輸電路之類 別	185
6.4-3	單工、半雙工、全 雙工電路	185
6-5	調變器	186
6.5-1	概說	186
6.5-2	調變器之調變方式	187
6.5-3	調幅數據系統	187
6.5-4	移頻鍵	191
6.5-5	移相鍵	192

6-6 數據傳輸誤差控制·····	197
6.6-1 誤差控制的分類·····	197
6.6-2 誤差之檢出方式·····	198
6.6-3 數據傳輸之誤差控制·····	200

第七章 微波中繼系統

7-1 微波的傳播特性·····	202
7-2 地面的反射·····	203
7-3 微波通信之有效距離·····	206
7-4 天線高度的影響·····	207
7-5 中繼方法·····	208
7.5-1 主動中繼法·····	208
7.5-2 被動中繼法·····	210
7-6 衛星轉接·····	212
7.6-1 通信衛星·····	212
7.6-2 地球電台·····	216

7.6-3 衛星通信技術之發展·····	217
----------------------	-----

第八章 交換系統

8-1 概說·····	219
8-2 交換機的機能條件·····	220
8-3 交換機基本原理·····	221
8.3-1 人工交換機·····	221
8.3-2 自動交換機·····	223
8-4 儲存程式交換機·····	227
8-5 用戶專用交換機·····	234
8.5-1 用戶專用交換機之機能條件·····	235
8.5-2 共電式用戶交換機·····	236
8.5-3 按鍵電話設備·····	237
8.5-4 60 門縱橫式用戶交換機·····	242

第一章 通訊理論之基本概念

1-1 通訊系統 (Communication System)

凡可促進一個人瞭解其本身以及其環境之任何資料是為消息 (Information)。將消息自某一地點傳遞至另一目的地之工作，稱為通訊 (Communication)，其中藉電力而達到通訊的目的者，稱為電信 (Telecommunication)。欲達到通訊的目的，它必須包括五個最基本的設備，即消息源 (Information Source)，發訊機 (Transmitter)，傳輸媒介 (Transmission Medium)，收訊機 (Receiver) 及受信物 (Information Sink) 等。如圖 1.1-1 所示為此系統五種基本設備構成方塊圖。圖中消息源為產生消息之來源，它可為人，也可為機器（如話機，音樂、電視、錄放機或電子計算機）。消息源之消息係藉信息 (Message) 而發出，如文字、符號、影像、音樂及話音等皆為信息之實例。因信息是非常抽象的意態，或屬於不適於利用傳輸媒介傳輸之音響或其他低頻之時間波形，故必須變換或處理成適當之傳輸訊號 (Transmission Signal)，而此種變換或處理工作之設備稱為發訊機。發訊機，一方面必須配合消息源之特性而對各種可能之信息作適當的處理，以使消息之傳輸不致錯誤或失真，另一方面必須配合傳輸媒介之特性（如傳輸頻率，頻帶寬及雜訊干擾等），以使能達到媒介之經濟利用及獲得快速而準確之消息傳遞。傳輸媒介，如電話線，無線載波，雷射載波，錄音帶或錄影帶等，往往具有一定之有效頻寬與雜訊干擾。收訊機必須經常觀察傳輸媒介之輸出訊號，且將之處理並轉換成信息以傳送給受信物。受信物亦可為人，亦可為機器。

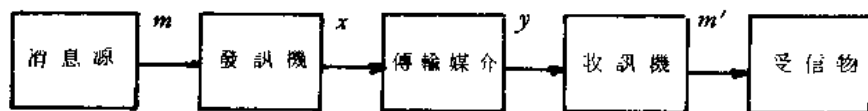


圖 1.1-1 通訊系統

通訊理論在剖析消息及傳輸媒介之特性，並研究如何配合其特性，設計最佳發訊機與收訊機，以達到有效（即消息之快速傳遞與傳輸媒介之充分利用）及可靠而準確傳遞之理想目標。

某些消息源，其輸出信息屬於文字，數字或其他固定數目的分立狀態（Discrete State），如電報機，電傳打字機及電算機等稱為分立性消息源（Discrete Source），通稱為數位源（Digital Source）。另有一些消息源，它的輸出信息乃是藉連續性之狀態變化來表現，如人的口，樂器、電視播映機及描圖記錄器等，稱為連續性消息源（Continuous Informaticm Source），通稱為類比源（Analog Source）。因此數位源之輸出信息為分立變數（Discrete Variable），如英文字母，阿拉伯數字或漢字等，其可能之輸出，雖不可預料，但限在固定數目之特定輸出之內；而類比源之輸出信息，如語音、樂音、影像及其他連續曲線等，它不但不可預料而且有無法計數之變化。

對於數位源，通訊系統中之發訊機必須依據各分立信息出現之隨機特性（Randomness）而作適當之處理，並變換之使成為數字式之電或磁訊號，稱為數碼（Data Code）或稱數據訊號（Data Signal），而此處理與變換過程，通稱為消息源之編碼（Encoding）。因消息係藉信息而傳遞，故消息源之編碼即為信息編碼（Message Encoding），此種設備，稱為消息編碼器（Information Encoder），一般信息之編碼，以採用二進位數字編碼（Binary Digit Encoding）為主，簡稱為二進位編碼。數位源之每一輸出，均以 L 個二進位數字“0”與“1”代表之，稱為長度為 L 比次（Bit）之數據碼字（Data Code Word），而每一個二進位數字之輸出，分別以兩種電或磁之訊號（如0伏特代表“0”，5伏特代表“1”）代表輸出。此種數據訊號，可直接經由傳輸媒介而傳輸，但為使傳輸能達更可靠及更為有效起見，常須再經一次編碼，稱為通路編碼（Channel Encoding），而其設備則稱為通路編碼器（Channel Encoder）。它將輸入之二進位數據電碼轉換成特定之 K 進位數字之電碼，通稱為通路電碼。通路電碼有時仍不能直接經由傳輸媒介傳輸，而必須再經變換，此變換稱為濾波（Filtering）。其目的在使通路電碼（或數據電碼）能利用不同之傳輸媒介特性，如電話線，有線載波電路或無線載波電路等傳輸至較遠之處，且能克服種種雜訊及干擾之侵害。就是發訊機即由消息編碼器，通路編碼器及濾波器所構成。收訊機則須有收訊濾波器，通路解碼器及消息解碼器（Source Decoding）所構成，如圖 1.1-2 所示為數位通信系統。

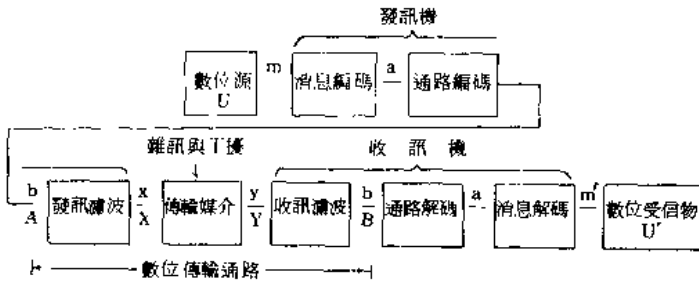


圖 1.1-2

對於類比消息源，因發出之消息是時間的連續波形，故可以以 $m(t)$ 表示之，如欲將它傳送到遠方之受信物，必須配合不同的傳輸媒介，而對 $m(t)$ 訊號作適當的改變，稱為調變 (Modulation)，而在收訊機內，必須裝有與發訊機相反之設備，稱為解調 (Demodulation)，如圖 1.1-3 所示，此種通訊系統，稱為類比通訊系統，而其調變，傳輸媒介與解調等三者組成了類比傳輸通路 (Analog Transmission Channel)。 $m'(t)$ 為解調後之接收信息波形。一般 $m'(t)$ 不可能與 $m(t)$ 完全相同，而有誤差 $e(t) = m(t) - m'(t)$ ， $e(t)$ 之統計均方值 (Mean-Squared Value)，普通稱為失真 (Distortion)，而其倒數，則稱為傳真度 (Fidelity)，兩者均為類比通訊系統之品質評定之依據，失真愈小，傳真度愈高而通信品質愈高。

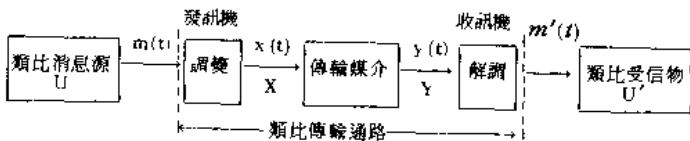


圖 1.1-3 類比通信系統與類比傳輸通路

類比消息之信息亦可藉數位通路來傳輸，如圖 1.1-4 所示，圖中類比 / 數位變換是將類比信息 $m(t)$ 作週期性之取樣 (Sampling)，而後將取樣量



圖 1.1-4 利用數位傳輸電路之類比通訊系統

化 (Quantize) 並轉換成上述之數據電碼，而數位/類比變換則進行與類此/數位相反的變換與處理。將接收之數據電碼，變成類比信息 $m'(t)$ 。

1-2 消息之定量

消息源發出之各信息，它之所以能帶有消息，乃是因它發生，係屬於機遇 (Probabilistic) 性質，它表示事先無法預料而且具有不測性 (Uncertainty)。
 它一旦發生，則不僅令人驚訝，而且其不測性因而減除。消息理論指出，某一信息所帶給的消息，即為不測性之減除，而此不測性減除之程度，即為其所帶給之消息量。

在實際上，可將消息源當作一種信息之數學集合，並以各信息之機遇率分佈特性說明其隨機性 (Randomness)。例如就數位源來說，其信息可為文字，而信息之集合，即為可能出現之天文字集合，如可能之文字有 M 種，則此信息合可寫成

$$U = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_M\}$$

而其隨機性可以用機遇率集合

$$P = \{P(m_1), P(m_2), P(m_3), \dots, P(m_M)\}$$

表示之，其中 m_i 為文字 (信息)，而 $P(m_i)$ 為文字 m_i 出現之機遇率， $i = 1, 2, \dots, M$ 。因文字出現之機遇率愈小，其不測性 (即神秘性) 愈大，則一旦發生後所帶給我們的也愈多；反之，其機遇率愈大，則不測性愈小，所以某文字 (信息) 之不測性應為其機遇率之單調遞減函數 (Monotonic Decreasing Function)。

假設某信息發生之機遇率為 $P(A)$ ，如其發生時所帶給之消息量以 $I(A)$ 表示，則它必為 $P(A)$ 之函數，即 $I(A) = f[P(A)]$ ，且 $f(\cdot)$ 必須符合下列必備之條件：

(a) $P(A) = 1$ 時 $I(A) = 0$ ，表示，必定發生之信息，不可能帶給任何消息 (也就無傳遞之必要)。

(b) 在機遇率性質 $0 \leq P(A) \leq 1$ 之條件下， $I(A) \geq 0$ 即表示信息所帶給之消息量為正值。

(c) 設有兩信息 A 與 B ，若 $P(A) < P(B)$ ，則 $I(A) > I(B)$ ，即表示 $f(\cdot)$ 為機遇率之單調遞減函數。

(d) 設若 A 與 B 兩獨立發生之信息，則 $I(AB) = I(A) + I(B)$ 。即互相獨立發生之兩信息一旦發生，則所帶給之消息量等於其個別發生時所帶給之消息量之和。

欲滿足上述四條件之函數，則 $f(\cdot)$ 必須為對數函數，寫成

$$I(A) = \lambda \log_b \frac{1}{P(A)} = -\lambda \log_b [P(A)] \quad (1.2-1)$$

式中 λ 為任意正值常數，而 b 為對數之底數。通常取 $\lambda=1$ ，且 $b=2$ 時，則此消息量之單位為比次 (Bit)。(1.2-1) 式可寫成

$$I(A) = -\log_2 [P(A)] \text{ 比次} \quad (1.2-2)$$

(1.2-2) 式表示，當信息 A 之發生與不發生之機會相等時，即 $P(A)=1/2$ 時， $I(A)=1$ 比次。可見 1 比次為消息量之基本單位，它相當於機會均等之二進位數字出現時所帶給之消息量。

在這種消息之量度下，數位源 $U = \{m_1, m_2, \dots, m_M\}$ 中任一信息 m_i 發生時所帶給之消息量可依 (1.2-2) 式寫成

$$I(m_i) = -\log_2 P(m_i) \text{ 比次} \quad (1.2-3)$$

如令 $H(U)$ 表消息源之每一信息出現時所帶給之消息量之統計平均值 (Statistical Mean Value)，則

$$\begin{aligned} H(U) &= \sum_{i=1}^M P(m_i) I(m_i) \\ &= - \sum_{i=1}^M P(m_i) \log_2 P(m_i) \text{ 比次/信息} \end{aligned} \quad (1.2-4)$$

$H(U)$ 值通稱為消息源之熵量 (Entropy)，其單位為比次/信息，如信息為文字，則單位為比次/文字。

【例一】消息源為一部電報機，設其最多能夠發出之文字 (含數字在內) 共有 M 種，而此 M 種文字出現之機遇率均等，即 $P(m_i) = 1/M$ ，則由 (1.2-4) 式可得

$$H(U) = \log_2 M \text{ 比次/文字} \quad (1.2-5)$$

此表示，該電報機每發出一個文字，就等於帶給 $\log_2 M$ 比次之消息量。常用電報機 $M=32$ ，故每發出一字相當於送出 5 比次之消息。

【例二】消息源為一新聞廣播員，假設其所識字彙只有一萬字，而每次之新聞稿字數均為一千字，則共有 $M=(10000)^{1000}$ 種可能之不同廣播。又設每種廣播出現之機遇率均等，則由 (1.2-5) 式知 $H(U) = 1000 \log_2 10000 = 1.329 \times 10^4$ 比次/廣播，此表示每次新聞廣播相當帶給 1.324×10^4 比次消息。

【例三】消息源為電視放映機。假設每影框 (Picture Frame) 之規格為縱 500 點及橫 600 點，且每點之黑白亮度有十個準位 (Level)，則一框

可有 $500 \times 600 = 300,000$ 點，故此種放映機一共可放映 $(10)^{300,000}$ 種不同之影響，又假設每一影像出現之機會均等，則由 (1.2-5) 式得

$$H(U) = 300,000 \log_2 10 \approx 9.967 \times 10^5 \text{ 比次/影像}$$

此即表示每一不同影像之出現，相當帶給 9.967×10^5 比次的消息。

1-3 消息之傳遞速度

設數位源每 τ_s 秒發出一個信息，即發信之速度為 $1/\tau_s$ (信息/秒) 則

$$R_s = H(U)/\tau_s \text{ 比次/秒} \quad (1.3-1)$$

此即消息源提供消息之平均速度，稱為消息源速度 (Information Source Rate)。消息源速度也可以 $H(U)$ / 信息表示之，它可換算成 R_s 。如例三，設影框每換一次之平均週期為 $1/15$ 秒，則由 (1.3-1) 式可求出該電視放映機之相當消息速度為

$$9.967 \times 10^5 \times 15 = 1.5 \times 10^7 \text{ 比次/秒}$$

消息源編碼定理指出，假設對應於每一數位源之輸出信息均以一長度 L 比次之二進位碼字代表輸出，則欲得無錯誤之編碼，其最小之碼字長度應大於或等於 $H(u)$ 比次，即

$$L \geq H(U) \text{ 比次} \quad (1.3-2)$$

因含有 M 種不同信息之消息源的最大值，發生在各信息出現之機會均等之情況，而此值為 $\log_2 M$ 比次，即一般 $H(u) \leq \log_2 M$ 故由 (1.3-2) 式可得

$$L \geq \log_2 M \quad (1.3-3)$$

此式在實際通訊系統設計中很有用。例如英文電報中 $M = 32$ ，故每一文字平均至少須以 5 比次電碼編號，這是 5 鮑電碼 (5 Band Code) 之來由。

若將 (1.3-2) 式兩邊除以 τ_s ，則得

$$R_s = \frac{L}{\tau_s} \geq R_s \quad (1.3-4)$$

式中 R_s 稱為數據訊號速度。最經濟之消息源編碼為 $R_s = R_s$ 。

對於類比消息源，令 m 為消息源在某一時刻下之輸出信息，因 m 為連續性變數，且具有隨機性，故屬於連續性隨機變數 (Continuous Random Variable)。如又令 U 為所有可能之隨機變數 m 之集合，則因 m 為連續性變數，其隨機性不能以機遇率表示，而必須以機率密度函數 (Probability Density Function) 取代之，寫成 $P_u(m)$ 。利用 (1.2-4) 式，由微積分理論，可導出類比消息源之熵量之估計方法如下式

$$H(U) = - \int_{-\infty}^{\infty} P_u(m) \log_b P_u(m) dm \quad (1.3-5)$$

其中，若令 $b = 2$ ，則 $H(U)$ 之單位仍為比次/信息，信息指每一短暫時刻下之波形幅度。例如音響喇叭之類比消息源，設它在某短暫時刻下之輸出音響強度為 m dB (m 為隨機變數)，且其機遇密度函數為常態分佈型即：

$$P_u(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} e^{-\frac{m^2}{2\sigma_m^2}} \quad (1.3-6)$$

由此式可求得熵量為

$$H(U) = \frac{1}{2} \log_2 (2\pi e \sigma^2) \text{ 比次/信息} \quad (1.3-7)$$

1-4 傳遞速度與頻帶寬度

類比消息源之編碼理論已在前述及。假設類比信息 $m(t)$ 具有頻帶寬度之限制，其頻寬為 $B_m H_s$ ，則根據取樣定理 (Sampling Theorem)，理論上，可自 $m(t)$ 波形之每 T_s 秒所作之週期性之取樣樣本重造出原來之 $m(t)$ 波形，但須符合 $T_s \leq \frac{1}{2} B_m$ 秒之條件，亦即符合 $f_s \geq 2 B_m H_s$ 之條件。其中， $f_s = 1/T_s$ 稱為取樣速率 (Sampling Rate)。同時類比消息之編碼定理指出，如欲使類比信息傳輸之失真度小於 D 值，則輸出數據速度 R_s 必須大於 R_s ，但

$$R_s = B_m \log_2 \frac{Q_m}{D} \text{ 比次/秒} \quad (1.4-1)$$

式中

$$Q_m = \frac{1}{2\pi e} e^{2H(u)} \quad (1.4-2)$$

此表示具有熵量 $H(U)$ 且可容許傳輸失真小於 D 值之消息源，相當消息源速度為 $B_m \log_2 Q_m / D$ 比次/秒之數位消息源。

(1) 消息傳輸容量

一頻路的容量表示，可毫無錯誤經由該頻路發送信息的最高速度，數據傳遞以比次/秒表示之。

在一頻路上發送數據之速度，與該頻路的頻帶寬度成正比。1928年哈特萊氏證明，發送一定量信息需要一定的頻帶寬度乘以時間，此可由以點劃莫斯電碼錄存數據的唱片說明之。如果唱片轉動的速度加快一倍，播放此電碼數據的時間即減半。唱片的速度加倍，聲音的頻率亦加倍，所用之頻帶寬度亦加倍。

在1924及1928年倪奎斯(Nyquist)氏亦曾發表有關無雜音頻路的容量論文。證明如果發送每秒 $2B$ 不同的電壓值(或其他符號),則可將一頻率小於 B 之訊號予以發送。如果發送的頻率大於 B ,則數過多(Redundant),對接收機重組一連串的訊號值而言,並無需要。圖1.4-1表示各種頻寬對傳輸波形之變化情形。

換言之,頻帶寬度 B 可以傳送每秒 $2B$ 各別的電壓值。如果發送的是二進位電報訊號,則發送的電壓必為二適當值中之一。因此可以發送 $2B$ 比次/秒。若在任一瞬間藉四種可能電壓電平同時發送兩比次,則每秒 $2B$ 電壓值即可用以組成每秒 $4B$ 電碼。任一瞬間八種交替的電壓值可用以組成三比次電碼,達成每秒 $6B$ 的訊號率(Signaling Rate)。

使用 2^n 訊號準位之一,即可在任一瞬間發送 n 比次。用此具有 2^n 可能性並能區別的訊號電平,即可經由一頻帶寬度為 B Hz的頻路發送每秒 $2nB$ 的訊號率。

設 L 為訊號的電平數

$$2^n = L$$

$$\therefore n = \log_2 L$$

所以頻路容量 C ,在無雜音時,為

$$C = 2B \log_2 L \quad (1.4-3)$$

(2) 有雜音時頻路之作業速度

向農氏證明一頻路具有一固定的最高容量。設訊號功率為 S ,經由白雜音功率為 N 之頻路發送時,該路以每秒比次數為單位的容量為

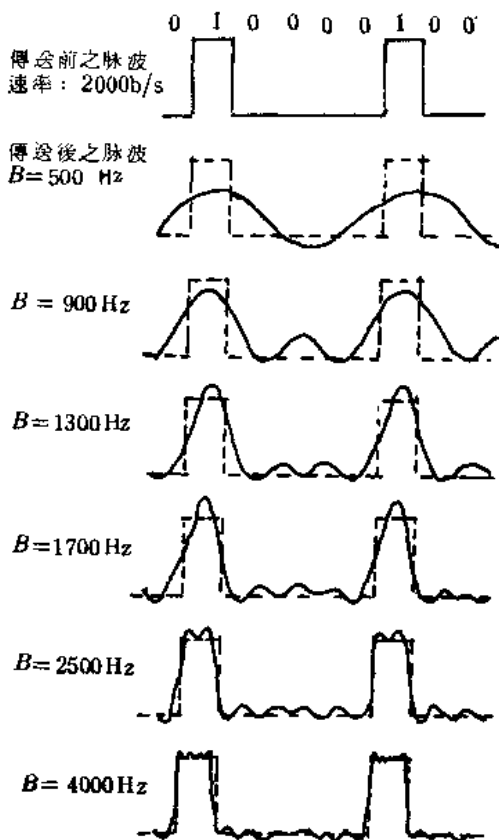


圖 1.4-1 不同之頻寬傳送脈波之效應

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1.4-4)$$

此式用三個已知或可以測知的參數以說明一通信頻路的最大訊號率。此式亦稱向農哈特萊定律。根據此定律，可以在時間 T 秒經一頻路發送的最大數據比次數為

$$BT \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

假定一電話線路的某段已知具有 20 dB 的 S/N 比。即該線路的雜音功率為送訊功率的百分之一。現欲利用該線路發送數據，它可用的頻帶寬度為 2600 Hz，則應用 (1.4-4) 式，可求得該線路的容量為

$$\begin{aligned} C &= 2600 \log_2 \left(1 + \frac{100}{1} \right) \\ &= 2600 \log_2 101 \\ &= 17,301 \end{aligned}$$

因此可經由此線路發送數據最高可能速度約為 17300 比次/秒，若 $S/N = 30$ dB 則

$$C = 2600 \log_2 1001 = 25,900 \text{ bit/sec}$$

增進速度的唯一辦法為徹底改善線路的構造，例如增加頻帶寬度，減少雜音功率。

實際利用話音線路的實用系統，其作業速度遠較上述為低，話音線路目前最通用之速度為 600 比次/秒，或 1200 比次/秒，由於信號制的考慮，話音線路實際可供傳輸數據用的僅限於 2600 比次/秒以下，即使線路品質再好，全部頻寬均可使用，雖作業速度可高至 4800 比次/秒，預計不久更可提高至 7200 比次/秒，但目前最通用的作業速度仍多在 2400 比次/秒為限。不可能再高的原因，如達到 (1.4-4) 式中最高速度的目的，它所需編碼法的要求將隨字語之愈長而趨於複雜，終至延擱於編碼和解碼的時間亦將愈來愈久。

由 (1.4-4) 式又告訴我們，一類比通路可由增加 S/N 比，以減少所需頻寬，或增加頻寬以減少 S/N 比，亦即 S/N 與頻寬可互相斟酌作有利的補償。

1-5 雜音之影響

對於雜音可作如下之分類：

雜音 { 內部雜音 (熱雜音或稱白雜音、碰撞雜音及其他)
 { 外部雜音 { 自然雜音 (宇宙雜音、其他)
 { 人為雜音 (汽車火星塞所生雜音、及其他)

如以現象論點來分爲：

雜音 { 脈衝性雜音：如汽車火星塞所生之雜音。
 { 連續性雜音：如熱雜音等。

1.5-1 白雜音 (White Noise) 所有物質中原子的電子均在微小的運動中不斷振動，引起熱覺，溫度愈高，振動愈大。因電子振動而發生電磁波，更因電子衆多，於是產生了各種頻率的電磁波，導體中的電子以同樣的散亂形式運動，此種運動因而產生雜音 (Noise)。白雜音爲

$$N = KTB \quad (1.5-1)$$

式中 K = 波爾滋曼常數 $\approx 1.37 \times 10^{-28}$ 焦耳/度。

B = 頻帶寬度。

$T = 273^\circ + t^\circ$ = 凱氏單位溫度數。

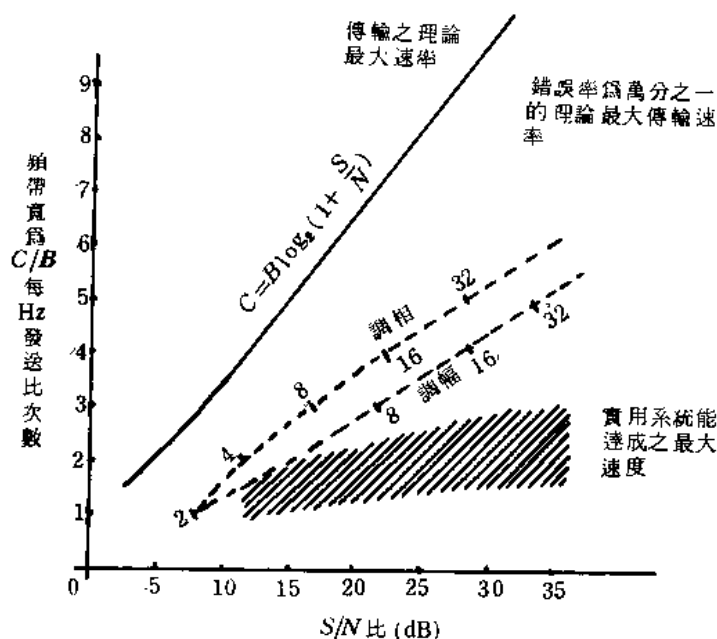


圖 1.5-1 頻寬與 S/N 比之關係