

21602/2706

第二十三篇

電信工程

第一章 總 說 陳德勝 林齊炎 張瑞琮

1.1 通信理論	23 - 1
1.2 通信網	23 - 13
1.3 傳輸標準	23 - 26
1.4 通信方式	23 - 57

第二章 音響機與電話機 林仁紅

2.1 聲與語音	23 - 69
2.2 音之測定	23 - 76
2.3 音響機器	23 - 84
2.4 電話機	23 - 91

第三章 電話交換 李炳輝

3.1 電話網路與話務	23 -101
3.2 電話網路形態	23 -106
3.3 編號計畫	23 -110
3.4 信號方式	23 -112
3.5 計費方式	23 -117
3.6 交換方式	23 -118

第四章 電話傳輸 潘榮宜 楊守仁

4.1 音頻傳輸系統	23 -157
4.2 頻帶氣多工制傳輸系統	23 -163
4.3 擇碼調變載波方式	23 -183

第五章 電報及數據傳輸 林齊炎

5.1 電報方式	23 -198
5.2 電報打字機	23 -203

5.3 載波電報	23 - 212
5.4 電傳真機	23 - 217
5.5 數據傳輸	23 - 226

第六章 通信線路 王傳模 楊肇鳳 呂炳財 張瑞琮 簡文純

6.1 明線	23 - 239
6.2 市內電纜線路	23 - 246
6.3 長途電纜線路	23 - 258
6.4 海底電纜	23 - 271
6.5 感應干擾	23 - 292
6.6 電蝕	23 - 318
6.7 保安裝置	23 - 319

第七章 電波傳播 黃鹿年

7.1 電波之分類	23 - 337
7.2 電波之傳播方式	23 - 340
7.3 收訊電場強度	23 - 341
7.4 視線範圍內之電波衰落現象	23 - 347
7.5 視線外傳播	23 - 351

第八章 天線 徐永德

8.1 天線的基本特性	23 - 354
8.2 線狀天線	23 - 358
8.3 立體天線	23 - 370
8.4 饋電線	23 - 374

第九章 中短波、短波及超短波固定通信 許炳文 蒙志忠

9.1 各電波之特性	23 - 380
9.2 中短波固定通信	23 - 382
9.3 短波固定通信	23 - 383
9.4 超短波固定通信	23 - 390

第十章 微波通信 俞進一

10.1 概說	23 - 4
10.2 微波通信設備	23 - 4
10.3 微波多工電話通信系統之雜音	23 - 4

第十一章 行動通信 許炳文

11.1 概說	23 -
11.2 行動通信之運用	23 -
11.3 行動通信之傳播特性	23 -
11.4 行動通信系統之設計	23 -
11.5 選擇信號及控制	23 -

第十二章 新通信方式 朱肇岫 唐益光 蔡必毓

12.1 衛星通信	23 -
12.2 毫米波通信	23 -
12.3 光通信	23 -

第二十三篇

電 信 工 程

主編：金 耀 輝

編者：王 傳 模 朱 肇 岫 呂 炳 財 李 炳 輝

林 仁 紅 林 齊 炎 俞 進 一 徐 永 德

許 炳 文 黃 胤 年 陳 貞 翌 陳 德 勝

張 瑞 琮 楊 守 仁 楊 肇 鳳 詹 益 光

詹 益 樹 蒙 志 忠 黎 必 誠 潘 榮 宜

簡 文 純

(按姓氏筆劃爲序)

第一章 總 說

1.1 通信理論

1.1.1 通信系統與通信理論

將消息 (Information) 自某一物體 (或某一地點) 傳遞至另一物體 (或目的地) 之工作，稱爲通信 (Communication)，其中藉電力而達通信之目的者，稱爲電信 (Telecommunication)。欲達通信之目的，廣義言之，必須涉及五個最基本設備，即消息源 (Information Source)、發訊機 (Transmitter)、傳輸媒介 (Transmission Media)、收訊機 (Receiver)、及受信物 (Information Sink) 等。此五種基本設備構成通信系統之最基本模型，如圖 23.1.1 所示。圖中，消息源爲產生消息之來源，其可爲人，也可爲機器 (如話機、音樂或電視、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、音樂及語音皆爲信息之實例。因信息非常抽象意態，或屬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信號 (Transmission Signal)，而此種變換或處理工作之設備，稱爲

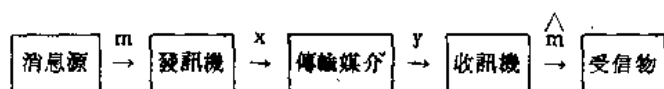


圖 23-1-1 通信系統之最基本模型

發訊機。發訊機，一方必須配合消息源之特性而對各種可能之信息作適當之處理以使消息之傳輸不致錯誤或失真，另一方必須配合傳輸媒介之特性（如傳輸頻率、頻帶寬、及雜訊干擾情況等），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之理想。傳輸媒介，如普通電話線、無線電波、雷射電波、錄音帶或錄影帶等，往往具有一定之有效頻帶寬與雜訊干擾。收訊機必須經常觀察傳輸媒介之輸出信號，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 23-1-1 中， m 表發送之信息， x 表傳輸信號， y 表媒介之輸出信號，而 m 表受信物收到之信息。

通信理論在剖析消息源及傳輸媒介之特性，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（即準確之消息傳遞）之理想目標。

某些消息源，其輸出信息是文字、數字、或其他固定數目之分立情態（Discrete State），如電報機、電傳打字機、及電子計算機等，稱為分立性消息源（Discrete Source），通稱為數位源（Digital Source）。另有些消息源，其輸出信息乃藉連續性（Continuous）之情態變化而表現，如人之嘴巴、樂器、電影放映機及描圖記錄器等，稱為連續性消息源（Continuous Information Source），通稱為類比源（Analog Source）。因此，數位源之輸出信息 m 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 m ，如語音、樂音、影像及其他連續曲線等，其不僅不可預料，而且可有無法計數（Uncountable）之變化。

對於數位源，通信系統中之發訊機必須依據各分立信息（如文字或數字，出現之隨機特性（Randomness）而作適當之處理，並轉換之使成數字式之電或磁信號，稱為數據電碼，或稱數據信號（Data Signal）。而此處理與轉換過程，通稱為消息源之編碼（Source Encoding）。因消息係藉信息而得傳遞，故消息源之編碼，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。數位源之每一輸出信息（如文字），

均以 L 個二進位數字 (Binary Digit, 即“0”與“1”) 代表之, 稱為長度為 L 比次 (Bit, 為 Binary Digit 之簡寫) 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信號 (如 0 伏特電壓表“0”, 3 伏特電壓表“1”) 代表輸出。此種數據信號, 可直接經由傳輸媒介而傳輸, 惟為使傳輸能達更可靠及更有效起見, 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)。其將輸入之二進位數據碼轉換成特定之 K 進位數字 (K -ary Digit) 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, 通稱為濾波 (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, 有線電波電路, 或無線電波電路) 傳輸至較遠之處, 且能克服種種雜訊及干擾之侵害。於是發訊機即由消息編碼器、通路編碼器及濾波器所構成。收訊機則須有與發訊機各部門相反工作之設備, 即如圖 23-1-2 所示之收訊濾波, 通路解碼 (Channel Decoding) 及消息解碼 (Source Decoding)

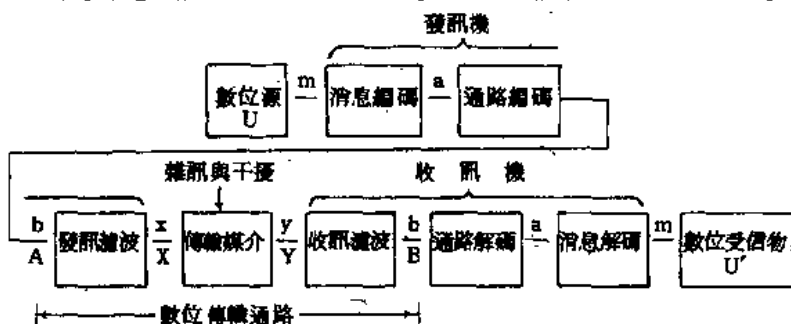


圖 23-1-2 數位通信系統與數位傳輸通路

所構成。圖中, m 表示發送之信息, a 表示對應發送之數據電碼, b 表示對應發送之發訊路電碼, x 表示濾波後之發訊通路信號, y 表示經過傳輸媒介後之接收信號, b 表示接收信號經收訊濾波後重新產生之通路電碼, a 表示對應於 b 之接收數據電碼, 而 $\hat{m}$ 則為接收信息。如 $\hat{m} = m$, 則稱為正確之通信, 否則, $\hat{m} \neq m$ 則稱為錯誤之通信。此種通信系統, 一般稱為數位通信系統 (Digital Communication System), 而發訊濾波、傳輸媒介及收訊濾波等三設備, 則稱為數位傳輸通路 (Digital Transmission Channel)。數位通信系統之品質評定, 一般是依據其平均錯誤率 (Error Rate)。

對於類比消息源, 因發出之信息是時間之連續波形, 故可以 $m(t)$ 表示之。如

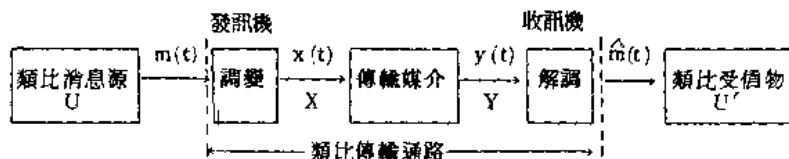


圖 23-1-3 類比通信系統與類比傳輸通路

欲將之傳輸至遠方之受信物，因必須克服傳輸之困難（如頻率太低而無法直接作無線廣播，或雜訊干擾太大而必須迴避，或傳輸媒介為頻帶多工載波而無法直接輸入），故必須配合不同之傳輸媒介，而對 $m(t)$ 作適當之轉變；稱為調變（Modulation），而在收訊機內，必須具有與此相反之設備，稱為解調（Demodulation），如圖 23-1-3 所示。此種通信系統，稱為類比通信系統，而其調變、傳輸媒介與解調等三設備則構成了類比傳輸通路（Analog Transmission Channel）。圖中， $x(t)$ 為發送傳輸信號， $y(t)$ 為接收傳輸信號，而 $\hat{m}(t)$ 則為解調後之接收信息波形。一般 $\hat{m}(t)$ 不可能與對應之 $m(t)$ 完全相吻合，而有誤差 $e(t) = m(t) - \hat{m}(t)$ ， $e(t)$ 之統計均方值（Mean-Squared Value），一般稱之為失真（Distortion），而其倒數，則稱為傳真度（Fidelity），兩者均為類比通信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。

類比消息源之信息亦可藉數位通路以傳輸，如圖 23-1-4 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），而後將取樣量化（Quantize）並轉換成上述之數碼電碼 a ，而數位 / 類比變換則進行與類比 / 數位相反之變換與處理，將接收之數碼電碼 a ，變成類比信息 $\hat{m}(t)$ 。由此可見，類比 / 數位與數位 / 類比之變換相當於類比消息源之編碼與解碼。

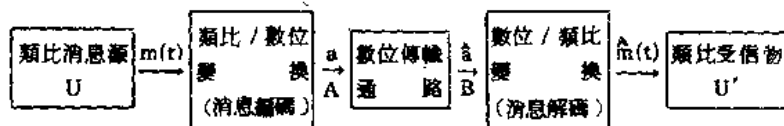


圖 23-1-4 利用數位傳輸通路之類比通信系統

通信理論在提供了消息源編碼、通路編碼及調變等三基本理論以作為最佳通信系統設計之理論依據，茲分敘如下。

1-1-2 消息之量度與消息源編碼理論

消息源發出之各信息之所能帶有消息，乃因其發生係屬機遇 (Probabilistic) 性質，意即事先無法預料而具有不測性 (Uncertainty)。其一旦發生，則不僅令人驚訝，且其不測性因而減除。消息理論指出⁽¹⁾，某一信息所帶給之消息，即為其不測性之減除，而此不測性減除之程度（意即一旦其發生而令人驚訝之程度），即為其所帶給之消息量。

吾人可將消息源，在實際上，當作一種信息之數學集合，並以各信息之機遇率分佈特性描述其隨機性 (Randomness)。例如就數位源而言，其信息可為文字，而信息之集合，即為此可能出現之文字之集合，如可能之文字有 M 種，則此信息集合可寫成 $U = \{m_1, m_2, \dots, m_M\}$ ，而其隨機性則可以機遇率集合 $P = \{P(m_1), P(m_2), \dots, P(m_M)\}$ 描述之，其中 m_i 為文字 (信息)，而 $P(m_i)$ 為文字 m_i 出現之機遇率， $i = 1, 2, \dots, M$ 。因某文字出現之機遇率愈小 (即機會愈小)，其不測性 (即神秘性) 愈大；反之，其機遇率愈大，則不測性愈小，是故某文字 (信息) 之不測性應為其機遇率之單調遞減函數 (Monotonic Decreasing Function)。

據此，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，則其必為 $P(A)$ 之函數，即 $I(A) = f[P(A)]$ ，且 $f(\cdot)$ 必須符合下列必備之條件：

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

(2) 在機遇率本性， $0 \leq P(A) \leq 1$ 條件下， $I(A) \geq 0$ 。意即信息所帶給之消息量為正值。

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

(4) 設若 A 與 B 兩獨立發生之信息，則 $I(AB) = I(A) + I(B)$ 。意即互相獨立發生之兩信息一旦一起發生，則其所帶給之消息量，等於其個別發生時所帶給之消息量之和。

Khinchin 氏⁽²⁾ 曾證明，欲符合此四種條件，則 $f(\cdot)$ 必須為對數函數，寫成

$$I(A) = -\lambda \log_b [P(A)] \quad (23-1-1)$$

其中 λ 為任意正實常數，而 b 為對數之底數。通常取 $\lambda = 1$ ，且 $b = 2$ ，故 (23-1-1) 式寫成常用式

$$I(A) = -\log_2 [P(A)] \quad (\text{比次}) \quad (23-1-2)$$

(23-1-2) 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 (Bit) 為消息量之基本單位，其相當於機會均

等之二進位數字 (Binary Digit) 出現時所帶給之消息量。

在此種消息之量度下，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 (23-1-2) 式寫成

$$I(m_i) = -\log_2 P(m_i) \quad (\text{比次}) \quad (23-1-3)$$

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)，則

$$\begin{aligned} H(U) &= \sum_{i=1}^M P(m_i) I(m_i) \\ &= - \sum_{i=1}^M P(m_i) \log_2 P(m_i) \quad (\text{比次/信息}) \end{aligned} \quad (23-1-4)$$

$H(U)$ 值通稱為消息源之熵量 (Entropy)，其單位為比次 / 信息，如信息屬文字，則單位為比次 / 文字。茲以下列諸例釋其含義：

例 1：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，且此 M 種文字出現之機遇率均等，即 $P(m_i) = 1/M, i=1, 2, \dots, M$ ，則由 (23-1-4) 式可得

$$H(U) = \log_2 M \quad (\text{比次/文字}) \quad (23-1-5)$$

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

例 2：消息源為一新聞廣播戶。假設其所談字彙只有一萬字，而每次之新聞稿字數均為一千字，則其共有 $M = (10000)^{1000}$ 種可能之不同廣播。又設每種廣播出現之機遇率均等，則由 (23-1-5) 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 比次之消息。

例 3：消息源為電視放映機。假設影框 (Picture Frame) 之規格為縱 500 點及橫 600 點，且每點之黑白亮度可有 10 個單位 (level)，則因一影框可有 $500 \times 600 = 300000$ 點，故此種放映機一共可放映 $(10)^{300000}$ 種不同之影像。又假設每一影像出現之機會均等，則由 (23-1-5) 式得

$$H(U) = 300000 \log_2 10 = 9.967 \times 10^5 \quad (\text{比次/影畫})$$

，意即每一不同影像之出現，相當帶給 9.967×10^5 比次之消息。與例 2 相比，可知每放映一個此種電視影像所提供之消息，相當於 75 個上述新聞廣播所提供之消息。

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

$$R_s = H(U) / \tau_s \quad (\text{比次/秒}) \quad (23-1-6)$$

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 $H(U)$ 比次 / 信息代表之，其可換算成 R_s 。就以例 3 為例，設影框每換一次之平均週期為 1/15 秒，則由 (23-1-6) 式可求出該電視放影機之相當消息源速度為 $9.967 \times 10^4 \times 15 = 1.5 \times 10^7$ 比次 / 秒。

消息源編碼定理指出⁽¹⁾⁽²⁾，假設對應於每一數位源之輸出信息 m 均以一長度為 L 比次之二進位碼字代表輸出之，則欲得到無錯誤之編碼，則最小之碼字長度為 $H(U)$ 比次，意即

$$L \geq H(U) \quad (\text{比次}) \quad (23-1-7)$$

因含有 M 種不同信息之消息源之熵量之最大值⁽³⁾，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 (23-1-7) 式可得

$$L \geq \log_2 M \quad (23-1-8)$$

(23-1-8) 式在實際通信系統設計中非常有用。例如英文電報中， $M = 32$ ，故每一文字平均至少須以 5 比次電碼編碼，這是 5 鮑電碼 (5 Baud Code) 之來由。

若將 (23-1-7) 式兩端各除以每信息發出所佔之平均時間 τ_s ，則得

$$R_s = \frac{L}{\tau_s} \geq R_s \quad (23-1-9)$$

式中 R_s 稱為數據信號速度。最經濟之消息源編碼為 $R_s = R_s$ 之情況。

對於類比消息源，令 m 為消息源在某一時刻下之輸出信息 (參閱圖 23-1-3)，因 m 為連續性變數，且具有隨機性，故屬連續性隨機變數 (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描寫，而必須以機遇率密度函數 (Probability Density Function) 取代之⁽⁴⁾，寫成 $p_m(m)$ 。利用 (23-1-4) 式及微積分理論，可導出類比消息源之熵量之估計方法如下式⁽⁵⁾，

$$H(U) = - \int_{-\infty}^{\infty} p_m(m) \log_2 p_m(m) dm \quad (23-1-10)$$

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。例如音響喇叭屬類比消息源，設其在某短暫時刻下之輸出音響強度為 m 分貝，(m 為隨機變數)，且其機遇率密度函數為常態分佈型，即

$$p_m(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} e^{-\frac{m^2}{2\sigma_m^2}} \quad (23-1-11)$$

則據此，其熵量可由 (23-1-10) 式求出，

$$H(U) = \frac{1}{2} \log_2 (2\pi e \sigma^2) \quad (\text{比次 / 信息}) \quad (23-1-12)$$

類比消息源之編碼理論，可藉圖 23-1-4 中所示之類比 / 數位轉換之處理過程闡述之。假設類比信息 $m(t)$ 具有頻帶寬限制，其頻寬為 B_m 赫，則根據取樣定理 (Sampling Theorem)⁽¹⁾，理論上，吾人可自 $m(t)$ 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 $T_s \leq 1/2B_m$ (秒) 之條件，亦即符合 $f_s \geq 2B_m$ (赫) 之條件。其中， $f_s = 1/T_s$ ，稱為取樣速率 (Sampling Rate)。再者，設 $m(t)$ 之幅度不超出 $[-V, V]$ 之範圍，且若此範圍均分成 M 個固定之幅度，稱為量化幅度 (Quantizing Level)，則對應每一取樣幅度 m ，吾人可指定一較接近之量化幅度近似代替之，然後以特定之 L 比次長之二進位碼字 a 取代之，因而輸出對應之數據信號。如此之故，此種類比 / 數位轉換過程，稱為類比信息之數位編碼。又因對應於每 T_s 秒，此種編碼之設備必須送出 L 比次之二進位數字，故數據信號速度應為 $R_s = L/T_s$ 比次 / 秒。吾人如欲自數據信號 a 反過來重造出 $m(t)$ ，則需藉數位 / 類比之轉換過程。重造之波形，以 $\hat{m}(t)$ 表示之，一般不與原波形 $m(t)$ 相同而有失真。

類比消息源之編碼定理指出⁽¹⁾，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 ，而

$$R_s = B_m \log_2 \frac{Q_m}{D} \quad (\text{比次 / 秒}) \quad (23-1-13)$$

其中
$$Q_m = \frac{1}{2\pi e} e^{2H(U)}$$

此啓示，具有量 $H(U)$ 且可容許傳輸失真小於 D 值之消息源，相當一消息源速度為 $B_m \log_2 \left(\frac{Q_m}{D} \right)$ 比次 / 秒之數位消息源。

1-1-3 通路編碼理論

如前述，通路編碼之目的，不僅在使攜帶消息之數據碼字能儘量快速通過受有雜訊干擾之傳輸通路而抵達受信物，而且在使此種傳輸能很準確且可靠。

就數位通路而言，如圖 23-1-2 所示，令通路輸入之文字可有 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K$ 等 K 種，而通路輸出文字可有 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_J$ 等 J 種，意即通碼輸入為 $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K\}$ 中之任一文字 α_k 時，通路就有 $B = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_J\}$ 中之任一文字 β_j 輸出， $k=1, 2, \dots, K$ ，而 $j=1, 2, \dots, J$ (通常 $K=J$)。如此，在未經輸前，某輸入 α_k 之不測性為 $I(\alpha_k) = -\log_2 P(\alpha_k)$ 比次，而在接收

端，則由於通路輸出 β_j 之出現， α_k 之不測性可能減少，意即 β_j 之出現，可能與 α_k 之出現有關。令 $I(\alpha_k/\beta_j)$ 表通路輸出 β_j 後 α_k 所保留之不測性，則依(2)式 $I(\alpha_k/\beta_j) = -\log_2 P(\alpha_k/\beta_j)$ ，其中 $P(\alpha_k/\beta_j)$ 為 β_j 已知時 α_k 出現之條件機遇率 (Conditional Probability)。如令

$$I(\alpha_k; \beta_j) = I(\alpha_k) - I(\alpha_k/\beta_j) \quad (23-1-14)$$

則 $I(\alpha_k; \beta_j)$ 代表由於通路輸出 β_j 之出現後， α_k 之不測性之減少量，意即由於 β_j 之出現所帶給有關 α_k 出現之消息量，通稱為 α_k 與 β_j 間之互通消息量 (Mutual Information)。可見互通消息量愈大，通路傳遞消息之能力愈大。最理想之情況為通路無任何雜訊干擾時，此時 α_k 與 β_j 完全相關，即 $I(\alpha_k/\beta_j) = 0$ ，而 $I(\alpha_k; \beta_j) = I(\alpha_k)$ ，表示 β_j 之出現帶給全部 α_k 所帶之消息量，意即消息之傳遞毫無損失。反之，在雜訊干擾過大時， β_j 與 α_k 完全無關，即 $I(\alpha_k/\beta_j) = I(\alpha_k)$ ，故 $I(\alpha_k; \beta_j) = 0$ ，表示 α_k 與 β_j 無互通消息之可能，此為最惡劣之傳輸通路。在實用通路中，因雜訊干擾不大，故 $0 \leq I(\alpha_k; \beta_j) \leq I(\alpha_k)$ 。

吾人如計算所有可能之通路輸入 α_k 對所有可能之通路輸出間之互通消息量 $I(\alpha_k; \beta_j)$ 之統計平均值，則得

$$I(A; B) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J P(\alpha_k, \beta_j) I(\alpha_k; \beta_j) \quad (23-1-15)$$

其中 $P(\alpha_k, \beta_j)$ 為 α_k 與 β_j 之聯合機遇率 (Joint Probability)，而 $I(A; B)$ 則為出通路之輸入與輸出間之平均互通消息量。吾人亦可證明

$$I(A; B) = H(A) - H(A/B) = H(B) - H(B/A) \quad (23-1-16)$$

$$\text{其中 } H(A) = - \sum_{k=1}^K P(\alpha_k) \log_2 P(\alpha_k)$$

$$H(B) = - \sum_{j=1}^J P(\beta_j) \log_2 P(\beta_j)$$

$$H(A/B) = \sum_{k=1}^K P(\alpha_k) \sum_{j=1}^J P(\alpha_k/\beta_j) I(\alpha_k/\beta_j)$$

$$H(B/A) = \sum_{j=1}^J P(\beta_j) \sum_{k=1}^K P(\beta_j/\alpha_k) I(\beta_j/\alpha_k)$$

如此可知，最理想之傳輸通路為 $I(A; B)$ 最大之通路，亦即 A 之隨機性要能使 $H(A)$ 最大，而通路特性要能使 $H(A/B) = 0$ 。因為 $H(A/B)$ 取決於傳輸媒介之特性，一般不易改進，故吾人只能由設計通路編碼器着手，設計使 A 之隨機性能使 $H(A)$ 達最大值。此最大值通稱為通路容量 (Channel Capacity)，以 C 表示之，得表成

$$C = \max_A I(A; B) \quad (\text{比次/通路文字}) \quad (23-1-17)$$

此啓示，通路文字每傳輸一次，其所能傳遞之最大平均消息量爲 C 比次 / 通路文字。可見一般傳輸通路 $0 \leq I(A; B) \leq C$ 。如令 $R_s = I(A; B)$ ，表示在某通路編碼器之設計（即某輸入信息之隨機性下）及某特性之傳輸媒介下之實際消息傳遞速度，而 C 則爲其理論上所能達到之最高速度，即

$$0 \leq R_s \leq C \quad (\text{比次 / 通路碼字}) \quad (23-1-18)$$

將 (23-1-15) 式左右兩端分別除以 τ_s ，則得

$$0 \leq R'_s \leq C' \quad (\text{比次 / 秒}) \quad (23-1-19)$$

可見通路容量與實際傳輸速度，均可以比次 / 秒爲單位。

通路編碼定理 (Channel Coding Theorem) 指出，如某一數位通路之通路容量爲 C ，則若實際傳輸速率 $R_s \leq C$ ，則理論上，吾人可設計一對通路編碼及解碼器，使消息傳遞之錯誤等於零，意即獲得完全可靠之通信；反之，若 $R_s > C$ ，則不論如何設計通路編碼與解碼器，不可能獲得準確之消息傳遞，意即不可能達到可靠之通信。

例 4：某一二進位傳輸通路 (Binary Channel)， $K = J = 2$ ，設 $\alpha_1 = \beta_1 = 0$ ， $\alpha_2 = \beta_2 = 1$ ，且 $P(\alpha_1/\beta_2) = P(\alpha_2/\beta_1) = \epsilon$ ， $P(\alpha_1/\beta_1) = P(\alpha_2/\beta_2) = 1 - \epsilon$ ，則由 (23-1-16) 式及 (23-1-17) 式可得

$$C = 1 + \epsilon \log_2 \epsilon + (1 - \epsilon) \log_2 (1 - \epsilon) \quad \text{比次/通路數字} \quad (23-1-20)$$

可見當 $\epsilon = 1/2$ 時，意即正確傳輸與錯誤傳輸之機會均等時，由 (23-1-20) 式得 $C = 0$ ，表示不論如何設計通路編碼器與解碼器，吾人不可能獲得正確之消息傳遞；反之，若 $\epsilon = 0$ ，則由 (23-1-17) 式得 $C = 1$ ，表示吾人可以設計一對通路編碼與解碼器，使其傳輸消息之速率高達 1 比次 / 通路數字。又由 (23-1-20) 式可證明，在 $0 \leq \epsilon \leq 1$ 之範圍內，不論 ϵ 值爲何， $0 \leq C \leq 1$ ，可見 1 (比次 / 通路數字) 之速度爲最高可能之速率。

對於類比通路，如圖 23-1-3 所示者，平均互通消息量可寫成

$$I(X; Y) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{xy}(x, y) \frac{p_{xy}(x/y)}{p_x(x)} dx dy \quad (23-1-21)$$

其中 X 爲通路輸入隨機變數， Y 爲通路輸出隨機變數， $p_{xy}(x, y)$ 爲聯合機遇率密度函數 (Joint Probability Density Function)，而 $p_{xy}(x/y)$ 則爲條件機遇率密度函數 (Conditional Probability Density Function)。至於通路容量 C ，也可證明爲

$$C = \max_{X, Y} I(X; Y) \quad (23-1-22)$$

例如，類比傳輸通路之頻帶寬為 B 赫，且雜訊 n 之隨機性為常態分佈，即其機遇率密度函數為

$$p_n(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} e^{-\frac{n^2}{2N}}$$

其中 N 為雜訊 n 之均方值。因 $y = x + n$ ，且 x 與 n 必互不相關，故下式可證明成立，

$$I(X; Y) = H(Y) - H(Y/X) = H(Y) - H(n) \quad (23-1-23)$$

由 (23-1-11) 及 (23-1-12) 式知 $H(n) = \frac{1}{2} \log_2 (2\pi eN)$ ，為一常數，故由 (23-1-23) 得

$$C = \max_X H(Y) - \frac{1}{2} \log_2 (2\pi eN) \quad (23-1-24)$$

吾人可證明，符合 (23-1-24) 式之 X 之隨機性必為常態分佈⁽³⁾，即

$$p_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S}} e^{-\frac{x^2}{2S}} \quad (23-1-25)$$

其中 S 為 x 之均方值。如此可見 y 必亦為常態分佈，且其均方值為 $S + N$ ，故

$$p_y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(S+N)}} e^{-\frac{y^2}{2(S+N)}} \quad (23-1-26)$$

由 (23-1-11)、(23-1-12) 及 (23-1-26) 式可得

$$\max_X H(Y) = \frac{1}{2} \log_2 [2\pi e(S+N)]$$

$$\text{故} \quad C = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{比次/信息}) \quad (23-1-27)$$

其中 S/N 即為常用之信號對雜訊比。又因通路頻寬為 B 赫，依據取樣定理⁽⁴⁾，此種通路每秒鐘最多可傳輸 $2B$ 個信息，故 (23-1-27) 式可改成

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{比次/秒}) \quad (23-1-28)$$

(23-1-28) 式在實際通路設計上，用途最廣。

(23-1-28) 式又啓示，一類比通路可由增加信號對雜訊比以減少所需頻帶寬，或增加頻帶寬以減少所需信號對雜訊比，意即信號對雜訊比 (S/N) 與頻帶寬可互相斟酌作有利之補償。

例5：普通電話線為類比通路。設其頻帶寬為 3 千赫，且通路之信號對雜訊比為 30 分貝，則 $C = 3000 \log_2 (1 + 1000) \approx 30$ 千比次/秒。表示以此電話通路，理論上吾人可設計一對通路編碼與解碼器，使其傳輸消息之能力

達30千比次/秒之速度。實際上，目前之實用設計只能達到10千比次/秒之速度，此表示吾人尚有一段美好前程可以努力。

通路編碼定理又指出，若吾人想以類比通路作類比信息之傳輸而可許之失真度小於 D ，則必須使其等值數據速率(R_s)大於消息源速度(即23-1-13式所示者)，而小於通路容量 C ，即 $R_s \leq R_s \leq C$ ，否則不可能達到失真度小於 D 之類比信息傳輸。此為著名之速度與失真關係定理(Rate Distortion Theorem)⁽⁶⁾，為擇碼調變(PCM)類比消息通信系統之設計大原則。

1.1.4 調變理論

調變理論(Modulation Theory)在提供類比通信系統(如圖23-1.3所示者)之最佳調變與解調設計之理論基礎⁽⁷⁾。最基本之調變理論系由Wiener氏所建立，稱為Wiener定理，其數學模型如圖23-1-5所示，其將解調設備，在數學



圖23-1-5 線性濾波

上，當作一線性濾波設備，而具有轉換函數(Transfer Function) $H(\omega)$ 。圖中， $x(t)$ 為通路之輸入， $y(t)$ 為通路之輸出， $\hat{m}(t)$ 為 $y(t)$ 經濾波(解調)後而檢知之輸出， $m(t)$ 為希望波形(原發送之信息波形)，而 $e(t) = \hat{m}(t) - m(t)$ ，為檢知波形與希望波形之差與波形。Wiener定理指出，若傳輸失真度， $D = E\{e^2(t)\} = E\{(m - \hat{m})^2\}$ 為最小，其最佳濾波特性 $H(\omega)$ 應符合下列條件

$$H_o(\omega) = \frac{S_{ym}(\omega)}{S_y(\omega)} \quad (23-1-29)$$

其中 $S_{ym}(\omega)$ 為 $m(t)$ 與 $y(t)$ 間之交關功率頻譜密度函數(Cross Power Spectral Density Function)， $S_y(\omega)$ 為 $y(t)$ 之功率頻譜密度函數，而 $\omega = 2\pi f$ 。

一般調變器之設計是依傳輸媒介之特性與消息源信息之頻帶寬面有不同之調變設計。Wiener定理啓示，對於某一調變設計，吾人可依(23-1-29)式之原則求出最佳解調器設計。

例如調變器為調幅(Amplitude Modulation)設計時， $x(t)$ 可寫成

$$x(t) = m(t) \cos 2\pi f_c t \quad (23-1-30)$$

其中 $m(t)$ 為具有頻帶寬為 B_m 赫之類比信息，且 f_c 為載波頻率，則通路輸出應為

$$y(t) = m(t) \cos 2\pi f_c t + n(t) \quad (23-1-31)$$

因 $x(t)$ 為帶通信號 (Bandpass Signal)，故在解調器前可設一理想前置帶通濾波器以排除大部份之雜訊干擾。令 $n(t)$ 為白雜訊 (White Noise)，而其通過帶通濾波器後之均方值為 N_0 ，則吾人據 (23-1-29) 式可證明⁽⁹⁾，對應於 (23-1-30) 式之 $x(t)$ 設計，最佳之解調器設計要使其轉換函數適合

$$H_0(f) = \begin{cases} S_m(f) & , |f| \leq B_m \\ S_m(f) + N_0 & \\ 0 & , |f| > B_m \end{cases} \quad (23-1-32)$$

(23-1-32) 式示此最佳解調器相當於一低通濾波器。據此，可作實用解調器之電路設計。

1.2 通信網

通信網係指人類擬以將語言、文字、圖像、符號等資訊 (Information)，傳遞到任一指定對象為目的之通信體系。本節所述著重於電氣通信網 (簡稱為電信網)，即以上各種資訊先透過終端界面裝置轉變為相當之電氣訊號，然後在各種電信傳輸路及電信交換網交織而成之電信網上傳遞至其目的地，再由終端界面裝置還原為原始之資訊。此項終端界面裝置 (Terminal Interface Equipment)，在電話網為聲電轉換器 (Electro-Acoustic Transducer) 如電話機是；在電報網為文字電碼轉換器之電傳打字機 (Teletype Writer 或 Teleprinter)、光電轉換器之傳真機 (Telefax Transceiver) 乃至各型人工暨自動收發報機；在數據通信網 (Data Communication Network) 則更包羅萬象，諸凡電子計算機及其各型輸入輸出裝置均屬之，通稱為數據終端裝置 (Data Terminal Equipment, 簡稱 DTE)。

1.2.1 電信網之種類

廣義之電信網由其傳遞訊號對象言，可分為電話網、電報網、數據網 (或電算機網) 乃至廣播網及電視網。但本節所述均將剔除廣播與電視，故屬於狹義之電信網範疇。

電信網由其電路結構與所能傳遞信號之性質言，可分為類比網與數位網 (

Analog and Digital Networks)。

電信網又因服務對象與目標之不同，有公用網與專用網之分。電信局之電話網、電報網及數據網，係以社會廣大群眾服務為目的，屬於公用網；而電力公司、鐵路局、警察局等機構類亦擁有其各別獨立之電信網，但非一般群眾所能利用，屬於專用網；為某項特定通信目的或任務而設置或向電信局租用之電信網稱為特殊電信網，如鐵路局之號誌系統、大都市之道路交通管制系統 (Traffic Control System)、氣象會報系統、銀行自動化作業系統、海空航運業訂位系統等均是。(專用電信網參見5-1-7章節)

1.2.2 電信網之基本型態

電信網基本型態有二：即星型與網型。

星型網與網型網各有其利弊：在連結 N 個通信點 (例如電信局) 之網系上，採用網型網則所需路由數為 $(\frac{N}{2})$ 個，採用星型網則僅需 $(N-1)$ 個路由，比網型網為少，尤以 N 值愈大時為然。由於電信業務本身在空間方面具有毋遠弗屆性，電信網自亦無法強作區域性之隔絕。故局部之市內電話網必然經由星型網匯成龐大之全國性長途電話網，進而構成全球性國際電信網。在此一龐大複雜之電信網中，為考慮網路通訊之安全可靠、網路之經濟與高效率、網路傳輸與服務之品質，往往在高階位電信局間因話務量大故採用網型互接網，而在低階位電信局間因話務量恒較小故採用星型集接網。

1.2.3 國內長途電話網 (類比電信網)

電話訊號係由電話機將強弱不同之聲譜 (Sound Spectrum) 轉變為強弱與之相對應之音頻頻譜 (Voice Frequency Spectrum)，屬於類比訊號之一，因此長途電話網乃為典型之類比電信網。

甲、電話交換局

為達成國內通信之目的，電信網除須設置適當品質與數量之傳輸電路連接國內重要城鎮外，尚須在各重要城鎮設置適當容量與型式之電話交換機進行轉接作業，務期達成電信機線相當效率之運用並提供國內用戶相當合理與滿意之服務。

一般幅員廣大之國家，電話交換局類多分為五級如次：

- (a) 區中心局 (Regional Center, RC)
- (b) 段中心局 (Sectional Center, SC)
- (c) 主中心局 (Primary Center, PC)
- (d) 長途中心局 (Toll Center, TC)