

部編大學用書

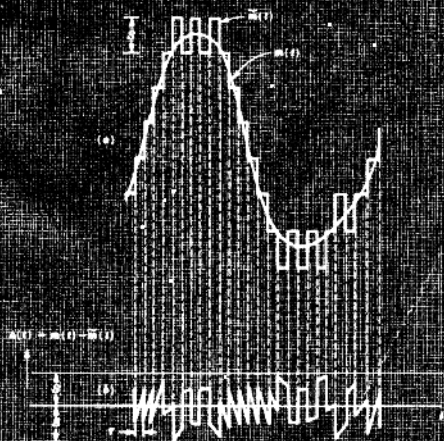
通信系統原理

原著者 TAUB and SCHELLING

主編者 國士編譯館

譯者

陸英亮博士 謝安生博士



16.61/52
0325052

通信系統原理

原著者

HERBERT TAUB
DONALD L. SCHILLING

譯者

謝芳生博士

(第一章至第四章)

陳英亮博士

(第五章至第十四章)

4027/19



國立編譯館主編
東華書局印行



21113000752204



版權所有・翻印必究

中華民國六十七年九月 初版

大學
用書

通信系統原理 (全一册)

定價 新台幣壹百伍拾元整

(外埠酌加運費匯費)

譯作權
所有人

國立編譯館

譯者

陳英亮 謝芳生

發行人

卓 鑫

出版者

臺灣東華書局股份有限公司

臺北市博愛路一〇五號

電話：3819470 郵撥：6481

印刷者

合興印刷廠

臺北市大理街130巷2弄1號

行政院新聞局登記證 局版臺業字第零柒貳伍號

(67043)

原 書 序

這本書打算作為大學部高年級或研究所一年級有關通信系統一學期課程的教科書。我們依照這個程度，儘可能使內容能代表通信系統當前的狀況以及未來的趨向。因此，雖然我們對於類比通信系統有充分而且完全的處理，重點還是放在數位系統上。

這本書是我們在講授一些課程後的產物，這些課程有的是開給市立紐約大學布魯克林工學院，大學部與研究所的學生；有的是開給美國國立航空太空總署（MSC — 休斯頓）通信衛星公司以及洛克希電子公司的工程人員。對於大學部學生以及初級研究生，這本書能提供要對通信系統作進一步研究所需的預備知識；對於從事實務的工程師，這本書可以幫助他們更新這方面的知識以趕上時代潮流。

我們花了相當多的心血致力於書中的說明方式，務使內容能清晰而且易於接受。我們更細心地設計了將近 400 個習題，這些習題是用來說明課文，有時作進一步的討論，因此應該視為這本書整體裏重要的一部份。

前兩章裏涵蓋了全書所需具備的數學基礎。讀者對於頻譜分析，例如富氏級數與富氏轉換等課題，應有初步的認識。頻譜分析是用途廣泛的數學工具，高年級的工程學生，要採用這本書，不能對它毫無瞭解。因此，我們以頻譜分析為第一章，讓學生溫習一下，並加深印象。有些比較高深的主題，例如功譜密度以及波形之間的關聯函數等觀念，有較詳細的說明。

機率觀念在通信系統的分析上的重要性，我們不能過分強調。固然在討論通信系統時，忽略了雜訊的存在便忽略了一個基本而且重要的特性，但是如果我們強調機率觀念，往往會花過多的時間來介紹機率觀念，以致

於在一學期的有限時光中，關於通信本身的內容反而沒有夠多的時間來介紹。我們採取合理而有效的中庸之道。我們把本書所需具備有關隨機變數與隨機過程的基本知識放在單獨一章裏（第二章）。

從第三章開始討論通信系統。我們把分頻多工系統放在第三章及第四章裏，其中第三章討論調幅系統，在第四章討論角度調變系統。分時多工系統放在第五與第六兩章裏，其中第五章討論抽樣定理並分析脈幅調變系統，第六章介紹階化的觀念以及脈碼調變系統。這一章也談到經階化又編碼過的情報的種種傳輸方式，包括鍵控相移、差動鍵控相移以及鍵控頻移等技術；也討論了差異調變技術。我們當然知道，在沒有雜訊的情況下，各種系統的優劣缺乏比較的基準。然而，在這四章裏（三至六章），我們討論通信系統時，沒有涉及雜訊對系統性能的影響。我們覺得，這種初步的介紹方式，暫不考慮雜訊的影響，較能使讀者有效地接受。

我們在第七章中，利用第二章所引入的觀念，提出雜訊的一種數學表示法。主要考慮高氏雜訊與散彈雜訊兩種。我們把高氏雜訊表成譜元的展開式，這種根據萊斯氏的表示方式似乎缺乏嚴密性，却合乎直覺上的感受。我們在第八章與第九章裏，深入分析分頻多工系統（AM及FM）中雜訊對系統性能的影響。

第十章討論調頻系統中的界限效應以及界限的延伸辦法。這一章所討論的內容在一般初級的通信教科書中，僅只幾個段落而已，而在本書中却是較長的一章，因此必須稍加解釋。雖然確有許多種辦法可以將情報經由通信波道傳送，但事實上當情報要從一個天線到另一個天線，經由空中傳送時，我們唯一的辦法是以情報來調變載波的波幅，或者以某種調頻的方式，把情報附在載波上。當雜訊成為問題時（實際上總是如此），一般採用頻率調變是有利的方式，因為採用調頻方式，我們可以犧牲頻帶寬度以改進系統在背景雜訊中的性能。然而頻率調變系統呈現一種界限效應，使調頻系統在較高的背景雜訊中的效益受到了限制。近年來人們致力於發展新的方法（譬如鎖相迴路系統以及含有頻率回饋的FM系統）儘可能要去

除這種限制。因此，我們認為對於調頻系統界限效應作較深入的討論是值得的。學生由此得以瞭解調頻系統的基本限制，同時可以認識幾種用來延伸界限的裝置，進而使學生有能力接近有關這方面的廣大文獻。若希望獲得較簡短以及較屬於概念性的內容，可以只選讀第 10.1 至 10.3 節，第 10.7 至 10.10 節，第 10.13 節以及第 10.14 節。

第十一及第十二章討論數位通信系統在雜訊中的性能。其中介紹了匹配濾器的觀念，並引進錯誤機率作為系統比較的標準。以脈碼調變系統為主，討論了階化雜訊以及背景熱雜訊的影響，以及所導致的界限效應。

我們在第十三章中提出通信系統的整體理論，其中包含消息理論的探討。雖然這些說明都是屬於介紹性質的，我們相信比起一般的初級教本來要深入得多，完整得多。在這一章裏，我們也討論了改錯編碼術，因為這種編碼術有其本身的趣味以及它與消息理論的特殊關係。我們也討論了分段碼以及迴旋編碼與連續解碼術。這一章的末了，並以消息理論的內涵為基準將各種系統作一比較。

最後，在第十四章裏，對通信系統作一個整體觀，討論了雜訊的來源並介紹了雜訊度、雜訊溫度以及路線損失等名辭。

我們要感謝布魯克林工學院的 Jack K. Wolf 教授，他從頭到尾校訂了整個稿本，我們更要感謝他的鼓勵以及諸多建設性的批評。第十三章中有關分段碼一節是以 Wolf 教授所寫的材料為藍本編成的。我們感謝 Arnold Newton, A. Steven Rosenbaum 以及 Tomatsu Inukai 諸君的許多寶貴建議。我們感謝市立大學電機工程系的行政助理，Sadie Silverstein 小姐，她以熟練的技巧完成稿本的打字。我們也感謝 L. J. Taub 先生，S. M. Taub 小姐以及 S. L. Schilling 小姐的幫忙。

HERBERT TAVB

DONALD L. SCHILLING

目 錄

第一章 譜的分析 1 ~ 55

引 論.....	1	1.12 巴斯凡定理.....	31
1.1 傅葉級數.....	2	1.13 功率和能量經由一個 網絡而轉移.....	33
1.2 傅葉級數的指數形式.....	4	1.14 波形的波段限制.....	34
1.3 傅葉級數的例子.....	5	1.15 波形之間的相關性.....	39
1.4 採樣函數.....	8	1.16 功率和交相關性.....	41
1.5 線性系統的響應.....	9	1.17 自我相關性.....	42
1.6 正化功率.....	13	1.18 週期性波形的自我相 關性.....	43
1.7 傅葉展式中的正化功 率.....	15	1.19 能量是有限的非週期 性波形的自我相關性.....	45
1.8 功率譜的密度.....	19	1.20 別的波形的自我相關 性.....	46
1.9 轉移函數對功率譜密 度的影響.....	20	習 題.....	47
1.10 傅葉變換.....	22	參考資料.....	55
1.11 盤 繞.....	29		

第二章 隨機變數和過程 56 ~ 104

2.1 或然率.....	57	件的結合或然率.....	59
2.2 互不相容的事件.....	58	2.4 統計獨立.....	60
2.3 有關的以及獨立的事		2.5 隨機變數.....	61

2.6	累積的分佈函數	62	2.14	雷理或然率密度	81
2.7	或然率密度函數	65	2.15	隨機變數之和的平均以 及方差	83
2.8	或然率與或然率密 度之間的關係	66	2.16	$Z = X + Y$ 的或然率 密度	85
2.9	結合的累積分佈以 及或然率密度	69	2.17	隨機變數之間的相關性	88
2.10	一個隨機變數的平 均值	72	2.18	中央極限定理	90
2.11	一個隨機變數的方 差	74	2.19	隨機過程	92
2.12	高斯式或然率密度	75	2.20	自我相關性	95
2.13	誤差函數	77		習題	97
				參考資料	104
第三章 調幅系統			105 ~ 142		
3.1	頻率遷移	105		調變器	123
3.2	頻率遷移的一種方 法	107	3.9	單邊帶調變	124
3.3	基本波段訊號的恢 復	111	3.10	產生一個單邊帶訊號的 方法	127
3.4	幅度調變	113	3.11	殘邊帶調變	131
3.5	可允許最大調變	117	3.12	適用的單邊帶	135
3.6	平方律解調器	120	3.13	多工制	136
3.7	一個調幅訊號的譜	121		習題	137
3.8	調變器以及平衡的			參考資料	142
第四章 調頻系統			143 ~ 194		
4.1	角度調變	143	4.2	調相與調頻	144

4.3 調相與調頻之間的關係.....146	4.14 關於寬帶調頻的頻帶寬的其他評論.....168
4.4 相角和頻率偏差.....148	4.15 調頻的產生：參數變化法.....169
4.5 一個調頻訊號的頻譜：弦式調變.....149	4.16 調頻的一個間接方法（阿姆斯特系統）...171
4.6 貝色係數的一些特性150	4.17 頻率倍增.....172
4.7 依弦式調變的調頻訊號的頻帶寬度.....153	4.18 頻率倍增應用到調頻訊號上.....174
4.8 調變指數 β 對頻帶寬度的影響.....156	4.19 一個阿姆斯特調頻系統的例子.....174
4.9 “頻帶寬一定”的調頻的頻譜.....157	4.20 調頻的解調器.....176
4.10 調頻訊號的相量圖...158	4.21 限制器.....178
4.11 狹帶調角的頻譜：隨意調變.....162	4.22 近似地適用的單邊帶系統.....179
4.12 寬帶調頻（WBFM）的頻譜：隨意調變.....163	4.23 立體聲的調頻廣播...181
4.13 高斯式調變的寬帶調頻訊號所需要的頻帶寬.....166	習 題.....186
	參考資料.....194

第五章 脈波調變系統 195 ~ 240

5.1 抽樣定理·低通信號195	5.5 平頂式抽樣法.....208
5.2 脈幅調變法.....201	5.6 用延持方式收復信號212
5.3 PAM信號的所需波道頻帶寬度.....203	5.7 由波道的高頻截止特性引起的串訊.....215
5.4 自然式抽樣法.....205	5.8 由波道的低頻截止特

性引起的串訊·····	218	5.12 將 PDM 和 PPM 轉變 成 PAM 以收復基帶信 號·····	227
5.9 脈時調變 (PTM) 法 ·····	220	5.13 PTM 系統中的串訊	228
5.10 脈時調變信號的產生 方法·····	222	5.14 發射機與接收機之同 步作用·····	231
5.11 脈寬調變波形的頻譜 與基帶信號的收復·····	225	習 題·····	233
		參考資料·····	239
第六章 脈碼調變系統 ·····	240 ~ 283		
6.1 多雜訊的通信波道·····	240	6.12 非同步式分時多工系 統·····	260
6.2 信號的階化作用·····	242	6.13 差異調變法·····	261
6.3 階化誤差·····	245	6.14 差異調變因為階距固 定所生的問題·····	262
6.4 波幅伸縮作用·····	247	6.15 應變式差異調變法·····	266
6.5 脈碼調變 (PCM) 作 用·····	248	6.16 PCM 與差異調變可 解度的比較·····	267
6.6 二元數字的信號表示 法·····	251	6.17 鍵控相移 (PSK) 系統	268
6.7 PCM 系統·····	252	6.18 差動鍵控相移系統 (DPSK)·····	270
6.8 符號間的干擾·····	254	6.19 鍵控頻移系統 (FSK)	273
6.9 眼形圖·····	256	習 題·····	275
6.10 等化作用·····	257	參考資料·····	283
6.11 採用 PCM 的同步分時 多工系統·····	258		
第七章 雜訊的數學表示法 ·····	284 ~ 325		
7.1 雜訊的來源·····	284	7.2 雜訊的一種頻域表示	

法.....286	7.9 線性濾波作用.....300
7.3 濾波作用對高氏雜訊 機率密度的影響.....289	7.10 雜訊帶寬.....305
7.4 雜訊的頻譜成分.....292	7.11 雜訊的正交分量.....307
7.5 狹帶濾器對雜訊的影 響.....295	7.12 $n_c(t)$ 與 $n_s(t)$ 的功譜 密度.....309
7.6 濾器對雜訊功譜密度 的影響.....296	7.13 $n_c(t)$, $n_s(t)$ 以及它們 的時間導函數的機率 密度.....313
7.7 雜訊的累加.....297	7.14 散彈雜訊.....315
7.8 與雜訊有關的混波作 用.....298	習 題.....319
	參考資料.....325
第八章 調幅系統中的雜訊 326 ~ 360	
8.1 調幅接收器.....326	8.5 含載波的雙邊帶系統 (DSB).....340
8.2 超外差原理的優點： 單波道.....328	8.6 平方解調器.....343
8.3 無載波單邊帶系統 (SSB-SC)..... 329	8.7 波封檢波器.....351
8.4 無載波雙邊帶系統 (DSB-SC)..... 335	習 題.....355
	參考資料.....360
第九章 調頻系統中的雜訊 361 ~ 391	
9.1 一種 FM解調器 ... 361	單波道情況.....373
9.2 輸出的信號功率與輸 出的雜訊功率之計算365	9.5 預強調與去強調技術 在商用 FM廣播上的 應用.....376
9.3 FM與AM的比較...371	9.6 多工系統中的相位調
9.4 預強調與去強調作用,	

變作用.....	381	9.8 發射機雜訊的影響.....	386
9.7 多工系統中FM與PM 的比較.....	383	習 題.....	387
		參考資料.....	391
第十章 頻率調變系統的界限	392 ~ 446		
10.1 頻率調變系統的界限 現象.....	392	工作點.....	424
10.2 釘波雜訊的發生.....	395	10.10 釘波雜訊的抑減.....	425
10.3 釘波雜訊的特性.....	399	10.11 二階鎖相迴路.....	429
10.4 FM 鑑別器界限值的 計算.....	402	10.12 鎖相迴路輸出的 SNR	432
10.5 釘波平均間隔的計算.....	405	10.13 利用回饋的FM解調 法.....	435
10.6 調變的影響.....	410	10.14 採用FMFB時界限 的延伸.....	439
10.7 鎖相迴路.....	415	習 題.....	441
10.8 鎖相迴路的分析.....	420	參考資料.....	446
10.9 穩定工作點與不穩定			
第十一章 數據傳輸	447 ~ 479		
11.1 基帶信號接收器.....	447	11.9 FSK 的非同調檢波 法.....	470
11.2 錯誤的機率.....	451	11.10 差動式鍵控相移系統.....	470
11.3 最佳濾器.....	453	11.11 數據傳輸系統的比 較.....	472
11.4 白色雜訊：匹配濾器.....	459	11.12 四相PSK系統.....	473
11.5 匹配濾器的錯誤機率.....	461	習 題.....	476
11.6 同調接收：關聯作用.....	464	參考資料.....	479
11.7 鍵控相移系統.....	466		
11.8 鍵控頻移系統.....	468		

第十二章 脈碼調變系統及差異調變系統中的雜訊 480 ~ 507

- | | |
|-----------------------------|--------------------------------|
| 12.1 PCM 傳輸.....480 | 信號與階化雜訊之比 496 |
| 12.2 階化雜訊的計算.....482 | 12.10 差異脈碼調變 (DPCM) 系統.....498 |
| 12.3 輸出信號的功率.....484 | 12.11 熱雜訊對差異調變系統的影響.....498 |
| 12.4 熱雜訊的影響.....487 | 12.12 差異調變系統輸出的信號雜訊比.....501 |
| 12.5 PCM 系統的輸出信號雜訊比.....489 | 12.13 PCM 與 DM 的比較 501 |
| 12.6 差異調變 (DM) 系統 491 | 習 題.....503 |
| 12.7 差異調變系統中的階化雜訊.....493 | 參考資料.....507 |
| 12.8 輸出信號的功率.....495 | |
| 12.9 差異調變系統的輸出 | |

第十三章 消息理論與編碼術 508 ~ 577

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 13.1 個別情報.....508 | 13.10 編碼術：簡介.....529 |
| 13.2 消息量的觀念.....509 | 13.11 對等核查編碼法.....531 |
| 13.3 平均消息率——熵.....511 | 13.12 代數碼.....532 |
| 13.4 消息率.....513 | 13.13 代數碼的基本例子.....535 |
| 13.5 沈農氏定理，波道容量.....515 | 13.14 錯誤的改正：微狀.....536 |
| 13.6 高氏波道的容量.....516 | 13.15 代數碼的一個實例.....538 |
| 13.7 帶寬— $\frac{S}{N}$ 的交換 520 | 13.16 迴旋電碼.....541 |
| 13.8 利用正交信號以達到沈農氏極限.....521 | 13.17 迴旋碼的解碼法.....544 |
| 13.9 正交信號的傳送效率 527 | 13.18 編碼傳送與不編碼傳送的錯誤比較（分段編碼法）.....550 |
| | 13.19 消息理論的一個應用： |

最佳調變系統	553	統的比較	560
13.20 調幅系統與最佳系統 的比較	556	13.23 回饋通信系統	561
13.21 FM 系統的比較	558	習 題	568
13.22 PCM 與 FM 通信系		參考資料	576
 第十四章 通信系統與雜訊之計算 578 ~ 612			
14.1 電阻器雜訊	578	14.9 有效輸入雜訊溫度	592
14.2 數個電阻器構成之雜 訊電源	580	14.10 雜訊度	594
14.3 含有感抗元件的網路	580	14.11 串接系統的雜訊度與 等效雜訊溫度	597
14.4 一個例子	583	14.12 接收系統的一個實例	598
14.5 可用功率	585	14.13 天 線	601
14.6 雜訊溫度	587	14.14 一個系統的計算	604
14.7 二端網路	589	習 題	609
14.8 雜訊帶寬	591		

第一章

譜的分析

引 論

假定有二個人相隔一段相當遠的距離而想彼此通訊。如果有一對導線自一處延伸到另一處，同時每個地方都裝有擴音器和耳機的話，這個通訊問題或許可以被解決。在這導線通訊道的一端擴音器將一個訊號電壓加到這條線上，這也就是在另一端將收到的電壓。然而收到的訊號將和一個不規則的，隨意的，無法預測的電壓波形締結在一起，後者被稱為雜訊

(noise)。這雜訊的來源將在第七章和第十四章中予以更詳細的討論。在這兒我們只稍注意就原子的水準而言，宇宙是在一個恒定的騷動狀態之下的，同時這項騷動是這種雜訊的一個很大的來源。由於連線的長度的關係，收到的信息的訊號電壓要比在連線輸送端的程度減弱了許多。結果，信息的訊號電壓和雜訊電壓相比較時可能並不很大，所以在識別信息時就會有困難或者根本不可能識別它。在接收端加一個放大器並不能解決問題，因為放大器會將訊號和雜訊同樣地放大。事實上，我們將看出來放大器本身很可能成為額外的雜訊的來源。

通訊理論上的一項主要的考慮，同時也是我們在這本書裡要充分地討論的一件事項就是盡量地抑制雜訊的各種方法的研究。就這目的而言，我們會發現不將原來的訊號（在我們的例子中是擴音器的輸出）直接送出去反而比較好。取而代之的是將原來的訊號用來產生一個不同的訊號波形，然後再將這新的訊號波形加到線上去。用原來的訊號來產生被輸送的訊號這過程被稱為編碼（encoding）或調變（modulation）。在接收端則需要用相反的過程，稱為譯碼（decoding）或解調變（demodulation）的，

來找出原來的訊號。

很可能地要供應這項通訊電線會很貴。所以我們很自然地就會想到要問：我們是否可以將一個以上的波形安排得同時在一條線上送過去，因而可以比較有效地應用這條連線。結果發現這種多項輸送果然真的是可能的，同時可以由好些種方法來完成。這類同時的多項輸送被稱為多工制（multiplexing），這又是通訊理論以及這本書的一項主要的考慮。要注意的是在用到通訊連線時，至少在原則上，每一則信息可以用一條單獨的線。然而，當通訊介質是自由空間時，例如在無線電通訊上自一個天線到另一天線之間的情形下，多工制是極重要的。

於是，總結起來，通訊理論（communication theory）對它自己所提出的是下列各個問題。已知一個通訊道時，我們怎樣安排才能夠儘量將最多的訊號同時送過去，同時我們如何設計才能盡最大可能地將雜訊的效果抑制住？本書內，在談了一點數學方面的前提之後，我們將要對自己提出的正就是這些問題，先講的是多工的問題，其次是討論通訊系統中的雜訊。

在通訊系統的研究方面具有無法估計的價值的數學上的一支是譜的分析（spectral analysis）。譜的分析所考慮的是在頻域（frequency domain）內波形的描述，以及在頻域內的描述和時域（time domain）內的描述二者之間的相當關係。我們假定讀者對於譜的分析已經有些認識。這一章中提到的只是當作複習之用，同時可以導出一些複雜的結果而是在本書其餘部份中我們將會有機會要用到的。

1.1 傅葉級數¹

一個時間的週期函數 $v(t)$ ，它的基本週期是 T_0 的，可以用弦式波形的一項無限的和來代表。這項總和，被稱為傅葉級數（Fourier series），可以被寫成幾種不同的形式。這些形式之一如下：

$$v(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \frac{2\pi nt}{T_0} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin \frac{2\pi nt}{T_0} \quad (1.1-1)$$

常數 A_0 是 $v(t)$ 的平均值，如下式所示：

$$A_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} v(t) dt \quad (1.1-2)$$

而係數 A_n 和 B_n 則是由下面的式子來規定的：

$$A_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} v(t) \cos \frac{2\pi nt}{T_0} dt \quad (1.1-3)$$

同時

$$B_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} v(t) \sin \frac{2\pi nt}{T_0} dt \quad (1.1-4)$$

傅葉級數的另外一種形式是：

$$v(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos \left(\frac{2\pi nt}{T_0} - \phi_n \right) \quad (1.1-5)$$

其中 C_0 ， C_n ，和 ϕ_n 與 A_0 ， A_n ，和 B_n 之間的關係是由下列各式來代表的：

$$C_0 = A_0 \quad (1.1-6a)$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (1.1-6b)$$

以及

$$\phi_n = \tan^{-1} \frac{B_n}{A_n} \quad (1.1-6c)$$