

科學圖書大庫

數位信號處理的應用

譯者 曲濟清

徐氏基金會出版

原 序

數位信號處理成爲急速成長的領域已逾十年。在這段期間，它與新的算式及理論的發展，以及新技術的開拓俱有相當密切的關係。信號處理的技術已自單塊的半導體元件，進至大規模積體電路（LSI）以及超大規模積體電路（VLSI）。甚且對取樣數據元件，如電荷轉移元件（譯者註：此包含串進元件及CCD（電荷耦合元件）兩種），更有強調的需要。價廉快速的微處理器普及，與潛力深厚的專用高元件密度積體電路，更爲簡化日益複雜的算式實際應用問題，此類實例有語音壓縮系統的實際化。許多在理論上極有趣的系統，由於需以高速處理器擔任以FFT爲基礎之高精密度頻譜分析，因此在不久以前仍不可能實現。例如由於目前CCD技術及頻譜分析與有限脈波響應（FIR）濾波器的實際化潛力，對一些過去不可能實現的語音處理系統，均有專用的LSI研製成功。這些與其他類似例子暗示，爲何數位信號處理領域，過去以及將來仍可能保持優勢情況。

在應用領域中，基本技術已有一些重要的相異處。這些相左的原因，部份是由不同的假設及限制而來，如資訊速率、即時需要等等。但許多情形差異係起源自不同領域缺乏溝通之故。經常吾人可發覺在某一領域數位信號處理技術，常導致於另一應用領域的發展。

本書的目的是討論過去十年中，一些重要的數位信號處理的應用。這些應用領域中，如語音處理及地震資料處理雖仍在開端，但彼此成爲許多重要發展的催化劑。而成音信號處理過去主要有賴於類比信號處理

，近年來才開始採用數位信號處理的技術。這主要原因是成音界對象以消費者為主，因而成本考慮極為重要。然而採用目前技術，吾人已接近成音信號處理重大革命的邊緣。

在探討數位信號處理的應用，吾人可觀察到發展數位信號處理相關技術所具不同的動機。在某些狀況，如雷達、聲納及地震信號處理，最重要的考慮是數位信號處理所提供的高度變通性及精確度。這種動機在本書許多應用可明顯的體會出來。而在另一方面，如電話及成音信號處理界，長期成本優勢變成彼等採用數位信號處理的重要因素。

本書每章寫作均有兩個主要目的，其一是供俱有基本數位信號處理背景的讀者，對每一特定領域作深入淺出的介紹。讀者將會發現許多應用領域實俱有許多相同面，但亦可發覺許多不同的處理方式。無可否認某一領域所採技術詳盡的瞭解，常可導致另一領域未來相當的成長。除作此導引面的介紹，每章所討論的技術無疑的將勾起實際工作者的興趣。因此可期待本書每章將吸引廣泛領域的讀者，經由探討新的應用領域，將會產生新的技術及概念。

作者對本書所有執筆專家辛勤工作致謝，彼等對每章實際所花的時間及精力遠超過最初所允諾者。許多執筆專家甚至擱置其它工作，此確使本書出版不致延遲。此外作者亦感謝 Monica Edelman 女士協助本書編輯秘書工作所表現的優越品德及效率。

A.V. Oppenheim

譯 序

吾人所生活的世界是類比世界，因而很自然的幾乎所有電子系統除資料處理外，最初皆是採類比方式。類比方式是個簡單卻有效的方式；但隨著系統日趨複雜，類比方式不再能滿足多樣且嚴格的要求，取而代之數位方式漸成所有電子系統的標準。

數位信號處理最早起源自雷達及聲納信號處理，隨後一直廣用於電信界中，近年又拓展至語音及影像處理。吾人熟知數位電子電路雖千變萬化，端賴兩項活寶：閘及正反器；同樣的，數位信號處理亦有兩項利器：數位濾波器及快速 Fourier 轉變（FFT）。數位信號處理方式，可用軟體在一般計算機上執行，亦可直接在專用數位電子系統上執行。此硬體通常將管線處理器或並行處理器等多處理器方式，以增進處理效率。

數位信號處理於時域方面的應用，經十數年的耕耘不論在各個領域均已獲得豐碩的成果。近年來數位信號處理於空域方面進展至為迅速，其與天學影像處理熟優熟劣，目前尚難立見分曉。

本書僅對數位信號處理的應用勾出一輪廓，有興趣作進一步探討的讀者，應先研究每章後所列的參考文獻。有關數位信號處理的原理，可研讀原作者 A.V. Oppenheim 姊妹作一 Digital Signal Processing 一書。

譯者求學生涯獲益最多者，厥為電子研究所兩年時光，僅以本書獻與母校一交通大學。

Handwritten signature and date: 11/18/89

徐氏基金會科學圖書編譯委員會

監修人 徐銘信

發行人 石開朗

科學圖書大庫

版權所有



不許翻印

中華民國七十年九月十八日初版

數位信號處理的應用

基本定價 4.20

譯者 曲濟清 交通大學電子研究所畢業

本書如發現裝訂錯誤或缺頁情形時，敬請「刷掛」寄回調換。 謝謝惠顧

局版臺業字第1810號

出版者 臺北市徐氏基金會 臺北市郵政信箱 13-306 號

發行者 臺北市徐氏基金會 郵政劃撥帳戶第 15795 號

承印者 大興圖書印製有限公司 三重市三和路四段一五一號

電話 9221763
9271575

9271576

電話 9719739

目 錄

原 序

譯 序

第一章 數位信號處理在電信系統中的應用	1
1-1 引 言	1
1-2 電信系統概論	1
1-3 數位傳輸	2
1-4 數位交換	3
1-5 PCM 傳輸終端機之數位信號處理	4
1-6 FDM 傳輸終端機之數位信號處理	7
1-7 撥號訊號檢測	10
1-8 交疊諧波失真：一種非線性現象	13
1-9 回響控制	16
1-10 數位信號處理硬體元件設計的考慮	19
1-11 可程式數位信號處理器的一些應用	21
1-12 摘 要	23
第二章 成音信號數位處理	26
2-1 概 論	26
2-2 類比—數位轉換的基礎	28
2-3 錄 音	47

2-4	傳輸及廣播	70
2-5	接收及轉換	77
2-6	轉換器設計	82
2-7	高等信號處理策略	89
2-8	結 論	98
第三章 數位語音處理		107
3-1	引 言	107
3-2	語音波形的模型	108
3-3	終端類比及音管類比語音合成器	113
3-4	語音短時距 Fourier 分析及合成	117
3-5	語音 homomorphic 分析及合成	129
3-6	線性預測分析及合成	136
3-7	語音極點-零點模型化	145
3-8	摘 要	149
第四章 數位影像處理		158
4-1	引 言	158
4-2	基本概念	160
4-3	影像資料壓縮的應用	171
4-4	影像消糊的應用	186
4-5	投影影像重建的應用	208
4-6	影像增強技術	214
第五章 數位信號處理於雷達的應用		223
5-1	引 言	223
5-2	雷達測量之參數	226
5-3	脈波雷達	228
5-4	雷達信號處理的理論	233
5-5	匹配濾波器的實施	246

5-6	數位雷達處理系統的實例	252
5-7	數位技術	282
5-8	類比—數位轉換器	284
5-9	移動目標指示器雷達	291
5-10	合成張角雷達	301
5-11	摘 要	307
第六章 聲納信號處理		311
6-1	引 言	311
6-2	聲納信號傳播的特性	313
6-3	有源聲納系統及數位信號處理	331
6-4	無源聲納系統及數位信號處理	368
6-5	結 論	402
第七章 數位信號處理在地球物理學中之應用		412
7-1	引 言	412
7-2	預測反捲旋運算	413
7-3	動態反捲旋運算	415
7-4	單元距離預測誤差運算子之最小延遲性質	431
7-5	波形整形濾波器	435
7-6	具 Toeplitz 形式標準方程式之反覆架構	445
7-7	雙維整形濾波器	450
7-8	結 論	458
索 引		462

第一章 數位信號處理在電信系統中的應用

S. L. Freeny J. F. Kaiser H. S. McDonald

貝爾電話實驗室

1-1 引 言

信號是任何電信系統一個非常基本的部份，這些系統充滿了信號處理技術的實例。近年來吾人愈來愈重視數位信號處理應用於電信系統中。這主要是因形小、低功率、價廉、抗雜訊及高信賴度之中規模積體電路（MSI）及大規模積體電路（LSI）迅速普及之故。多年來作者均側身貝爾系統中從事一些數位信號處理應用的發展：本章中吾人僅提出某些代表性的實例。為協助讀者瞭解，吾人側重敘述性而非數學處理方面，並且儘量少用極度專門化名詞。

以下討論自簡短回顧可適用數位技術之電信系統各個部份開始。這些子系統包括數位傳輸、數位交換、脈搏碼調變（PCM）、劃頻多工（FDM）傳輸終端機、監督及回響控制。而後討論集中於可程式數位信號處理器設計，暨其結構、係數靈敏度、非線性效應等設計考慮，及設計協助物的角色。然後詳盡敘述一個可程式數位信號處理器的變通性及其使用，本章以預測最近的將來作結束。

1-2 電信系統概論

由於信號是電信系統的基本部份，因而信號處理於電信系統內係扮演一主要角色。欲使許多信號多工傳輸至高速數位傳輸線，或寬頻帶類比無線電頻道，信號必需經濾波消除頻道外之部份，以避免產生失真及

2 數位信號處理的應用

相鄰頻道間的干擾。電話號碼在交換機間係以編碼音頻傳送，許多新式電話機是以按鍵音頻代替過去轉盤之順序脈波。信號處理電路需能產生及檢測這些信號。而測試動作正常否，或找出故障所在亦需廣泛信號處理功能。

1-3 數位傳輸

如同信號處理的需要融入電信系統每一部份，數位方式亦以成長性的趨勢加入同樣系統大多數部份⁽¹⁾。轉向數位方式可起源自60年代早期，當時證實一對22號銅線可傳輸1.5百萬位元/秒資訊至6000呎遠處而無明顯的錯誤產生。6000呎恰好是通常加以負荷線圈以等化由雜散電容所產生高頻低下現象之處。以一包含前置放大器、時脈補償電路及輸出脈波放大器之有源設備取代前述之負荷線圈，輸入之脈波列可重複產生並傳輸至6000呎外另一具轉換器。

因而一對普通僅能傳送一音頻訊號傳輸線，現可傳輸一大於1百萬位元/秒之數位信號。擷取此項性質的優點，一新的傳輸系統通稱為T載波系統，可用1.544百萬位元/秒同時傳輸24個語音頻道。此系統內每個語音頻道信號每秒取樣8000次，每一取樣信號均轉換至數位以便傳輸，這個過程通稱為脈搏碼調變(PCM)。一般PCM方式，每個數位表某一特定時間類比信號的電壓(或電流)幅度。應用於T載波傳輸系統內，PCM形式通常為 μ -255對數PCM⁽²⁾，此乃因每個數位代表瞬間信號對數值(近似)。採用此法係因這種PCM每一數位位元組僅需8位元即可獲得所需信號對雜訊SN比，若採用一般線性PCM則需13位元。

自1961年推出此PCM系統。其經濟上的優點很明顯的看出，自1965至1975年間，每年均成長40%。目前已有六千五百萬電路哩數位載波操作中。圖1-1為一具1.544百萬位元/秒之轉換器照片。

數位方式通訊信號的傳輸，亦廣用於即將發展的系統內⁽³⁾。當空間充滿愈來愈多的信號，無線電傳輸需用更高的頻率，或採用波導與其他方向性措施以傳輸這些資訊。這兩種方式由於傳播介質的本性，均將導致採用數位調變方式。高頻直視無線電系統由於地上物的反射產生多

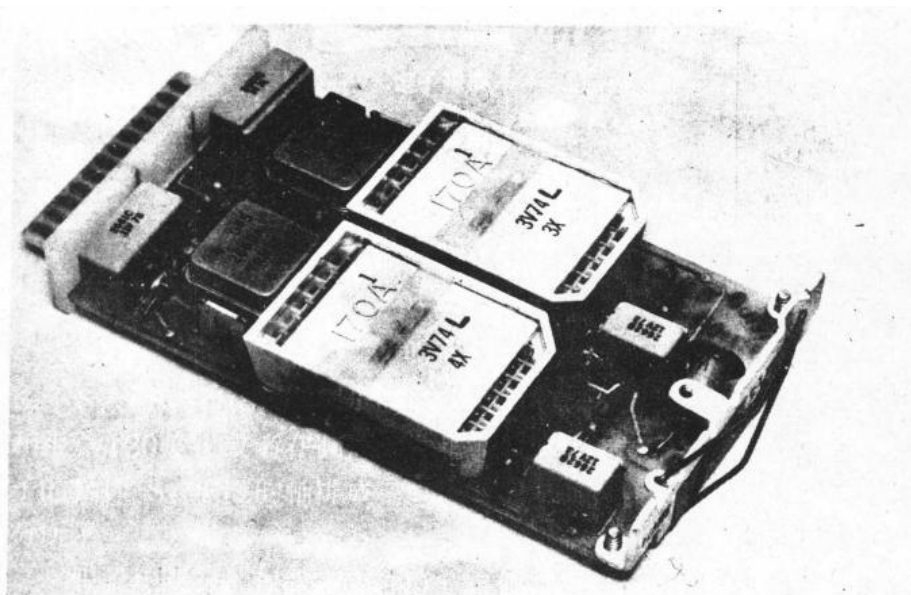


圖 1-1 德州儀器所製的積體電路轉換器

路徑問題。波導及光纖當能量以不同的速率及型態傳輸時，亦產生多路徑效應。數位信號調變可使個別信號失真除去，再產生一新的信號以解決此多路徑問題。在本世紀結束前可能有半數電話系統採用數位傳輸技術。目前許多大城市其交換機間半數以上幹路（trunk）採用 T 載波數位傳輸方式，德州的休士頓市便是一例。

1-4 數位交換

數位技術同樣也打入交換系統。芝加哥市已有一非常大的長途交換系統⁽⁴⁾，此交換系統（ESS-4）四倍於過去的長途交換系統（10,000 個幹線）。而數位劃時多工（TDM）動作是建此大的交換系統的關鍵點。一般交換系統內，每一開關矩陣單元的大小均有實際的限制。普通電機械式矩陣為 16×16 。對一非常大的系統，任何輸入均可能有機會接至上萬的輸出端點之一點，因而需甚多開關矩陣。且由於極大的扇出量及小的開關尺寸，許多級間聯結因而均被閒置。而閒置的聯

4 數位信號處理的應用

結導致利用率低下，因此不可能採用小的開關矩陣，建一非常大的交換系統。劃時法解決此問題是經由分時多至 120 個信號，傳至此一小開關矩陣的輸入。是故為符合此大的長途交換系統，數位技術乃是必需的。

除此而外，TDM 交換方式亦有其他優點。數位幹線回至 TDM 交換系統僅需緩衝器，而毋需轉換至類比形式，因而系統內採用數位方式可減低相當成本。數位回響控制及數位按鈕音頻接收器，亦較類比方式同樣設備更經濟且可靠。TDM 同時亦減少系統間的聯結，此因單一數位傳輸線可作數百個同時電話交談。

將來交換系統將極可能擴展 TDM 觀念，至階層多工 (hierarchical multiplexing) 內之交談通道之慢掃描及控制信號。交換系統內之通道亦可傳遞控制計算機，及數位信號處理裝備界面微處理器的資訊。

未來本地電話系統為信號一建立即刻數位化並傳出⁽⁶⁾。此計劃需對每一電纜加一插入式界面設備⁽⁶⁾，而此功能依電話用戶、幹線電路或其他專用電路而定。送出終端設備後，信號即被濾波，取樣及數位化。資訊即被多工檢測及控制界面單元內不同的功能⁽⁷⁾，如直流線電流狀態，或測試及環繼電器狀態。每一界面單元之數位界面應予標準化，因而可配合界面機架任何空的插座。所有系統間聯結均可經由一些層次多工輪至數位傳輸線。此一系統稱為“Digital Wire Center”，許多性質已在實驗證實⁽⁸⁾。這個實驗顯示對一本地電話局應用可減少

200:1 的系統間之聯結。數位系統使設計者以開的處理代替系統間之聯結。在本世紀未來 20 年本地電話交換系統採用數位方式極具發展力。

因而不論應實際需要或經濟效益⁽⁸⁾，電話交換系統已長期逐漸轉換為數位傳輸及數位交換方式。且由於信號處理於電話系統屬一基本角色，因而數位信號處理將於未來系統扮演一主要角色。

1-5 PCM 傳輸終端機數位信號處理

於傳輸終端機內，目前採用類比濾波器以限制頻寬功能，將在 TDM 及 FDM 終端機內被數位濾波器取代部份。TDM 終端機內，基本的 D (代表數位) 通道羣可對一組類比語音頻率信號，與高速串聯數

位元作互相轉換。D 通道羣目前是用 LC 或有源 RC 濾波器，其截止頻率約為 3.2 千赫，以消除於 8 千赫取樣頻率時，任何較高頻率所造成之交疊（aliasing）現象。高通濾波器必需施於傳輸端用於除去交流電源基本頻率。通常高通濾波器為二階次，低通濾波器為五階，並有一些複數零點對接近頻帶邊緣。傳統的通道羣中，濾波作用後隨著一取樣閘，再聯至共用的 PCM 編碼器，圖 1-2(a) 為此種終端機之方塊圖。

另一種方式^(8, 85) 係採用數位處理，於較高頻率（32 千赫）取樣類比信號，並數位化至一線性 PCM 或 DPCM 碼。較高取樣頻率下之數位濾波器，將除去 3.2 千赫以上能量，以及 200 赫以下交流哼聲。雖此數位濾波器可作除去頻帶外不需能量的大多數工作，但仍需加一簡單的類比低通濾波器於類比至數位轉換器（ADC）之前。若每 4 個取樣信號拋棄其中 3 個，則取樣頻率可降至 8 千赫。對數位濾波必需採取之

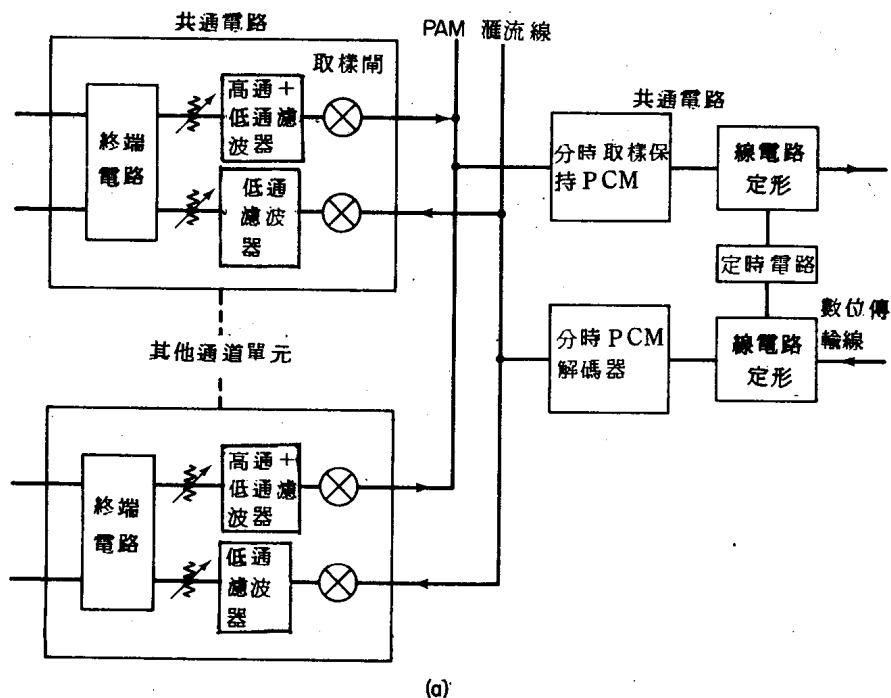


圖 1-2a 使用類比濾波器之數位通道組

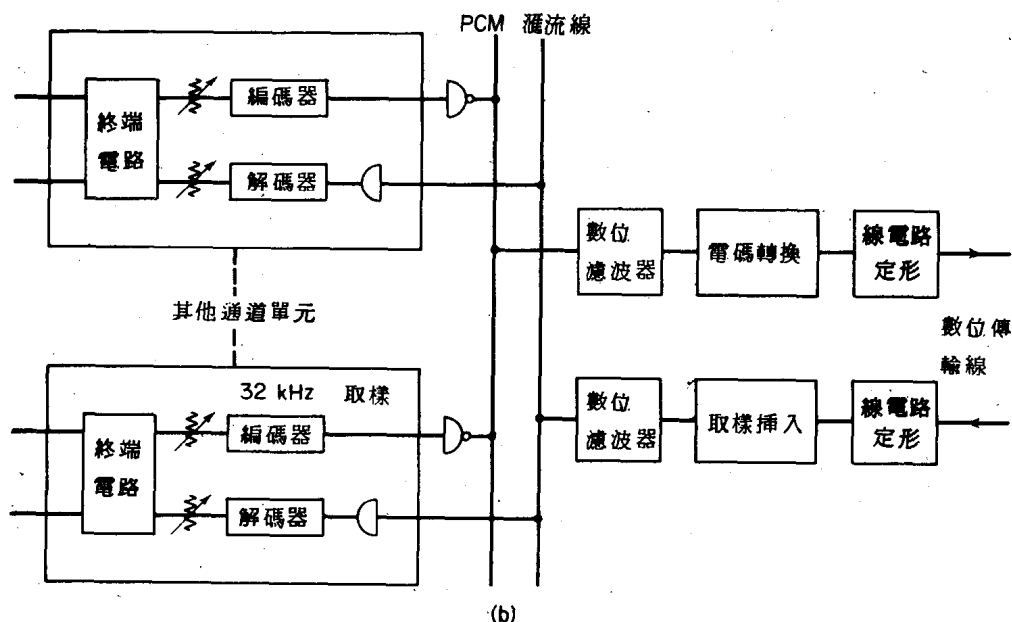


圖 1-2b 使用數位濾波器之數位通道組

線性 PCM 方式，而後必需轉換至應用於 PCM-TDM 內之 15 段 μ 規則碼。接收時類似的數位過程線性化此碼，輸入取樣信號填入 (interpolate) 新的取樣信號，並回復至類比形式。數位通道羣方塊圖如圖 1-2(b) 所示。數位方式優點如下：

1. 積體電路價格不斷下跌，多工數位濾波器將會較類比濾波器為廉。
2. 數位濾波器無漂移及誤差問題。
3. 數位濾波器者採較高取樣速率，取樣插入器所需成本並不高，而可使通道及傳輸線之取樣率不需同步。
4. 每一傳輸線 CODEC (編碼—解碼器) 後接一數位多工器，可減少通道間串話之可能。

至於數位通道羣較傳統之類比通道羣之缺點如下：

1. 以目前積體電路價格而言，數位濾波器略昂。
2. 即使數位濾波器無漂移，然卻引入削切 (round-off)，因而需加

額外位元以獲得較高的精確度。

1-6 FDM傳輸終端機之數位信號處理

ESS-4 等交換系統採用數位形式信號，因而必須將輸至此系統之類比信號數位化。這不僅祇對個別語音傳輸線而言，同時也指交換局間的 FDM 幹線，其載有成組單邊帶 (SSB) 調幅之類比信號。其中很明顯的方式，是以傳統的技術解調 SSB 信號至基帶，並以個別語音傳輸線方式處理。然而此處有機會引入數位信號處理技術，以擔任較高層次工作，即數位化此複合 SSB 信號，再以數位方式解多工。(此處僅描述接收部份，然而必需瞭解每種情況下於反方向亦有對稱程序存在，例將數位語音頻帶信號轉換為 SSB。)

第一個欲回答的問題是在 FDM 何種層次產生此類轉換。於電話網路標準語音信號組合為 12 通道羣 (group)，60 通道構成超羣 (super group)，600 通道構成主羣 (master group)。其中選擇有賴編解碼不同大小 SSB 信號來的成本及困難性而定。由於每種情況數位處理相對成本及可靠性，通常使得由一個信號處理單元處理大量通道顯得更糟。

貝爾實驗室所建一實驗性系統採用最小信號束 (僅 12 通道所構成之羣)，雖然其他方面建議使用 60 通道之超羣⁽⁹⁾。

下一個所面對的主要問題是 SSB 信號雙工解調，應採用何種數位處理算式？在研製過程曾試用許多算式^(9,10,11)。最終的抉擇將強烈依賴算式及當時所能引用數位積體電路技術而定。由於技術不斷革新，因而作者寫成此書時很難預測最後將是何種情況。已經證實非常有效的方式且應用於前述之系統中，為首先由 Weaver⁽¹²⁾ 提出之 SSB 調變/解調方法，如圖 1-3。

首先考慮類比形式之 Weaver 調變法或許較易 (當然最初此法是以類比形式推出，此乃因 Weaver 作此工作遠在數位信號處理發展之前)。並且考慮基頻信號轉換為 SSB 界面最便利，如前存在一對稱反過程。吾人假設每一語音頻帶為 100 赫至 4 千赫。

信號分為兩部份並分別由相位差 90 度之中頻道 (2 千赫) 調變之

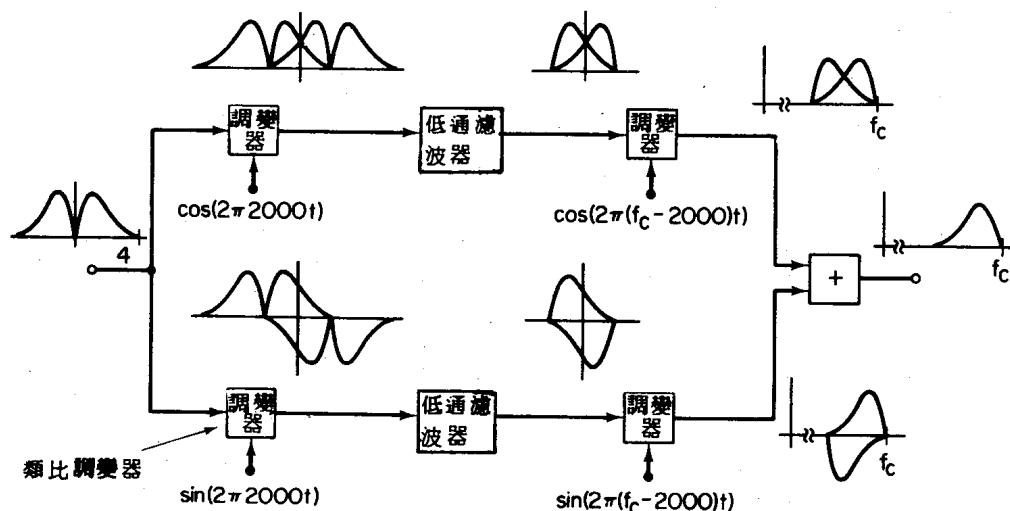


圖 1-3 Weaver 之 SSB 產生法

，產生如圖所示輸出頻譜。（這些頻譜實際上即相疊邊帶分離後之 Fourier 轉換圖示法，此種方式使讀者可輕易瞭解各點不同邊帶如何對消。）兩個相同的低通濾波器（LPF），可除去 2 千赫以上的能量。在第二個調變級中，產生的邊帶組合轉移至羣頻帶所需通道位置（電話系統中標準羣頻帶包含 12 個 4 千赫頻槽，自 60 至 108 千赫）。若兩調變信號加於一起，則不希望之邊帶即被對消。當然，對消程度有賴於兩通道接近程度。事實上這也是 SSB 使用類比方式實現困難的所在。

穩定性及可重複性是數位電路基本貢獻，然而數位方式之 Weaver 調變器經由適當選擇位元組長度亦可獲得所需精確程度。此外吾人亦留意 Weaver 法一項優點，是祇在所需通道發生不需要邊帶對消現象，而不會如其他產生 SSB 方法亦可能發生在相鄰通道，如此相當減緩了對消程度的需求。

數位形式的 Weaver 調變。其標準 8 千赫 PCM 語音信號轉換至類比 SSB 產生某些問題。其一為取樣率該如何決定。由於複合羣頻帶信號最高為 108 千赫，取樣率應至少高於此頻率的兩倍。但可使用 60

千赫以下空頻率間隔，此法為產生一偽羣頻帶信號，而後濾去此信號之第一影像頻率，此頻率於末級數位至類比（D/A）轉換時自動產生。略一回想吾人可知基本取樣頻率可在 108 千赫與 $2 \times 60 = 120$ 千赫之間。然而起初吾人必需與 8 千赫 PCM 取樣信號界面，為簡化同步問題通常採用 8 千赫的信數，因而很快即可決定 $14 \times 8 = 112$ 千赫。

此處吾人可設計一數位 Weaver 調變器，其取樣率為 112 千赫，方塊圖類似圖 1-3 者，唯其類比調變器及濾波器均改採數位形式而已。當然也必須經由如 Crochiere 及 Rabiner⁽¹³⁾ 所敘述之取樣插入法，將輸入之 8 千赫改變為 112 千赫取樣率。然如此將需動作此複雜的數位低通濾波器於 112 千赫取樣率，事實上居前的 2 千赫調變器，可在基本 8 千赫輸入率動作良好。因而使 8 至 112 千赫取樣率改變至剛好超過 LPF，使得這些濾波器硬體數量減少至 14:1。設計完成之數位 Weaver 調變器方塊圖如圖 1-4 所示。整個系統詳盡設計敘述於一些參考文獻中^(10, 14)。

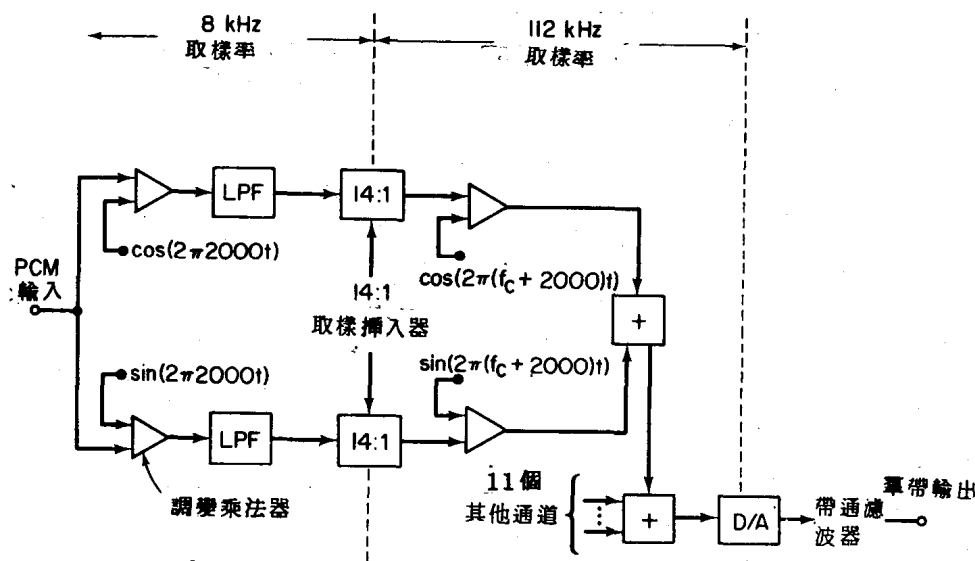


圖 1-4 數位 Weaver 調變器