

東北電訊器材修配工廠編譯
存華書店東北總分店發行



無線電調頻原理

無線電調頻原理

東北電訊器材修配工廠編譯

新華書店東北總分店發行

調頻原理目錄

第一章 調頻原理.....	1
1——1 調頻與調幅.....	1
1——2 調頻波的分析.....	3
1——3 調頻與調相.....	10
1——4 倍頻和混波.....	12
1——5 調頻、調相及調幅的聯帶關係.....	13
第二章 調頻方法.....	17
2——1 調頻的基本方法.....	17
2——2 變阻管調頻法.....	19
2——3 利用調相原理的調頻法.....	25
2——4 其他調頻方法.....	33
第三章 調頻波的發射.....	35
3——1 調頻發訊機.....	35
3——2 調頻波的傳播.....	37
3——3 調頻發訊天線.....	40
第四章 調頻波的接收.....	43
4——1 調頻發訊機與調幅收訊機的比較.....	43
4——2 限制器.....	46
4——3 鑑頻器.....	51
4——4 頻率穩定方法.....	58
4——5 收訊機的校準.....	60

4——6	調頻收訊天線.....	63
第五章	美國軍用調頻通訊機的研究.....	67
5——1	美國調頻通訊機的特點.....	67
5——2	美國軍用調頻通訊機 SCR-509 的構造內容.....	67
5——3	美國軍用調頻通訊機 SCR-508 的構造內容.....	72
附 錄		
	矢 量.....	78

第一章 調頻原理

1-1 調頻 (Frequency modulation) 與調幅 (Amplitude modulation)

將聲頻訊號加到高频波上的特種程序，叫作『調變』(Modulation)。連續高频波有三種特性，——振幅、頻率及相位。調幅時，高频波的振幅隨同聲頻訊號的振幅變化，而頻率則保持不變，如圖 1-1 (C)。反之，調頻是頻率發生變化而振幅則保持不變，如圖 (D)。

調頻比調幅有很多優點：最重要的是雜音減少，因為天電和人為的干擾主要是使電波的振幅起變化，而不是頻率變化。調頻波的特性是頻率變化而振幅保持不變。由於電波傳播間受到天電或其他干擾，所以到達收訊機時，電波振幅都有所變化，這種振幅變化，將產生最大雜音而使訊號失真。因此在收訊機中另設計有修剪振幅變化的限制器級，使振幅變化減到最小，因此得到了強訊號對低雜音的比率，而減少由雜音所引起的失真。調幅則不能，因為調幅波的特性就是利用振幅的變化，所以因干擾所引起的振幅變化是無法修剪的，只能利用真空管的特性或其他線路減少雜音。其次調頻波的振幅是保持不變的，因此發訊輸出管都可以在最高的工作效率下進行發訊。調幅波發訊則不然，它要考慮振幅的最高峯值，而使輸出限制在一定限度內。調頻機中，有足够的波道寬度，使高至每秒 16,000 週的聲頻波都能通過，並且調頻電路能將所有低頻普遍的放大而不失真，發揮高真實度。此種情形，在調幅機中不能實現，因為廣播頻率的波道，只允許載波兩邊有 5 仟週的波帶，所以電台間

不能無干擾的傳達8000週以上的聲頻。

調頻波的波道較寬，不能利用一般調幅廣播用的頻率範圍，所以調頻波都是利用超短波頻率範圍。由於調頻波所利用的頻率高，所以從海氏層 (Heaviside layer) 所反射回來的天波少，而受到天電干擾輕。

調頻波的優點已如上述，至於調頻與調幅另有相同與相異之處歸納如下：

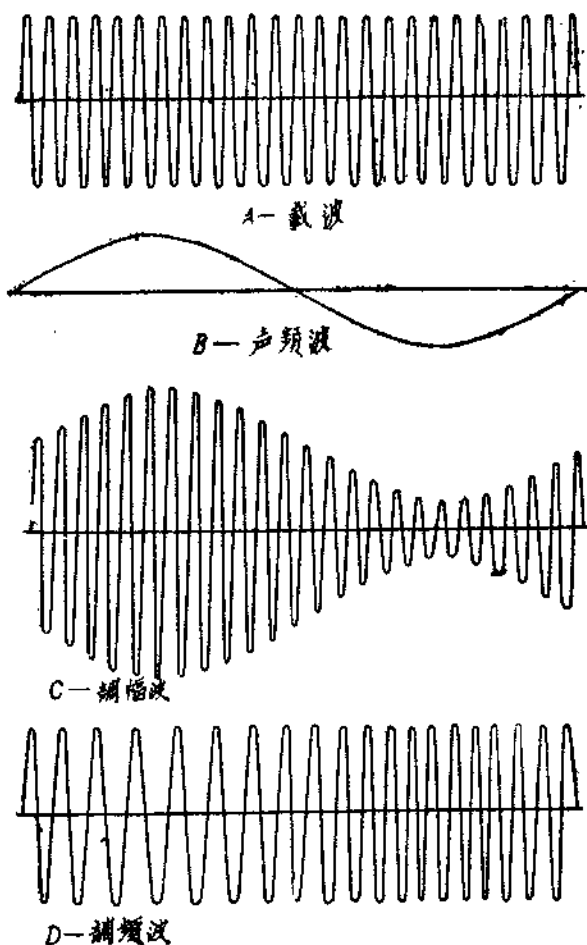


圖1—1 調幅波和調頻波

- 1 調頻波與調幅波同為由載波及邊帶波所組成。
- 2 調幅波的邊帶只有一對，而調頻波則有無數的邊帶波，佔據波道較寬。
- 3 調頻波的振幅是固定不變的，而調幅波的振幅隨聲頻振幅變化。
- 4 調頻波的頻率是隨聲頻振幅變化的，而調幅波的頻率則不變。

1—2 調頻波的分析

振盪頻率是以配諧電路的電容量和感應量為根據的，當振盪器的感應量固定而電容器前後擺動很快時，那麼振盪頻率就發生變化。如將此振盪器安一個度盤，中央刻零記號，零的左右都刻上度數記號如圖 1——2 所示。將電容器調整到零，振盪器就產生一種頻率，叫『中點頻率』 (Center frequency) 或『基本頻率』 (Rest frequency)。為了容易說明起見，假定中點頻率是 $50MC$ ，同時藉此去傳送 400 週的音波。更假設能以每秒 400 次的速度，往復調整電容器（從零點往右，即是到正 50 度上，再回經零點到負 50 度，然後再回到零點，完成一週為一次。）那麼，振盪器的輸出，就是經每秒 400 週的聲頻調變的調頻波。聲音（或調變訊號）頻率，是以振盪頻率通過基本或中點頻率的次數為根據的。現在再放大幅度，使電容器在正負各 100 度間擺動，並假使一收訊機可調整接收這樣的調頻波，那麼在揚聲器聽到的仍是 400 週的聲音，但是音量比前增大多了。從正負各 50 度的最大值，變化到正負各 100 度的最大值，就是音量的變化，或者是調頻訊號調變百分率的變化。設上述第一種情形，振盪頻率是從 $50MC$ 減 $75KC$ 變動到 $50MC$ 加 $75KC$ ；第二種情形，是從 $50MC$ 減 $150KC$ 變化到 $50MC$ 加 $150KC$ 。振盪頻率自基本頻率的變化或者說載波頻率向二側中的任何一側變化的

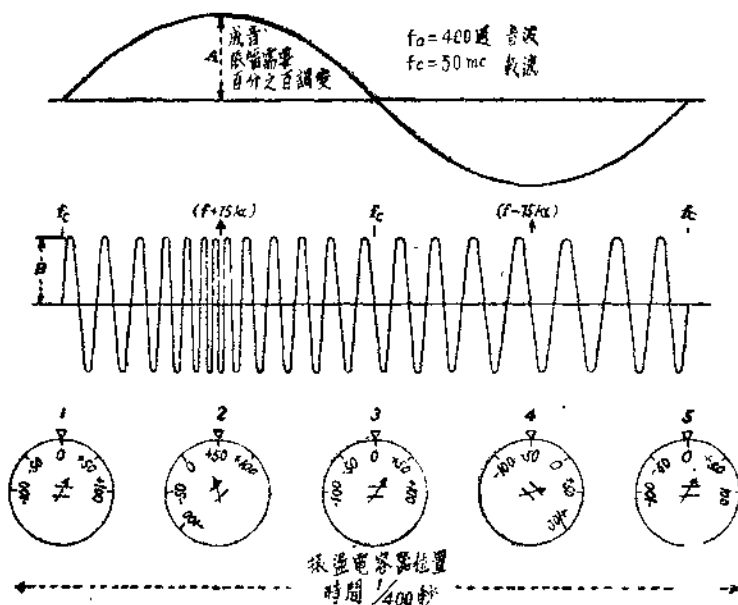


圖1—2 調頻波

最大值叫作頻率偏度 (frequency deviation) (如第一種情形的 75 KC 和第二種情形的 150KC)，這種頻率偏度的增加，就是表明成音訊號振幅的增加，而與成音訊號的頻率無關。換句話說，我們可以決定頻率偏度成任何數值而決不受聲頻頻率的影響。調頻廣播發訊機所謂百分之百調變，需要在基本頻率的兩側，各有75KC的頻率偏度，如發射訊號的波道，比收訊機所能够接收的波帶寬度更寬時，由於收到的訊號波帶末端不完全，而使訊號失真，此種現象，類似調幅中的所謂過調變。

上述變化關係，假如調變訊號是正弦波；那麼，振盪頻率的變化率，也必是正弦曲線關係。如果將上述電容器度盤機械的連到『

鐘擺』上其電容量即可得到正弦關係變化，因「鐘擺」是根據正弦律而擺動的。

關於圖 1—2，成音訊號的公式如下：

$$e_a = A \sin 2\pi f_a t \quad (1)$$

e_a = 瞬息成音振幅 A = 成音振幅峯值 f_a = 成音頻率(每秒週數)

t = 時間秒數

假設高頻載波，未經調變，瞬息載波電壓是：

$$e_c = B \sin 2\pi f_c t \quad (2)$$

一般的交流電波，當其振幅是 C 時，可以作為：

$$e = C \sin \phi(t) \quad (3)$$

式中的 e = 瞬息振幅 $\phi(t)$ = 弧度角的位移。設瞬息角速度為 w_i

(= 2π 乘瞬息頻率)，在此電波中

$$\text{瞬息角速度} = w_i = \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (4)$$

$$\text{或 } \phi(t) = \int_0^t w_i dt \quad (5)$$

以正弦聲頻波調變的調頻波，其瞬息角速度：

$$w_i = w_c + 2\pi \Delta f \cos w_a t \quad (6)$$

式中， w_i = 瞬息角速度 w_c = 未調變的載波角度

$w_a = 2\pi$ 乘低頻率 f_a

Δf = 載波頻率的最大頻率偏度

將 (6) 式代入 (5) 式得

$$\phi(t) = \int_0^t (w_c + 2\pi \Delta f \cos w_a t) dt \quad (7a)$$

$$\text{或 } \phi(t) = w_c t + \frac{2\pi \Delta f}{w_a} \sin w_a t \quad (7b)$$

於是調頻波的電壓

$$e = C \sin (w_c t + \frac{2\pi \Delta f}{w_a} \sin w_a t) \quad (8a)$$

又可寫作

$$e = C \sin(\omega_c t + mp \sin 2\pi f_a t) \quad (8b)$$

e_c = 瞬息載波振幅 B = 載波振幅峯值 f_c = 載波頻率每(秒週數)

t = 時間秒數。

將上項公式，用三角公式求二角之和的方法展開，結果：

$$\begin{aligned} e = C \{ & J_0(mp) [\sin(2\pi f_c)t] \\ & + J_1(mp) [\sin 2\pi(f_c + f_a)t - \sin 2\pi(f_c - f_a)t] \\ & + J_2(mp) [\sin 2\pi(f_c + 2f_a)t + \sin 2\pi(f_c - 2f_a)t] \\ & + J_3(mp) [\sin 2\pi(f_c + 3f_a)t - \sin 2\pi(f_c - 3f_a)t] \\ & + \dots \dots \dots \\ & + J_n \dots \dots \dots \} \quad (9) \end{aligned}$$

上式中：

e = 調頻波瞬息值

J_n = n 次邊帶的振幅

C = 調頻波的定值振幅

mp = 調變指數

公式(9)雖然很複雜，但對於調頻波解說得詳盡，可以加以研究。

上述公式各項說明調頻波有許多邊帶波(或許多邊帶頻率)，這是與調幅波不同之點。常數 C ，(公式(9)各項的係數)，說明調頻波的振幅是常數，而不像調幅波那樣的變化，因此，調頻發訊機儘可使真空管無時不盡最高能力發揮最高效率，而不必像在調幅方式中，須顧慮振幅變化的峯值。 mp 項叫調變指數(modulating index)，和調幅裏的調變係數，同一道理。它的意義是：

$$mp = \text{調變指數} = \frac{\text{最大頻率偏度}}{\text{調變(聲頻)頻率}} \quad (10)$$

上式的 mp 單位是弧度角。爲了實際的說明公式(10)，假定最大頻率偏度，適應於所謂百分之百的調變(或75KC)，並且使之傳送每秒15,000週的聲頻，按公式(10)求得調變指數 $mp=5$ 。假如用語言或音樂去調變載波，聲頻頻率即可在成音階段中任何部份從50週變化到15,000週，因此 mp 也從1,500變到5。這又說

明一已知頻率偏度，調變指數的變化與調變頻率成反比。

現在再看看公式 (9) 中的 $J_n(mp)$ 項。這些 $J_n(mp)$ 項叫作畢塞爾函數的第 n 級，至於 $J_0(mp)$, $J_1(mp)$, $J_2(mp)$, $J_3(mp)$... 等，代表各級的畢塞爾函數，彼此皆不相同，但性質都是一樣。這些 J 項都是 mp 的函數。假如 mp 是固定值（例如是 5），那麼每個 J 項都有固定值。假如當用語言或音樂複雜的聲頻波進行調變時， mp 發生變化，每個 J 項也都隨着變化。

各項 J 的值，表示各個邊帶的振幅，例如公式 (9) 中， J_0 是代表載波頻率或基本頻率的振幅，因為 J_0 是僅有載波頻率 f_c 的 $\sin 2\pi f_c t$ 項的係數。同樣 J_1 代表在載波頻率旁對稱位置的第一級上邊帶及下邊帶的振幅，其餘以此類推。事實上，調頻波是由無限數目的邊帶所組成，所以需要無限寬的波帶，但大部份的邊帶，是無關重要的。電波電力的傳送，用其中少數邊帶即可。圖 1—3 表明重要邊帶波的次數，約等於調變指數 mp 。例如該圖 (1) 圖中， mp 的值是 5 時，比第五次邊帶高的邊帶，皆衰減至無足輕重；圖 (2) 中， mp 的值是 10，10 以上的邊帶，皆無甚重要。這種圖形甚為明顯，對於事實的記憶很有幫助。

另一重要之點，即在聲頻範圍內不論調變電壓之頻率如何，如果調變百分比固定，則波帶寬度，仍近於定數。從公式 (10) 可以看出，調變指數 mp ，與調變頻率成反比。舉例說，假如調變頻率是 50 週， mp 的值將是 1,500，表示在 1,500 以內的上邊帶和下邊帶，不可忽視。因這些邊帶，每個間隔僅 50 週，所以波帶寬度佔據 $2 \times 1,500 \times 50$ 為 150 千週。假使用每秒 15,000 週的調變頻率，則五個上邊帶及五個下邊帶，都很重要。此種情形，每個邊帶都間隔 15,000 週，此波帶寬度是 $2 \times 5 \times 15,000$ 為 150 千週，和以前一樣。所以在頻率譜載波頻率 50MC 附近，最少需要 150 千週的波帶寬度。

調頻波因

爲振幅不變，所以電波的總電力也不變，至於每個邊帶波的電力是隨着調變度及調變訊號的頻率而變化。譬如調變度爲零時，（頻率偏度爲零時），所有電力，全在載波頻率或基本頻率內。在其他調變度時，載波的電力，可能降至零，但此電力則分佈在各邊帶波上。

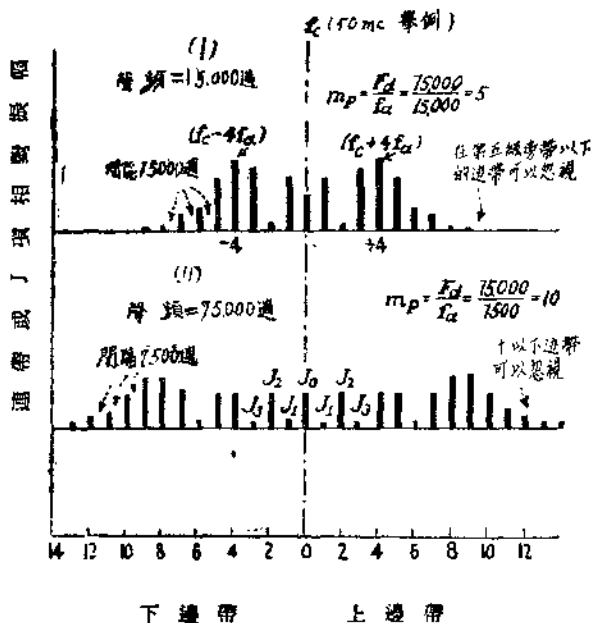


圖1—3 調頻波頻率譜分析

調頻波的頻率隨時都在變化着，每個週波不再成爲正弦形，這個可以用圖 1——4 來說明，此處變化中的頻率，在完成第一個四分之一週所需的時間，與完成次一個四分之一週所需的時間不同，『實際電波』是失真的正弦波，就是說包含許多重疊的正弦波（副波）。將公式（9）詳細加以分析，說明正弦波調入的調頻波頻率譜是由載波

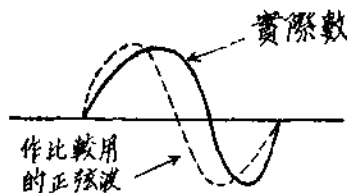
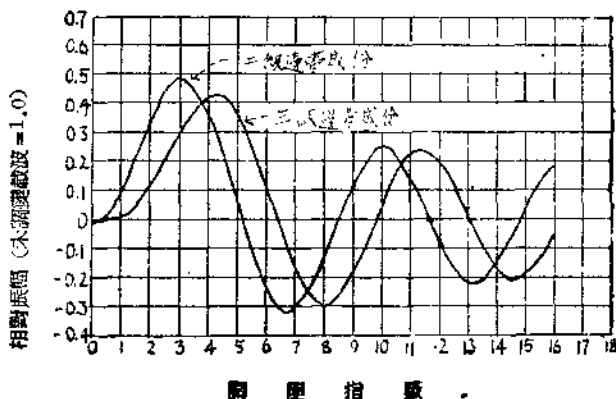
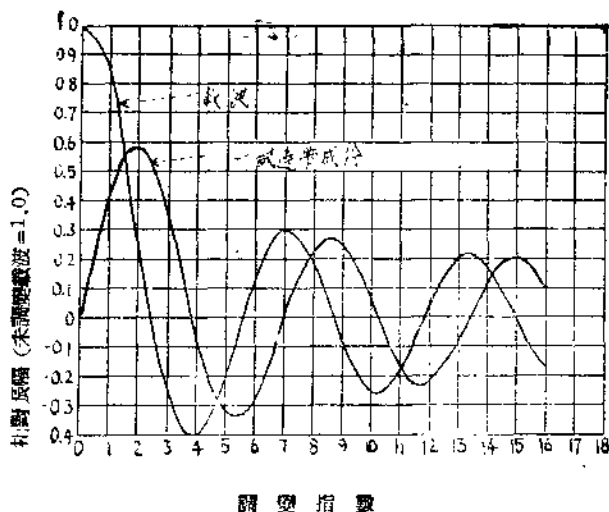


圖1—4 圖示調頻波頻率增加時產生多量的副波，已不是正弦形

頻率與許多整數倍的低頻所隔開的邊帶頻率組織而成。因此調頻波不僅有與調幅波相同的頻率成分（即第一對邊帶）送出相同的訊號，並且比調幅波有更多的邊帶。正弦調變時，各種不同頻率成分的振幅，是根據指數 mp 的大小而定，可以由畢塞爾函數表或圖 1——5 求出。

在不同情形下調頻所得到的頻率譜特性，如圖 1——3 所示，當調變指數小於 0.5 時，也就是頻率偏度小於調變頻率的一半時，第二第三次及較高的邊帶成分較小，故在此時，用以送出訊號主要成分所需之波帶，與調幅相同。一次邊帶的振幅差不多與調變指



數成正比。

另一方面，當調變指數大於一的時候，就是說頻率偏度比調變頻率大時，那麼，在電波中就有重要的較高次邊帶出現。波帶裡

的各種頻率，被調變頻率相等的間隔所隔開，調變頻率越低，各個邊帶就越靠近些。當調變指數比一稍大時，載波兩側所佔的波帶寬度將是頻率偏度的兩倍。並且受調變頻率的影響很輕。由公式（9）及圖1——5可看出，調頻波中載波的振幅成分，與調幅時不同，是拿調變大小作根據的。

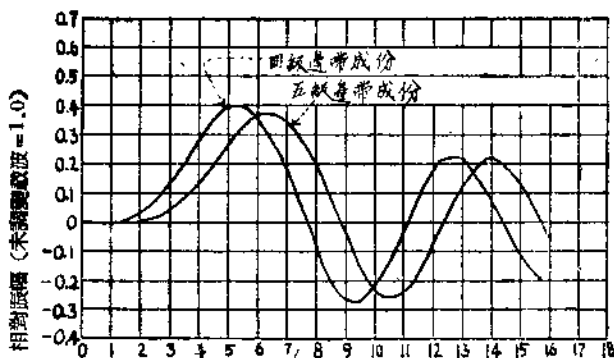


圖1—5 調頻波或調幅波頻率振幅圖（代表單獨邊帶的振幅）

1—3 調頻與調相

調相 (phase modulation) 就是變換高頻波的相位而將聲頻訊號送出。

調相比較複雜些，要明白調頻與調相間的區別，必須先瞭解交流電的頻率是由相位變化率來決定的。一個相位變化快的交流電流比一個相位變化慢的頻率高，如一秒鐘相位移動360度（電工空間度），那說明頻率是一週，如果一秒鐘內相位移動1080度（ 3×360 ），頻率即為三週。

相位位移的速度如為定數，則頻率也是定數，如果相位變化率有

時快有時慢，頻率必隨之變化：相位變化速度增加，頻率也增加，速度減低，頻率也減少。

假如振盪器級在一個固定頻率上工作，此振盪頻率經數級放大器調配線路的變化不能影響振盪的頻率。雖然不能變化頻率，但我們能由於調配回路或其他線路，使高頻率電流相位發生變化，例如調配回路調整在不諧振時，則儲能回路的電流，和振盪頻率在諧振點時的相位發生變化。設此相位相差為10度，就是不諧振電流和振盪頻率的諧振電流相位差10度。但是此時頻率和以前一樣，毫無變化，與振盪頻率完全一致，只是相位不同而已。但當相位繼續變化以後，頻率也隨之有變更。如果電流相位超前，則頻率增加，如相位滯後，則頻率隨之減少。

正弦調相時，調相波的公式如：

$$e = C \sin(2\pi fct + mp \sin 2\pi fat) \quad (11)$$

C = 調相波振幅

mp = 相位偏度的弧度角 （從沒有調變的相位到調變波峯值的相位）

由上式得知調相波的本質與調頻波相同。但調頻波與調相波的主要不同點是：調頻波的頻率偏度是直接與聲頻調變波振幅成正比，不與聲頻頻率發生關係，而調相波的頻率偏度是與聲頻調變波的振幅和頻率都成正比，即是與相位偏度和聲頻頻率成正比，因此調相波的頻率偏度與公式（10）關係相附合，得：

$$\text{頻率偏度} = \Delta f = mp \times \text{聲頻調變頻率} \quad (12)$$

調相波的相位偏度 mp 只與聲頻調變波的振幅成正比，而與其頻率無干，因此振幅一定的聲頻波不論頻率高低其相位偏度都是一樣，至於調相波的頻率偏度則與聲頻調變頻率成正比，如公式（12）。例如有振幅相同的1000週和2000週的調變波用調相方法調變時，被2000週所調變的頻率偏度約兩倍於1000週的頻率偏度。但用調頻方法調變時，由於二調變波的振幅相同，其頻率偏度相等。

我們知道，調相與調頻有本質上的相同，所以調頻波可以利用調相方法得到。由上述關係，調相波的頻率偏度是隨聲頻調變頻率而變化，但調頻波的頻率偏度則是固定不變的，因此由調相方法得到調頻波時，需用一種線路將聲頻調變波電壓與調變頻率成反比，這個線路叫做『加重器』(Preemphasis) 或叫『均勻器』(Equalizer)。其線路情形，詳見第二章的 2—3 節。

純粹的調相波，因為其頻率偏度是無限制的，使頻率的波道很寬，在目前還是很大的缺點，所以應用不廣。

1—4 倍頻 (Frequency multiplication) 和混波 (Frequency changer)

於調幅中，一般應用上，慣採用末級 (Final stage) 調變。因在中間級調變，必須用特殊方式，始能使調變後的高頻波包絡線 (Envelope) 不失真。如用直線放大器雖不易失真，但放大工作很難調整，並且其屏極效應也低。所以要使發訊機效力優良，必須在末級調變。在調頻及調相中，輸出波振幅與調變無關，可以用 C 級放大器而不失真，所以調變裝置，放在任何中間級位置即可，然後經倍頻器及直線放大器放大。

為提高調頻波 (或調相波) 效力，而其失真現象減到最低程度，因此首先在調頻和調相的調變過程中，確實使調頻的頻率變化 (或調相的相位變化) 和聲頻調變波振幅成正比，就是他們之間成直線關係 (Linear relationship) 變化。但得到這個直線關係的變化是很有限的。如調頻時，在調變器所得到直線關係頻率偏度約在 10 KC 以內。調相時，約在一弧度角以內。例如調頻時，由調變器級輸出的頻率在 5MC 到 5,015MC 之間變化 (頻率偏度為 7.5 KC)，如果將此頻率加以倍頻二倍，則倍頻管的輸出頻率將在 10MC 到 10,030MC 之間變化。於是頻率變化範圍也從 15KC 倍增至 30

KC。

調頻波的輸出頻率變化範圍一般在80KC至160KC（即頻率偏度在40KC至80KC），所以由調變器級所得到的直線關係頻率偏度（10KC以內）需經多次倍頻而得到最後輸出所需要的頻率偏度。倍頻器的主要作用是爲了倍增調頻波的頻率偏度。既然在調頻設備中有倍頻器，因此載波頻率也將降低至附合輸出的較低頻率，使經倍頻後的頻率爲所需要的載波頻率。

在調頻和調相過程中，因其直線關係的頻率或相位變化範圍很有限，所用的聲頻調變波電力也同樣受限制，所以在調變過程中，此聲頻電力可以忽視。

同樣，調頻波通過『頻率倍減器』（Frequency divider）時，其效果和倍頻器相反，就是將頻率倍降，對於調頻波的頻率偏度也使其倍降。

由於上述，我們知道，調頻波的頻率變化範圍，同時也就是波帶的寬度，將因頻率倍增或倍減，而隨之增減。所以，頻率的變換，並不使調頻波的本質失真。

調頻波用外差法混合時，頻率譜所表現的調變指數，邊帶頻率的相互位置及波帶寬度（ $= 2 \times$ 頻率偏度）仍舊不變。

1—5 調頻、調相及調幅的聯帶關係

調頻或調相過程中，常發生不必要的調幅作用。同時如在振盪管屏極調幅時，其屏極電源電壓隨聲頻調變訊號而變化，並且因爲屏極的變動，或多或少影響頻率的變動，所以振盪器輸出雖然是調幅波，實際上也包含有調頻成分。這是普通無線電在振盪器級調幅的情形。

我們能用許多方法使調相與調幅結合。假設被調幅器或直線放大器（Linear amplifier）的儲能電路不確實調整到與載波諧振，則