調頻及其應用

蘇聯 И·С·高諾羅夫斯基 著

И. С. ГОНОРОВСКИЙ
ЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ
И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ
СВЯЗЬИЗДАТ МОСКВА 1948

內 容 提 要

本書首先對調頻的基本性質及概念作了一個總的敍述，其後依次敍述了調頻的擾度及調頻在各方面的應用。然後從原理方面介紹了調頻發信機及收信機的電路結構及其中各主要部分，如調頻器、調相器、限幅器、鑑頻器等。最後並對新近興起的脈衝調制中的主要問題亦作了簡明的說明。

書中對調頻器及調相器的理論以及頻率自動微調、調頻波的失眞等問題作了較細的分析。

調 頻 及 其 應 用

著　者：蘇聯 И. С. 高諾羅夫斯基
譯　者：陳德仁　黃緯祿　莫梧生　張梓昌　王汝龍　顏景秋　柳浦生　巫友仁
校　者：錢聖巳　鄭法成　柴人奇
出版者：人民郵電出版社　北京東四區6條胡同13號
印刷者：郵電部器材供應管理局南京印刷廠　南京太平路戶部街15號
發行者：新華書店

書號：無87　1956年6月南京第一版第一次印刷 1——4,800冊
850×1168 1/32　158頁　印張$9\frac{28}{32}$　字數225,000字　定價(10)1.70元
★北京市書刊出版業營業許可證出字第〇四八號★

目　　錄

第四章 調頻器

第五章 調相器

第六章 調頻發射機的綫路結構

第七章 調頻波的接收元件

第八章 調頻制系統中的頻率自動微調

第　一　章

已調波的性質

第一節　正弦波和已調波

隨時間按正弦律變化的任一電量（電壓、電流），其瞬時值可用下式表示；

$$a=A_0 sin\ \left(\frac{2\pi}{T_0}t+\Theta_0\right)=A_0 sin\psi\ ,\qquad (1.1)$$

式中　A_0——振幅，

T_0——$\frac{2\pi}{\omega_0}=\frac{1}{f_0}$——振盪週期，

Θ_0——初相角（當$t=0$時的相角）

ψ——在時間等於t時的相角。

A，T 和Θ的角註0表示所指的參數不隨時間而改變，也就是說這些參數的導數等於零：

$$\frac{dA_0}{dt}=0\ ,\qquad \frac{dT_0}{dt}=0\ ,\qquad \frac{d\Theta_0}{dt}=0$$

如果這些條件中有一個不能滿足，這個波就失去了正弦波的性質，因而不得不把它看成由許多或不多的簡單的正弦波組成的複合波。正弦波的數目和它們的振幅、相位決定於被強制着變化的參數㊀的選擇，也就是說它要看是振幅變化，還是週期或相位變化來決定；同時也與能決定其中某一個隨時間而變化的函數的性質有關。

㊀ 指隨着調制信號而變化的參數——譯者註。

照例，時間函數$A(t)$、$T(t)$或$\Theta(t)$的譜帶愈寬，則波的頻譜也愈寬。如果爲了傳送某一信號時，只有A、T、Θ中之一個參數被強制着變化，那末我們管它叫純調幅，純調頻或純調相。

在大多數實際情況下，我們所碰到的都是混合調制，例如，振幅——調相或振幅——調頻。但是，這時通常只有其中的一種調制方式是有用的，而另一種是和主調制同時產生的寄生調制；它是由於調制技術的不完善或已調波通過電路時產生頻譜的失眞所引起的。

暫且不管這些附加因素的影響，卽使在理想的一個量（振幅、頻率或相位）的純調制情況下，也不是經常能認爲其餘的量都是不變的。

波的頻率和相位間有着最密切的聯系。這一點是從下列的事實中得出的，因爲，由式（1.1）可以看出，合成波的相位是直接以頻率來表示的。調幅就有一些不同；在某些條件下已調波的頻率和相位可以認爲與調幅無關。

第二節 調幅波的性質

調幅理論的基本原理，大家都已經知道了，因此我們只限於研究調幅波的那些性質。淸楚地瞭解了這些性質以後，就能便於研究調頻波或調相波的性質。

假設波的振幅是按下式調制的

$$A(t)=A_0(1+M\cos\Omega t)$$

其中調制頻率Ω與載波頻率ω_0比起來是如此之小，以致於高頻波在一個週期內可以看作是正弦波。

於是式（1.1）可以寫成如下形式（可令$\Theta_0=0$，並不致妨礙此

結論的普遍性）：

$$a=A(t)\sin\omega_0 t=A_0(1+M\cos\Omega t)\sin\omega_0 t$$
$$=A_0[\sin\omega_0 t+M\cos\Omega t\sin\omega_0 t] \qquad (1.2)$$

利用簡單的三角變換，$M\cos\Omega t\ \sin\omega_0 t$的乘積可以變為

$$M\cos\Omega t\sin\omega_0 t=\frac{M}{2}\sin(\omega_0+\Omega)t+\frac{M}{2}\sin(\omega_0-\Omega)t \qquad (1.3)$$

由此得出a的展開式如下:

$$a=A_0\sin\omega_0 t+\frac{MA_0}{2}\sin(\omega_0+\Omega)t+\frac{MA_0}{2}\sin(\omega_0-\Omega)t \qquad (1.2')$$

頻率（$\omega_0+\Omega$）卽所謂已調波的上邊頻，而頻率（$\omega_0-\Omega$）為下邊頻。兩個邊頻的振幅是相等的，並是未調波（載波）振幅的$\frac{M}{2}$，而兩個邊頻的相位對載波的相位來講是對稱的，這個情況可用圓圖清晰地表示出來。

由交流理論我們可以知道，以固定角速度繞定點旋轉的矢徑在固定軸上的投影是按正弦律變化的。這樣，正弦載波 $a=A_0\sin\omega_0 t$ 在這圖上（1.1圖）可用長度為 $OA=A_0$，旋轉角速度為角頻率 ω_0 的矢量順時鐘旋轉來表示。如果我們以同樣的角速度，但以相反的方向旋轉矢量 OA 投影在其上的時間軸，那麼矢量 OA 便成為一個不動的綫段。任何其他的頻率相同而相位不同的波，$b=B_0\sin(\omega_0 t-\varphi)$ 同樣可用不動的矢量 OB 表示，它與OA之間有一個夾角φ，這φ角等於a、b兩波的相位差。

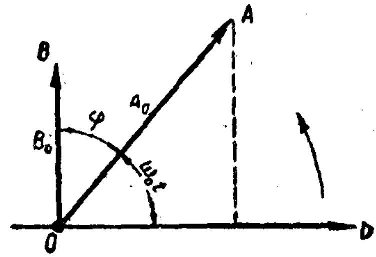

圖 1.1 正弦波的矢量圖。時間軸逆時針方向轉動，頻率相同而固定的矢量OA、OB是不動的

如果第二個波的頻率ω不等於ω_0，那麼代表這個波的矢量將以

$\omega-\omega_0$ 的速度旋轉。當 $\omega>\omega_0$ 時，矢量就朝順時鐘方向旋轉；當 $\omega<\omega_0$ 時則朝反時鐘方向旋轉。

這樣，在以頻率 ω_0 旋轉的圖上，上邊頻 $\omega_0+\Omega$ 和下邊頻 $\omega_0-\Omega$ 可用以角速度 Ω 朝相反方向旋轉的矢量 OC_1 和 OC_2 來代表（圖 1.2a）。

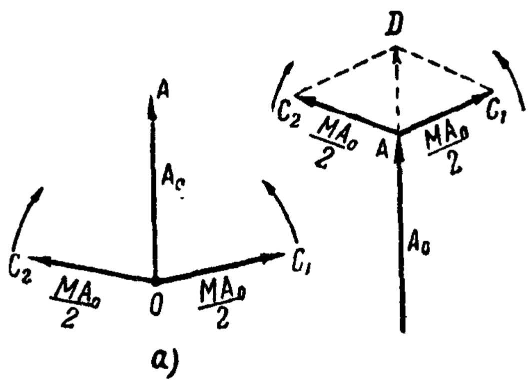

圖 1.2 純調幅的矢量圖

合成向量 AD 乃是 AC_1 及 AC_2 矢量的幾何和，一般稱之爲調制矢量，它總是和 OA 在一條直綫上（圖1.2$б$）。因此，這三個波卽載波和兩個邊頻之和，可以認爲是具有固定的相位和頻率而振幅被調制的波。如果兩個邊頻的振幅不完全相等，或它們的相位對載波相位不完全對稱，那麼代表合成波的矢量將繞 OA 擺動，也就是說，在這種情況下，調幅將陪隨着調相。

現在來談一下關於在純調幅情況下的包跡的相位問題。

如果 $\Omega t=0$ 時，兩個邊頻的矢量 AC_1 及 AC_2 的方向都是向上的（如圖1.3中 I 的位置），那麼這時包跡爲最大，其値等於 $A_0(1+M)$。這種情況相當於調制的初相位是 $90°$，而包跡的表示式是 $A(t)=A_0(1+M\cos\Omega t)$。

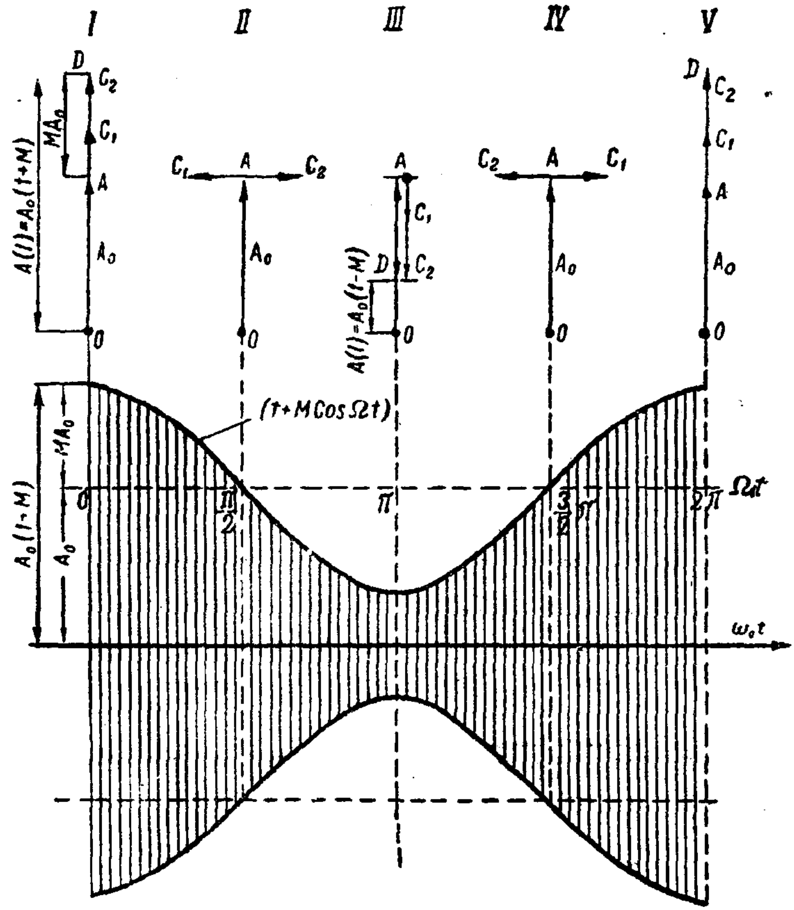

圖 1.3 調幅制中，包跡相位與邊頻相位間的關係

現在，如果我們令上邊頻（矢量AC_1）滯後 90°，而令下邊頻（AC_2）領前90°，那麼當$\Omega t=0$時，兩個邊頻的合成振幅等於零，包跡的初相位也等於零，也就是包跡滯後了 90°，其表示式將是$A_0(1+M\sin\Omega t)$。

這樣，當兩邊頻的相位對載波相位而言是對稱時，包跡的相移

就等於上邊頻的相移。

這種情況，對決定已調波在通過電路時信號所蒙受的相移有着重大的意義。

應用到無綫電通信問題上，以下兩個因素是值得注意的，即發射機發出的最大（巔值）功率和頻帶的寬度。其中第一個因素決定了發射設備的價值和大小，而第二個因素則決定在給定的頻率範圍內所能安置的通信路數。

調制時的最大功率P_{max}與未調制波（載波）功率 P_0 間之關係可由簡單的式子 $P_{max}=P_0(1+M)^2$ 來確定， 而頻帶的寬度則由上、下邊頻間的距離所決定。頻帶寬度顯然是等於 $2F_{max}$， 這裏F_{max}爲最高調制頻率。在現代調幅制的無綫電設備中，通常都力求達到$M=100\%$ 的調幅；這就是說， 在調制的巔值時，發射機所發出的瞬時功率應爲$P_{max}=4P_0$ 。

第三節 頻率變化與相位變化之間的關係

假設我們有兩個不同的正弦波，它們具有不同的，但是不變的ω_1及ω_2：

$$\left.\begin{aligned} a&=A_0\sin\omega_1 t\\ b&=B_0\sin\omega_2 t=B_0\sin(\omega_1 t+\Delta\omega t)\end{aligned}\right\}\quad(1.4)$$

其中 $\Delta\omega=\omega_2-\omega_1>0$

如果我們在圓圖上用矢量表示這兩個波，並使圓圖的時間軸的旋轉角速度等於其中任一個波的角頻率，譬如等於ω_1， 那麼代表a波的矢量OA，將固定不動，而矢量OB(相當於頻率$\omega_2>\omega_1$)將以等角速$\Delta\omega=\omega_2-\omega_1$，繞矢量$OA$，按順時鐘方向(其方向如圖1.4上的箭頭所示)旋轉。顯然OA和OB之間的相角將不斷增大，經過 t

秒後將達到$\Theta=\Delta\omega t$。

將Θ代入式（1.4），則得$b=B_0 sin\omega_2 t=B_0 sin\,(\omega_1 t+\Theta)$，因此我們可以把固定頻率爲$\omega_2$的波看作是頻率爲$\omega_1$（$<\omega_2$）的波，但它有一個隨時間而直綫增加的初相位$\Theta=\Delta\omega t$。

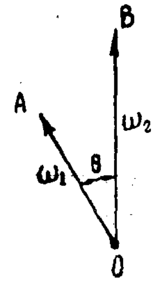

圖 1.4 兩個頻率不同的波的矢量圖

同樣的，我們可以把頻率爲ω_1的波看作是頻率爲ω_2($>\omega_1$)的波，但它的相位$\Theta=-\Delta\omega t$隨時間而減小。反過來，如果知道了在t秒內b波相位比a波領前Θ角，那末可以確定在這段時間內，頻率ω_2比ω_1大$\Delta\omega=\frac{\Theta}{t}$。

應當指出，相角Θ與頻率ω_2及ω_1的絕對值完全無關，而只決定於這兩個頻率之差，也就是頻率$\Delta\omega$的大小。關於ω_2或ω_1本身的大小在圖1.4的圓圖上沒有作任何的說明。

現在假設在t秒內b波的頻率沒有保持一定，也就是說差頻$\Delta\omega=\omega_2-\omega_1$是時間的函數。那末在求$t$瞬間的相移時，我們不能再把$\Delta\omega$乘以$t$來計算，而應該用積分式來求$\Theta$，卽

$$\Theta=\int_0^t \Delta\omega\,dt \tag{1.5}$$

反過來，如果在t瞬間時的相角等於Θ，那末這時的頻移，應該用相位對時間的導數來決定，卽

$$\Delta\omega=\frac{d\Theta}{dt} \tag{1.6}$$

在矢量等速旋動的特殊情况下，也就是當頻率差固定時（$\Delta\omega$=常數），式（1.5）就變成了$\Delta\omega t$的乘積，而式（1.6）變成$\frac{\Theta}{t}$。上面所得到的結果可總結如下:

頻率按某一規律$\omega(t)$隨時間的變化，相當於相位按規律$\Theta=$

$\int \omega(t)\,dt$的變化；而相位按規律$\Theta(t)$的變化，則相當於頻率按規律$\omega(t)=\frac{d\Theta}{dt}$的變化。

這個規律乃是調頻和調相的理論基礎，它完全決定了任何一個複雜波的頻率變化與相位變化之間的關係，並且說明了調頻波與調相波之間並沒有什麼實質上的區別。

我們把已得到的結論應用到週期調制中去。暫且先不確定調制

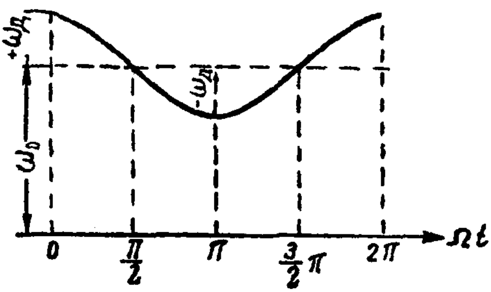

圖 1.5 正弦調頻時，瞬時頻率的變化
$\omega_Д$——頻移幅度
ω_0——載波頻率(中心頻率)

的方式，而假使振盪器的頻率是按下式變化（圖 1.5）的

$$\omega(t)=\omega_0+\omega_Д \cos \Omega t \qquad (1.7)$$

式中，$\omega_0=2\pi f_0$——中心頻率，

$\omega_Д=2\pi f_Д$——頻率偏移的幅度，為簡單起見，以後我們稱它為頻移幅度或簡稱頻移；

$\Omega=2\pi F$——調制頻率。

讓我們來研究一下，當時間為t時，波（電流或電壓）的相位是多少。

在未調制時，即在頻率$\omega=\omega_0$不變時，顯然由式（1.1）可得：

$$a=A_0\sin\Psi=A_0\sin\omega_0 t$$

即相位 $\psi=\omega_0 t$

如果頻率 ω 按式(1.7)變化，那麽按照式(1.5)，當時間爲 t 時，波的相位將等於

$$\psi=\int\omega(t)\,dt=\int[\omega_0+\omega_Д\cos\Omega t]dt=\omega_0 t+$$

$$+\frac{\omega_Д}{\Omega}\sin\Omega t+C\ ,$$

這裏積分常數 C 代表初相位 Θ_0。

於是 $\psi=\omega_0 t+\frac{\omega_Д}{\Omega}\sin\Omega t+\Theta_0$

代入式(1.1)得

$$a=A_0\sin\psi=A_0\sin[\omega_0 t+\frac{\omega_Д}{\Omega}\sin\Omega t+\Theta_0] \qquad (1.8)$$

因此，根據上述的頻率變化和相位變化之間的關係，以純音頻率 Ω 所實現的在 $\pm\omega_Д$ 之間的週期調頻，相當於以同一頻率實現的在 $\pm\frac{\omega_Д}{\Omega}$ 之間的週期調相。

比值

$$m=\frac{\omega_Д}{\Omega}=\frac{f_Д}{F} \qquad (1.9)$$

通常稱之爲調制係數，它是對相位中心位置而言的最大相移值，且是調相中的主要參數，與調幅制中的調幅係數 M 具有同樣的意義。還必須指出：這個調制係數與中心頻率(未調制調率) ω_0 無關，而只決定於頻移的大小和調制頻率。這在前面討論頻率變化與相位變化的關係時已經談到了。

現在假定振盪器所輸出的是一個具有穩定頻率 ω_0 的波，而它的相位受一個與振盪器無直接聯系的特種調制器控制，並按下式變化

$$\Theta=\Theta_{max}\sin\Omega t \tag{1.10}$$

式中，$\Omega=2\pi F$——調制的角頻率

而 Θ_{max}——相移幅度

於是調相器所輸出的波可寫成下式

$$a=A_0\sin(\omega_0 t+\Theta_{max}\sin\Omega t)$$

根據式（1.6）該波的瞬時頻率等於

$$\omega(t)=\frac{d\psi}{dt}=\frac{d(\omega_0 t+\Theta_{max}\sin\Omega t)}{dt}$$

$$=\omega_0+\Theta_{max}\Omega\cos\Omega t \tag{1.11}$$

因此，如果相位按頻率Ω在$\pm\Theta_{max}$之間變化，那麼我們可得另一波，其瞬時頻率按頻率Ω在$\pm\Theta_{max}\Omega$之間變化。

按式（1.9）的定義

$$m=\frac{\omega_д}{\Omega}=\Theta_{max}$$

故得瞬時頻率

$$\omega(t)=\omega_0+\omega_д\cos\Omega t$$

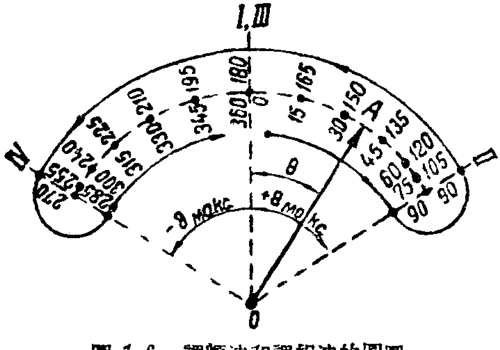

圖 1.6 調頻波和調相波的圓圖

矢量OA的位置：I和III表示在$\Omega t=0$和$180°$；$\Theta=0$，$\Delta\omega=\omega_д$

矢量OA的位置：II和IV表示在$\Omega t=90°$和$270°$；$\Theta=\pm\Theta_{max}$，$\Delta\omega=0$

小圓點表示矢量OA在$\Omega t=0°$，$15°$，$30°$等時的位置。

這樣，用純音調制時不可能從波的性質和它的特點得出任何結論，肯定我們所用的是調頻還是調相。在這兩種情況下，在矢量圖中所畫的已調波的矢量圍繞其原始位置這樣擺動：卽角Θ（圖1.6）隨時間按下式變化

調相時，$\Theta=\Theta_{max}\sin\Omega t$

和調頻時，$\Theta=\frac{\omega_{Д}}{\Omega}\sin\Omega t=\Theta_{max}\sin\Omega t$

第四節 調頻和調相

從圖17和18，很容易了解調頻和調相之間的區別。圖上畫有這兩種調制方式的調制特性曲綫。

在第一種情況下（圖1.7），一定的頻率與調制電壓的每一個定值E相當；在第二種情況下（圖1.8）一定的相位與調制電壓的每一個定值E相當，並且當電壓E不變時ω或Θ的值也不變。換句話說，只有當調制電壓直接控制頻率（圖1.7）或相位(圖1.8)時，才能以靜態的方法畫出上述的調制特性曲綫。

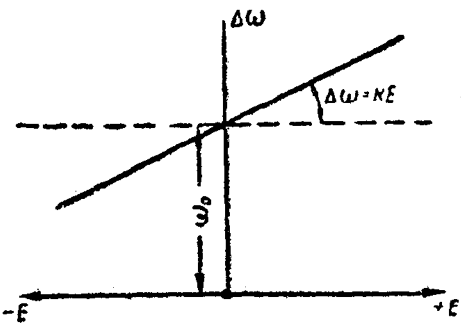

圖 1.7 調頻的靜態調制特性曲綫

同時，如以同樣的純音用上述兩種方法調制時可得到性質完全一樣的兩個波（調制係數m相同時）。

因此，調頻器應當保證頻率偏移，而調相器則應保證相位偏移；偏移僅與調制電壓的大小（振幅）成正比，而與這個電壓的頻