

无线电广播中的 调频技术

苏联 C. B. 諾瓦科夫斯基 著
Г. П. 薩莫依洛夫

人民邮电出版社

С.В.НОВАКОВСКИЙ и Г.П.САМОЙЛОВ

ТЕХНИКА

ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ

В РАДИОВЕЩАНИИ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1952

內 容 提 要

本書較詳細地研究了調頻的基本原理：調頻信號的特性，獲得調頻信號的方法，調頻信號發射機和接收機的綫路以及調頻信號的傳播等；此外還適當地敘述了調頻發射機和接收機的構造以及它們的調諧方法。

无綫电广播中的調頻技术

著 者： 苏联 С. В. 諾 瓦 科 夫 斯 基

Г. П. 薩 莫 依 洛 夫

譯 者： 朱 慶 璋 梅 國 修

校 者： 高 煜 傅 維 譚

出 版 者： 人 民 郵 電 出 版 社

北京東四區6條胡同13號

印 刷 者： 人 民 郵 電 出 版 社 南 京 印 刷 廠

南京太平路戶部街15號

發 行 者： 新 華 書 店

1957年7月南京第一次第一版印刷 1—1,772冊

787×1092 1/32 171頁 印張 $10\frac{2}{3}$ 插頁1 印刷字數246千字 定價(10)1.80元

★北京市書刊出版業營業許可証出字第〇四八號★

統一書號：15045·總637-無147

前 言

目前，为了在无线电接收机中获得高度的语言和音乐的保真，在超短波波段内，广泛地应用了调频的无线电发送方法。这种调频方法与调幅相比较，可以显著地减低工业干扰、天电干扰、接收机的固有噪声和来自邻近无线电台的干扰对无线电接收的有害影响，并且也可以改进如机件中的非直线性失真和工作稳定度等各项指标。

采用超短波波段来进行无线电广播，与长波、中波和短波广播相比较，同样具有很大的优点。这些优点是：1)大气干扰的电平较低；2)在一个地区内可以装设工作于同一频率或邻近频率的许多电台，只要这些电台相隔足够远时，在它们之间就没有互相干扰的危险；3)每一电台可以分配到宽的频带（200—250千赫）。这样，可以a)使调频的宽频带通过整个传输波道；б)设计宽通带接收机而不须采用特殊的方法来改善接收机本机振荡器的稳定度。

上面所指出的，可在一个地区内装设工作于同一频率或邻近频率的许多超短波电台，只要这些电台相隔足够远时，在它们之间就没有互相干扰危险，这是由于超短波发射机的有效距离只局限于较近的范围的缘故（100—150公里）。因此，不用波长较长的波段，要想将广播节目播送到远处，必需建立特殊的超短波无线电中继线路。这种中继线路，目前已得到实际应用。

调频的第一次运用，开始于1932—1933年间，其效果很好（调频缩写为FM，调幅缩写为AM）。此后，我国科学家和专家（Б.А. 符维斯基、А.Г. 阿速别尔格、В.А. 斯米尔诺夫、И.Г. 高诺罗夫

斯基、B.И. 斯福罗夫、B.Б. 別斯特利柯夫) 的實驗工作和理論研究以及現有的調頻無線電廣播的經驗指出：與調幅相比較，採用調頻可以顯著地增大超短波發射機的有效距離。原因是只要有效信號比干擾大 9 倍時，調頻接收機的收信就十分令人滿意；而在利用調幅時，有效信號需等於干擾的 100 倍時，才能得到相同的收信質量。

當在調頻接收機中採用特殊的電路(用寬頻帶多級限幅器)後，甚至信號高於干擾的倍數再低一些時，仍然可以得到滿意的收信。所以，利用調頻的時候，接收機輸入端的信號可以比較弱一些，因而就增大了傳播的距離。業已證明：當各項收信條件相同時，在接收機輸出端所得到的信號噪聲比，調頻比調幅要大，其平均值等於 20—30 分貝。

長期以來，都認為調頻接收機比調幅接收機複雜，價格也比調幅接收機要高，但是，現在調頻收信技術已經發展到使調頻接收機在價格和複雜程度方面都接近於調幅接收機了。調頻的發射設備在各方面都比調幅的發射設備要簡單，運用也較方便（調頻器是低功率的設備，調頻時放大級的工作狀態是不變的）。

由於上述理由，調頻不僅被用於無線電廣播，並且也被用於播送電視的配音。現在已經研究出一種電視接收機綫路，其中，利用影像和聲音的載波頻率檢波後的差拍來達到接收配音的目的。這些差拍的頻率等於兩載波頻率之差，而當利用調頻法來播送聲音時，這些差拍也是調頻的。這種綫路與用調幅方法來播送聲音的情況相比較，顯著地簡化了電視接收機的構造。

由於調頻的廣播和電視配音的發展，就需要有研究這些問題的技術參考書，供給各種專業工作人員及無線電愛好者使用。

作者不擬將這本書寫成教科書的形式。這本書的目的是向廣大的無線電專業人員和熟練的無線電愛好者介紹調頻設備的原理和基

本电路。本書以相当通俗的形式研究了調頻信号的特性、得到調頻信号的方法、調頻信号發射机和接收机的綫路。除此以外，作者在这本書中还适当地敘述了調頻接收机和业余調頻發射机的調諧方法，以及它們的構造。

書末附有附錄，是供有一定基礎的讀者可以把本書各章中所敘述的个别問題，了解得更詳細一些。

第1、2、3、4章和附錄II—1、II—2、II—3是C.B.諾瓦可夫斯基寫的，第5、6、7章是Г.П.桑莫依罗夫所作。

A.A.古里可夫斯基在閱讀原稿时提出了很多宝貴的指示，作者謹向他表示謝忱。

作者热望讀者提出关于这本書中材料敘述方面的意見和希望。

作 者

目 录

前言

第一章 調幅、調相和調頻的比較

第一節 調幅(AM)	(4)
第二節 調相(PM)	(8)
第三節 調頻(FM)	(14)

第二章 調頻的特性

第一節 調頻信号的頻譜	(21)
第二節 調制指數	(27)
第三節 頻率偏移与相位偏移之間的关系	(34)
第四節 接收調頻信号时的干擾抑制	(42)
第五節 調頻發射机中的預失真	(68)

第三章 調頻信号的獲得

第一節 調頻發射机的方框圖	(72)
第二節 从調相獲得調頻	(90)
第三節 直接獲得調頻	(118)
第四節 窄頻帶調頻的獲得	(148)
第五節 业余調頻發射机的構造	(157)
第六節 中心頻率自动控制	(176)
第七節 調頻广播發射机的質量指标	(200)

第四章 調頻信号的傳播特性

第一節 超短波的傳播	(203)
第二節 調頻超短波电台的服务区域	(207)
第三節 接收調頻信号的地点的場强計算	(209)

第五章 調頻信号接收机

第一節 接收机的一般參量	(214)
接收机的灵敏度	(214)
接收机的選擇性	(215)
声音的保真質量	(216)
第二節 調頻信号接收机的元件	(218)
限幅器	(219)
鑑頻器	(227)
分数律檢波器	(238)
外差檢波器	(244)
各种調頻檢波器綫路的比較	(249)
第三節 調頻接收机的高频部分	(251)
噪声	(251)
輸入設備和射頻放大器	(252)
变频器	(253)
本机振盪器与混頻器的耦合	(255)
本机振盪器的頻率穩定度	(257)
中頻放大器	(260)

第六章 調頻接收机的調諧

第一節 用直流仪表調諧調頻接收机的方法	(266)
鑑頻器的調諧	(266)
限幅器的調諧	(268)
中頻放大器的調諧	(270)
射頻放大器和本机振盪器的調諧	(272)
分数律檢波器的調諧	(274)
外差檢波器的調諧	(277)
第二節 利用示波器調諧調頻接收机的方法	(278)

应用示波器調諧时的相位調整.....	(279)
調頻檢波器 S 曲綫的檢查.....	(280)
利用示波器調諧鑑頻器.....	(282)
利用示波器調諧中頻放大器.....	(283)
利用示波器調諧有限幅器和鑑頻器的接收机的射頻放大器和 本机振盪器.....	(284)
利用示波器調諧分数律檢波器.....	(284)
利用示波器調諧有分数律檢波器的接收机的射頻放大器和本 机振盪器.....	(286)
利用示波器調諧有外差檢波器的接收机.....	(286)
頻率指示器的应用.....	(288)

第七章 調頻接收机的綫路和構造

第一節 調頻广播接收机.....	(291)
第二節 接在調幅接收机上的接收調頻信号的附加設備.....	(294)
超外差的附加設備.....	(295)
超外差和超再生的附加設備.....	(302)
第三節 电视的配音波道.....	(305)
超外差綫路的电视接收机.....	(305)
高放式綫路的电视接收机.....	(310)

附錄一 調頻信号的数学演算.....	(314)
--------------------	---------

附錄二 差拍理論的簡述.....	(317)
------------------	---------

附錄三 柵極接地电抗管电路工作的研究.....	(322)
-------------------------	---------

參考資料.....	(331)
-----------	---------

第一章 調幅、調相和調頻的比較

現在，調頻在無線電廣播（利用超短波）、電視和無線電通信中（發送語言、電報符號和靜止圖象），都得到了廣泛的應用。

大家知道，相當於人們的語言、音樂、電報符號或電視脈衝的電信號是不能直接用無線電傳播到遠方。這種傳播必須利用頻率要比相應的語言或音樂的電信號的頻率高很多的電磁波。為此目的，高頻振盪必須在適當的電路中按照語言或音樂的電信號進行某種改變（例如改變其振幅）。把高頻振盪和被發射的電磁波按照低頻信號改變的過程，稱為調制。需要發送的低頻信號稱為調制信號，本身已按調制信號改變並把調制信號載送到空間去的電磁波稱為已調制的射頻電波或已調制的無線電信號。未調制的電磁波，稱為載波。

穩定的載波就是電磁振盪，它的特性可以用三個參數，即振幅、頻率和相位來表示。調制就是高頻振盪的三個參數中的一個按照調制信號而改變的過程。

當接收已調制的無線電信號時，在以適當方法裝成的接收機的輸出端便產生了有用的低頻信號，這些信號和發射機中調制載波的信號相似。

射頻載波多半具有正弦或余弦的（即諧和的）性質。余弦振盪的形式如圖 1—1 所示。

我們知道，諧變數的最大變化值（由零至最大值）稱為振幅。振盪重複一次所需的時間稱為振盪的周期。一秒鐘內的周期數（即全振盪的數目）稱為振盪的頻率，以赫表示。

要比較兩個諧和振盪間的關係時，必須引用振盪相位的概念。

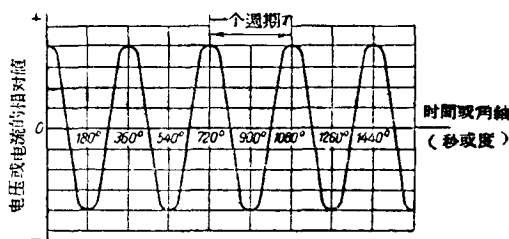


圖 1—1 余弦振盪的圖形

讓我們來看一下圖 1—2；并用一个旋轉半徑（矢量）來研究正弦振盪的本質。正弦振盪就是当半徑 R 繞圓心 O 旋轉時，垂邊 AB 的大小与角 θ 的关系。此時點 A 是沿着圖 1—2 所示的圓周運動的。

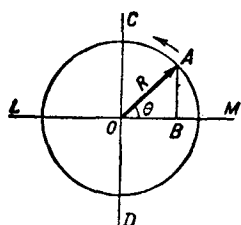


圖 1—2 用半徑 R 的旋轉
來表示正弦振盪的圖形
($AB = OA \sin \theta$)

顯然，半徑 R 每轉過 360° 后， OA 就回到原來的位置。

当 $R = 1$ 時，垂邊 AB 的大小等于角 θ 的正弦；而垂邊 OB 的大小則等于角 θ 的余弦：

$$AB = R \sin \theta, \quad (1-1)$$

$$OB = R \cos \theta. \quad (1-2)$$

這樣一來，当半徑 R 等速旋轉時，三角形的垂邊 AB 及 OB 就隨着時間按正弦及余弦的規律而變化，亦即做諧和振盪。

在某瞬間，振盪變量變化的大小和方向，称为振盪的相位。顯見，振盪的相位決定于半徑 R 的位置，這個位置由角 θ 而定。

因為垂邊 AB 和 OB 是互相垂直的，所以正弦振盪与余弦振盪（它們的頻率是相同的）間的相位差為 90° 。

角 θ 的大小等于 $2\pi ft$ ，式中 $\pi = 3.14$ ， f 是振盪的頻率， t 是与角 θ 相應的瞬間（振盪在 $t = 0$ 時開始）。 $2\pi f$ 表示矢量 R 的旋轉速度，称为角頻率或回轉頻率，并以 ω 表示，因此 $\omega = 2\pi f$ 。

ωt 的大小改变了 360° 时，就相当于一个振盪周期。

圖1—3, *a* 和 1—3, *b* 表示了两个振盪 (圖1—3, *a* 是正弦振盪, 圖1—3, *b* 是余弦振盪)。通常認為圖1—3, *b* 所示的振盪比圖1—3, *a* 所

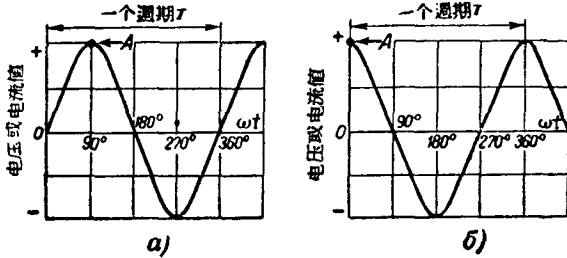


圖 1—3 具有不同相位的两个正弦振盪的圖形。振盪 *b* 比振盪 *a* 超前 90°

示的振盪在相位上超前 90° ，因为圖1—3, *a* 中的振盪比圖1—3, *b* 的迟 $\omega t = 90^\circ$ 达到最大值 (*A* 点)。所以在这个圖中两个振盪間的相位差等于 90° 。

因为正弦振盪和余弦振盪具有相同的形状，而它們的区别就在于起始相位 (在 $\omega t = 0$ 时的相位) 的不同；因此可以說，余弦振盪就是起始相位为 90° 的正弦振盪。

圖 1—4 表示这两个振盪的矢量圖。圖中，矢量 *A* 的長度是正弦曲線的振幅。在圖 1—2 中已經指明矢量 *A* 是以反时針方向旋轉的。現在我們可以想象 *aa* 軸是以角速度 ω 按順时針方向旋轉，而把矢量 *A* 看作不动，那末，矢量 *A* 在 *aa* 軸上的投影將等于 $A \cos \theta$ ，此处 $\theta = \omega t$ 。由 *aa* 軸起算的 θ 角，是振盪的相位。在圖 1—4 中，振盪 *A* (矢量 *A*) 就比振盪 *B* (矢量 *B*) 超前了 90° 。

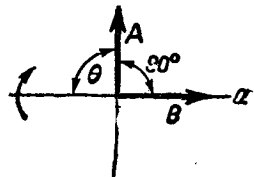


圖 1—4 正弦振盪的矢量圖

正弦曲線的相位是不断地逐漸改变着 (因为在圖1—2中的半徑 *R* 是在不断地旋轉，而角 θ 在振盪持續時間內是不断地增大的)。因

此振盪的特性可以用它的相位随時間而改变的規律來表示。相位随時間的变化，可以有不同的特征。举例來說，相位可以均匀地改变，亦即相位永远以等速增大。有时相位可以加速或減速增大。也可能有这样的振盪，它的相位的增長速度是振盪性的（即相位的增長速度对某一平均速度來說有时是加速，有时是減速的）。

有时，频率和相位是相依变量。当嚴格分析振盪的性質时，应把振盪频率理解为振盪相位随時間而变化的速度。如果相位是均匀地改变的，也就是說，相位改变的速度保持不变时，那末频率就是常数。在这情况下，是正弦形的振盪（相位 $\theta = \omega_0 t$ ，此处 ω_0 是振盪的角频率，它是一个常数）。

如果相位不是均匀地改变时，也就是說，相位改变的速度不是永远保持不变时，那末振盪频率也就不是常数了。在这情况下，就說振盪的瞬时频率，所謂瞬时频率，就是每一給定的瞬間，振盪频率的数值。

如果在調制时，只改变射頻振盪的振幅，而不改变它的频率和相位，那末这种調制就称为調幅（AM）。

如果調制的目的是改变射頻振盪的频率，而不改变它的振幅时，那末这种調制就称为調頻（FM）。

如果在調制时，是控制射頻振盪的相位，那末这种調制就称为調相（PM）。

第一節 調幅（AM）

在調幅的时候，調制信号交替地改变射頻振盪（电波）的振幅，时而增大时而减小。振幅改变的频率等于調制信号的频率。在对称調制情况下，振盪振幅对它本身的平均值來說，增大和減小的数值

是相同的。

無線電波振幅改變的程度（深度）應該與調制信號的振幅成比例。

如果調制信號的振幅過大時，那就發生了“過調制”。在這情況下，接收機輸出端所產生的信號就不與調制信號相似，而為另一種形狀的失真信號所代替。

在對稱調制時，如果射頻振盪的最大振幅等於未調制時射頻振盪振幅的兩倍，而已調制射頻振盪的最小振幅等於零時，那末調制度（程度）便等於 100%。

當振幅的改變較為微弱時，調制度就低於 100%。

圖 1—5 表示調制度為 50% 的調制情況。這時，已調波的最大振幅僅為未調波振幅的 1.5 倍。

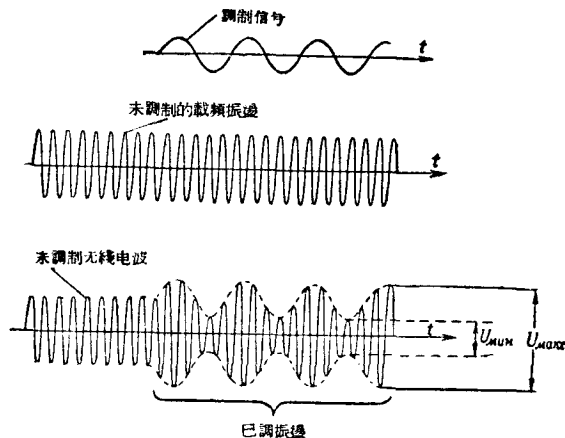


圖 1—5 調幅無線電波

如果量出了圖 1—5 中的 U_{max} 和 U_{min} 的數值，就可以按下面的公式計算出以百分數表示的調制度 m ：

$$m\% = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{max}} + U_{\text{min}}} \times 100\% \quad (1-3)$$

用示波器觀察已調波時，可以直接量出以公厘表示的 U_{max} 和 U_{min} 的大小。

舉例來說，如果 U_{max} 為 100 公厘，而 U_{min} 為 40 公厘，那末

$$m\% = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{max}} + U_{\text{min}}} \times 100\% = \frac{100 - 40}{100 + 40} \times 100\% = \frac{60}{140} \times 100\% = 43\%。$$

在這裡我們不再更詳細地研究調幅波了。我們僅僅指出調幅波的基本特性：

1) 調幅波的振幅是按照調制信號的波形和頻率而改變的。

2) 如果調制信號是頻率為 F 的正弦信號，那末調幅波是三個未調的純正弦波之和：頻率為 f_0 的載波和兩個另外的波，其頻率等於載波頻率 f_0 與調制信號頻率 F 之和及差，即為 $f_0 + F$ 和 $f_0 - F$ 。

和頻 $f_0 + F$ 的振盪稱為上邊波，差頻 $f_0 - F$ 的振盪稱為下邊波。由分解複雜的已調波而得到的三個純正弦波的這種組合，稱為已調波的頻譜。

如果調制信號本身就是若干個不同的正弦波之和（複雜的信號），那末邊波（和頻及差頻）的數目就增加了。調制波中的每一

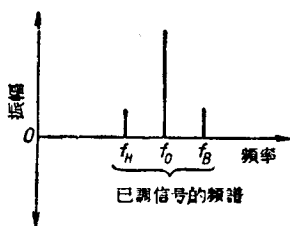


圖 1-6 調幅無線電波的頻譜成分

一個正弦波將產生自己的邊波（和頻及差頻）。語言和音樂正是這種複雜的調制信號。

當用單純的諧和信號調幅時，無線電波頻譜的成分如圖 1-6 所示，圖中載波的頻率為 f_0 ，調制信號的頻率為 F 。上邊波的頻率

$$f_s = f_0 + F; \quad (1-4)$$

下边波的頻率

$$f_n = f_0 - F. \quad (1-5)$$

举例來說，如果載波頻率 $f_0 = 2000$ 千赫，而調制信号的頻率（調制頻率） $F = 10$ 千赫，那末上边波的頻率（上边頻） $f_s = f_0 + F = 2000 + 10 = 2010$ 千赫；下边波的頻率（下边頻） $f_n = f_0 - F = 2000 - 10 = 1990$ 千赫。这样一來，調幅无綫电波就佔了从 f_n 至 f_s 的一段頻帶。在我們所举的例子中，这段頻帶就是 $2010 - 1990 = 20$ 千赫。为了使收信不失真起見，必須要保證接收載波和兩边波时，使它們的振幅比不要失真。应当指出，当用簡單信号 100% 調制时，兩边波的振幅应等于載波振幅的一半；当用簡單信号 50% 調制时，兩边波的振幅須等于載波振幅的四分之一，余此类推。

因此，在 100% 調制时，由載波所載送的功率要等于由兩边波所載送的功率的兩倍。

当將調幅波檢波时，在接收机中只利用了兩边波（其頻率為 $f_n = f_0 - F$ 和 $f_s = f_0 + F$ ，由調制頻率 F 而定）的功率。因此，在 100% 調幅时，全部發射功率僅有一半被用來恢复調制信号。在 50% 調幅时，全部功率僅有 $\frac{1}{8}$ 被利用。因而，从利用發射功率的观点來看，調幅并不是很好的調制方法。除此以外，調幅还有下述的主要缺点：來自自然界的干擾和工業干擾，除了在接收机中引起其他各种形式的失真之外，同时，还会引起進入到接收机中的无綫电波的振幅变化。而且，普通調幅接收机正好是对接收到的无綫电波的振幅变化起反应，所以，在普通調幅接收机中要避免干擾是非常困难的。因为所有削弱干擾作用的办法同时也削弱了信号本身的作用。为了改善調幅收信的质量，只好利用較高的頻率范围（在这范围里干擾較小）；采用專門的电路以抑制特別強烈的干擾；在工業干擾源方面

抑制工業干擾，以及提高發射機的功率等方法來達到。

從避免干擾的觀點來看，要採用更有利的調制方法，例如採用調相（ ΦM ）和調頻（ ΨM ），才是比較根本防止干擾的方法。

調相或調頻的無線電波，其振幅是不變的，因此可把接收機做成幾乎完全不感受因接收信號振幅變化所產生的干擾，這就顯著地減小了干擾在收信時的有害作用，那是具有非常重大的意義的。

第二節 調相（ ΦM ）

在調相的時候，調制信號使無線電波的瞬時相位與未調制時的相位 $\theta = \omega_0 t$ 相比較產生了變化。瞬時相位變化的大小與調制信號的大小成正比，而與調制信號的頻率無關。無線電波的振幅在調相時是保持不變的。

現在，讓我們回憶一下，怎樣用矢量來描述振盪的。

圖1—7, a所表示的，是具有不同振幅和不同起始相位的兩條正弦曲線。曲線1的振幅大於曲線2的振幅；同時曲線1的相位比曲

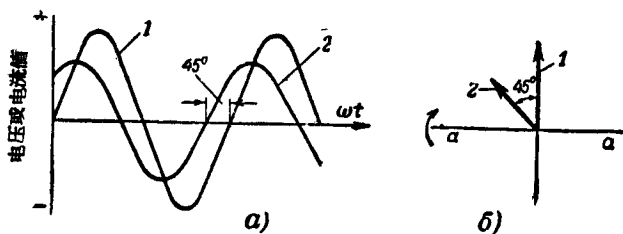


圖 1—7 相位差為 45° 的兩個正弦振盪的圖形（振盪2比振盪1超前 45° ）和它的矢量圖

線2滯後 45° （曲線2比曲線1提前 45° 達到最大值，亦即這兩條曲線間的相位差等於 45° ）。圖1—7, b就是這兩個振盪的矢量圖。其中畫出了兩個矢量以及繞O點按順時針方向旋轉的 aa 軸。

矢量 1 和 2 間的夾角相當於兩曲綫間的相位差。

調相時，信號的相位發生了變化。在圖 1—8 中矢量 A 是未調制的無線電波的載波矢量，而 aa 軸仍然以角速度 ω_0 繞 O 點按順時針方向而旋轉，因此未調制時的相位角 $\theta = \omega_0 t$ 。如果調制信號使相位角發生變化時，那末在調制時無線電波矢量（載波矢量）的相位擺動於 C 和 D 之間。此時，由於 aa 軸以不變的角速度 ω_0 等速旋轉以及因矢量 A 的擺動使相位角 θ 發生改變。調制信號先使矢量 A 偏向於使 θ 減小的一面，當它到達最大偏轉後，調制信號使矢量 A 回到原來位置；然後使矢量 A 偏向於使 θ 增大的一面，俟達到最大偏轉後，它又使矢量 A 返回到原來位置，矢量 A 的一個擺動周期，到此結束。離開未調制時 $\omega_0 t$ 的最大相位偏轉稱為最大相位偏移，以 $\Delta\theta_{max}$ 表示。如果相位偏移超過了 360° 時，那就意味着矢量 A 向着使 θ 減小的一面偏轉，當超過了一個整周而達極端位置後，才開始以反方向旋轉回到原來位置；然後矢量 A 又作同樣大小的偏轉，但方向相反，亦即向着使 θ 增大的一面偏轉，最後又返回到原來位置。

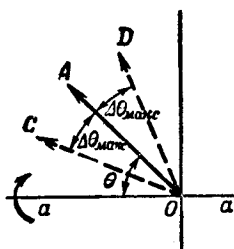


圖 1—8 起始相位 $\theta = 45^\circ$ 的調相波矢量圖

所以，在調相的時候，矢量 A 在平均位置附近發生了往復的“擺動”。同時據以計算相位角 θ 的 aa 軸則以角速度 ω_0 按順時針方向均勻地旋轉着。

前面我們已經指出，無線電波在每一個瞬間的頻率正是在給定瞬間無線電波的相位 θ 隨時間而改變的速度。因此，如果信號的相位隨時間改變的速度是一定時（亦即相位是均勻地改變時，例如 $\theta = \omega_0 t$ ，其中 ω_0 是常數），那末這種信號的瞬時頻率也是保持固定的（當 $\theta = \omega_0 t$ 時，瞬時頻率 $f_{\text{瞬}} = \frac{\omega_0}{2\pi}$ ）。假若矢量在一定的位置