

波 分 公

苏联 A. C. 普列斯曼 著

梁春宜 葉傑梁 譯

人 民 郵 電 出 版 社

А. С. ПРЕСМАН
САНТИМЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1954

內 容 提 要

本書簡要地敘述了公分波發生、傳輸和發射的基本物理原理，介紹了各種公分波測量儀器和測量方法，最後介紹了公分波在科學技術中的應用。

本書適合於具有中等數學知識，大致了解一般無線電原理的無線電愛好者閱讀。

公 分 波

著 者:	蘇聯 A. C. 普 列 斯 曼
譯 者:	梁 春 宜 葉 德 保
校 訂 者:	龔 正 毅 趙 辰
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

★北京市書刊出版業營業許可証出字第〇四八號★
787×1092 1/32 65 頁 印張 $4\frac{2}{3}$ 印刷字數 84,000 字
1957 年 5 月南京第一版第一次印刷 1— 3,769 冊
統一書號: 15045· 總 607—無 72 定價 (10) 0.65 元

前 言

无綫电技术发展的特征是掌握波長愈來愈短的波：繼長波之后獲得实际应用的首先是短波，然后是超短波，最后則是公分波。其中每一个波段都有其自己的特点。例如，由于短波能从大气电离層反射回來，故利用短波可以借小功率發射机進行远距离无綫电通信，超短波的应用使电视的發送成为可能，并保證了定向的无綫电通信。而应用公分波使我們得以發展雷达和許多新的科学技术部門。

公分波具有一系列的特点，因此，为了研究它們，需要大大擴展甚至常常需要修改許多習慣的关于无綫电技术的概念。

在本書中，对有关公分波的基本物理概念，对獲得和測量公分波的基本技术以及公分波在各个不同科学技术部門中的某些应用，均將予以总的輪廓的描述。

了解无綫电技术的一般原理并具有中学程度数学知識的讀者，均可閱讀本書。

作者謹預先向對本書提出意見和期望的讀者表示衷心的謝意。

А. 普列斯曼

5301130

目

錄

前 言

第一章 電磁場和電磁波

電場和磁場.....	(1)
電磁波.....	(3)
電磁波頻譜中的公分波.....	(6)

第二章 公分波發生器

振盪回路變成了空腔諧振器.....	(8)
電子流將電池能量“灌入”回路.....	(12)
電子飛行得太慢了.....	(15)
電子的飛越時間成為有好處的了.....	(17)
電子管發生器.....	(20)
用磁場來控制電子流.....	(23)
磁控管維持了回路中的振盪.....	(26)
多腔磁控管.....	(28)
行波管.....	(34)

第三章 電磁波傳輸線路

電磁能是怎樣沿導線傳送的.....	(37)
電磁波沿傳輸線路的傳播.....	(40)
雙線線路的波阻抗.....	(43)
線路中的反射波和駐波.....	(46)
負載阻抗和發生器的匹配.....	(52)
電磁能是怎樣消耗在線路中的.....	(54)

第四章 公分波傳輸線路

媒介質的電特性和磁特性.....	(57)
------------------	--------

電磁波自一媒介質進入另

一媒介質時的反射情況 (60)
同軸線..... (62)
用導管輸送電磁能..... (64)
在波導管中可以傳播各種不同類型的波..... (68)
波在波導管中的波長長于在自由空間中的波長 (71)
波導管和同軸線的比較..... (76)
消除同軸線和波導管中的反射..... (78)

第五章 輻射器

雙線線路變為天線.....	(82)
公分波輻射器.....	(85)
無線電集射器.....	(88)
無線電透鏡.....	(90)

第六章 公分波的測量

如何測查特高頻能量的存在.....	(92)
反射的測量.....	(94)
波長的測量.....	(100)
功率的測量.....	(103)

第七章 公分波的应用

雷達.....	(109)
雷達地形圖.....	(115)
公分波在無線電通信中的應用.....	(117)
利用公分波研究物質的分子.....	(121)
公分波和超導電性.....	(123)
公分波能應用於醫療方面.....	(123)
參考書籍.....	(126)

第一章

电磁場和电磁波

在开始介紹公分波的物理基礎和公分波技術以前，首先需要談一談关于电磁場和电磁波的基本概念。

电場和磁場

在帶电体周圍的空間中作用着一种电力，也就是說，在帶电体的周圍存在着**电場**，此电場通过它对处于此場中的另一电荷的作用而顯示出來。在电場的作用下，电荷能沿着某一路綫移动，这些电荷移动的路綫就叫**电力綫**。

电場由电荷向各个方向伸展到无限远处。空間任何一点上电場的大小由电場作用在置于該点的單位电荷上的力——**电場强度E**來决定。我們把正电荷在电場作用下运动的方向定为电場的方向。电荷的电量愈大，空間各点的电場强度也就愈大。电場强度随着与电荷的远离而很快的减小。

当电荷的大小变化时，此电荷所產生的电場也跟着变化。可是这种变化并非在空間所有各点都能立刻發生，而是从电荷以速度 v_0 向各个方向傳播出去的。速度 v_0 与电場在其中傳播的介質的介电系数 ϵ 有关，

$$v_0 = \frac{C}{\sqrt{\epsilon}},$$

其中 C 为光綫在宇宙空間內（实际上也可以說是在空气內）的

傳播速度，其大小等于300,000公里/秒。

运动电荷在空間内也会產生磁力，即建立起**磁場**。

磁場的存在可以通过它对置于磁場中的磁針的作用顯示出來。磁針在磁場中的指向总是沿着所謂**磁力綫**的方向。

空間中任意一点处磁場的大小由磁場作用在置于該点的單位磁荷上的力——**磁場强度** H 來表示。

假如电荷量变化时，則空間中的磁場强度也發生变化。这种变化是以速度 v_m 傳播的。速度 v_m 与磁場在其中傳播的介質的導磁系数 μ 有关，

$$v_m = \frac{C}{\sqrt{\mu}}.$$

電場和磁場相互之間存在着密切的联系。磁場不僅能在运动电荷的周圍產生。空間某一点处電場的任何变化都会使該点在同一瞬間出現变化的磁場；而任意一点处磁場的变化也会使該点在同一瞬間出現变化的電場。由此看來，在空間可以產生**电磁場**。而在空間任意一点出現这种場的作用要延迟一个時間，即电磁場的作用傳播到此点所需的時間。

电磁場傳播的速度与介質的电磁性質有关：

$$v = \frac{C}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

在空气中， $\epsilon = \mu = 1$ ，电磁場以光速傳播。

如果在空間某处有电荷在周期性地变化着（电荷振动），則將由电荷向各个方向傳播周期性变化着的电磁場或**电磁波**。

現在來談一下电磁波的几个基本特征。

电 磁 波

如果在导体中有交流电流通过，则在导体周围将相应地产生出互有联系的变化着的电场和磁场，即电磁场。这种电磁场将以波的形式在空间中由一点至另一点地传播开来。为了说明这个过程，我们首先看一下电磁波中的电场是怎样传播的。假设导体附近的电场强度随时间按正弦规律变化（图1），由图可以看出，电场变化的状态，或者说，它的相位是由变化过程开始后所经过的一段时

间来决定的。假设 E 由零值开始变化，到时间 t_1 电场强度增至极大值 E_m （振幅）；由时间 t_1 到 t_2 ，电场强度减小到零；由时间 t_2 到 t_4 电场强度的

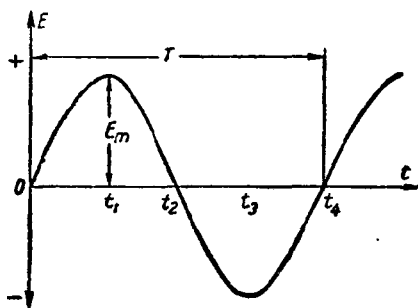


圖 1. 电场按正弦规律变化的图形

变化情形与上半个周期相似。唯方向相反。而从时间 t_4 起，整个变化的循环又重新开始。

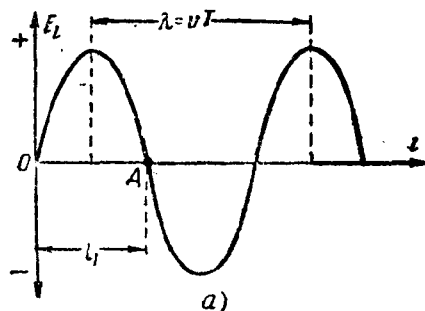
电场强度变化一个完全的循环所需要的时间叫做振荡周期 T ，而一秒内的周期数叫做振荡频率 f 。显而易见， $f=1/T$ 。频率 f 以赫（ Hz ）来度量。以上描述的周期性变化可以用数学式子表示为：

$$E = E_m \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

其中 E 为导体表面附近的电场强度在任意时间 t 时的数值。

导体表面附近电场的变化达到空间各任意点时，要滞后一个传播此变化所需的时间。例如，电场变化传播到距导体为 l_1 的 A 点(图 2, a)所需的时间为 l_1/v ，其中 v 为电场传播的速度。因此，在任意瞬时 t ，在 A 点上的电场的相位将与 l_1/v 秒前在导体表面处的电场的相位相同，也就是说，将与 $t - l_1/v$ 时导体表面处的电场相位相同。由此可见，在空间任意一点的电场的数值 E_t 可以由方程式

$$E_t = E_m \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{l}{v} \right)$$



来表示，其中 v 为电场相位传播的速度，故此速度可以称为相速度。

在传播着的波中的磁场恒与电场同相变化：电场强度和磁场强度同时增加，同时减小。因此，所有对波的电场的传播所作的讨论，对和电场相联系着的磁

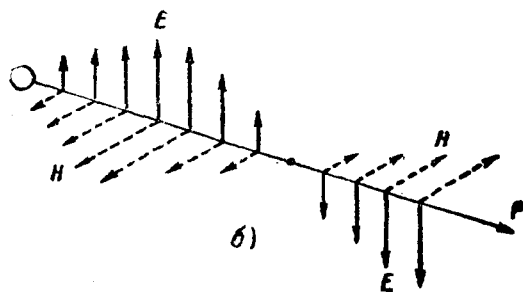


图 2. 电磁波的传播

場來說，同樣也是正確的。

波在一个周期內所傳播的距離叫做波長 λ (圖 2, a)。

因此

$$\lambda = v \cdot T \quad \text{或} \quad \lambda = \frac{v}{f}。$$

由于 $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$ ，故在空气中 ($\epsilon = \mu = 1$)，波長为

$$\lambda = c \cdot T。$$

而在通常 $\mu \approx 1$ 的任何非導電介質中，介電系数越大，則波長越小，即

$$\lambda = \frac{c \cdot T}{\sqrt{\epsilon}}$$

电磁波在空間携运着包含在其電場和磁場內的电磁能，电磁能的大小与場强的平方成比例。波的電場能量和磁場能量的总和恆为定值。

在自由空間內傳播的波中，電場和磁場的力綫恆互相垂直，且垂直于傳播的方向 (圖 2, b)。波的傳播方向通常采用螺旋定則來确定：如果將螺旋手柄自 E 之方向朝 H 之方向順時針轉動，則螺旋前進的方向即为波傳播的方向 (p)。波所攜运的能量即按照我們依上面的法則所确定的方向运动。必須指出，應該將波的傳播速度理解為能量的傳播速度。我們在以後將要看到，能量傳播的速度可能与相位速度不一致。

电磁波从他們的輻射源向四面八方傳播開去。若輻射是等速地向各个方向進行，則在与輻射体等距離的地方，波的相位

均相同，可以設想其為等相面。在我們這種情況下，此等相面為球面。象這樣傳播的波稱為球面波。但在距輻射體很遠的地方，球面的任意一部分實際上可以看作是一塊平面，這時就可以把電磁波看作是按確定方向傳播的平面波。與波的傳播方向垂直的平面通常稱為波前。

電磁波頻譜中的公分波

無線電波只是自然界中各種形式的電磁波中的一種。一系列的自然現象，如紅外線（熱射線），光線，紫外線，X射線及鐳的 γ 射線等都是一些以不同波長的電磁波的形式而傳播着的不同形態的射線能。因此可以按照波長的增大或減小的次序將所有的電磁波排列在連續的頻譜之內。

在表1中按波長減少的次序列出了無線電波、紅外線和光線。

一段電磁波頻譜（從無線電波到光波） 表1

電磁波頻譜中 各段的名称	每段內各 波的名称	波 長	对应于各波長的 振盪頻率（赫）
無線電波	長波	3千公尺以上	100×10^3 以下
	中波	3千公尺—200公尺	$100 \times 10^3—1.5 \times 10^6$
	中短波	200—50公尺	$1.5 \times 10^6—6 \times 10^6$
	短波	50—10公尺	$6 \times 10^6—30 \times 10^6$
	公尺波	10—1公尺	$30 \times 10^6—300 \times 10^6$
	公寸波	1—0.1公尺	$300 \times 10^6—3 \times 10^9$
	公分波	10—1公分	$3 \times 10^9—30 \times 10^9$
	公厘波	10—1公厘	$30 \times 10^9—300 \times 10^9$
	過渡波	1—0.1公厘	$300 \times 10^9—3 \times 10^{12}$
紅外線	十微米波	100—10微米	$3 \times 10^{12}—30 \times 10^{12}$
	微米波	10—0.75微米	$30 \times 10^{12}—400 \times 10^{12}$
光線	紅線—紫線	0.75—0.4微米	$400 \times 10^{12}—750 \times 10^{12}$

無線電波佔有波長的很大的一段(從3千公尺到0.1公厘) 對應於這些波長的頻率為 100×10^8 赫到 3×10^{12} 赫。頻率為 3×10^9 赫(波長為10公分)及高於此數值者叫做特高頻。紅外線所包括的波的波長從100微米至0.76微米。光波的波長則在0.76微米至0.38微米的範圍內。

頻譜中的每一段都具有特定的性質。其中無線電波表現為電和磁的作用；紅外線發熱；光波發光。因此這三種形式的射線能也要以不同的方法來研究。

公分波在頻譜中所佔的位置在比它長一點的無線電波和熱射線以及光波之間。因此可以提出這樣的問題：我們應該利用無線電工學的概念來研究這些波呢，還是應該象對待熱射線和光波那樣的來研究它們呢？正如我們在以後將要看到的，兩種處理的辦法都是同樣合理的：在一些情形下，公分波的性質類似於無線電波；在另一些情形下，則又與紅外線的性質相似；而在第三種情形下，它卻又類似於光波。

所有產生和輻射任一波長的無線電波的現代裝置，總的來說，都是由下列四種主要元件組成：

1. 在其中激發出電磁振盪的閉合振盪回路。
2. 用來補充回路中消耗的能量，從而能維持回路中振盪的电子管。

上述兩個元件構成了電磁振盪發生器。

3. 將電磁能由發生器傳送至輻射裝置——天線——的電路。

4. 以波的形式將電磁能向四面八方輻射出去的天線。

对于任何波長來說，裝置中都要有上述四种元件。但是随着波長的縮短，元件本身要發生变化。一直到波長的数量級为几公尺时，这些变化都还不是原則性的。这时，通常只是减小各相应器件的尺寸及它們的电气数值。可是，在轉变到公分波时，就發生了原則性的困难。許多在普通无綫电波情况下不起顯著作用的一些現象——《細節》，变成了很顯著的障碍，有时甚至成为不可克服的困难。因此，就必須尋求新的途徑、新的方法。

在下面的各章中，我們將依次來研究上述无綫电發送裝置中的各个元件以及它們的作用原理，指出在制作用于公分波的这些元件时所產生的困难，并討論克服这些困难的方法。

第 二 章

公分波發生器

在制造特高频（公分波）發生器时，首先需要解决的問題就是要做出相应的振盪回路。

振盪回路变成了空腔諧振器

大家知道，普通的振盪回路是由电容 C 和电感 L 組成的，回路中振盪頻率 f （回路的固有頻率）决定于关系式

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

其中 f 的單位为赫， C 为法拉， L 为亨利。

驟然看來，要獲得特高頻，似乎只要減小回路的电容和电感的数值就行了。可是要实现这一个完全正确的想法却会遭遇困难。

我們通常假定整个回路的电容均集中在电容器中，而电感均集中在綫圈中；或者換句話說，我們只考慮集中常数。事实上，在回路中还有分佈常数，因为每一段連結的導綫，即使是很小的一段，都具有一些电容和电感。不过即使在高頻率的情况下，这些电容和电感都可以不去考慮。例如，对于 1000000 赫的頻率（波長为 300 公尺）來說，当电感为 100 微亨时，回路的电容应为 250 微微法；而在長 1 公分、直徑 2 公厘、相距 5 公分的兩平行導綫間的分佈电容却总共只有 0.07 微微法拉左右。这些導綫間的分佈电感只不过 0.016 微亨左右。在这种情况下，回路的分佈常数同集中常数相比是非常小的。可是，在特高頻的情况下，这些《細節》已經成为極其顯著的了。对于 3000 兆赫的頻率（波長为 10 公分）來說，当电感为 0.1 微亨时，回路电容应为 0.03 微微法左右。因此上述分佈常数已經可以同集中常数相比較了。

实际上怎样來做出电容和电感这样小的回路呢？

我們看一下圖 3，a 中的長方形綫匝回路。在这个綫匝回路中不能指出回路的电容和电感集中在什么地方，它們是分佈在整个綫匝上的。因此从獲得很小的电容和电感的观点來看，这个綫匝回路对特高頻是适用的。但这样的回路是一个开端振荡回路，按實質來說也就是一根天綫，是一个輻射器。这就使

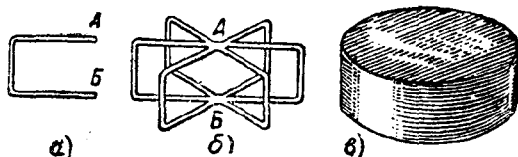


圖 3. 从長方形繞圈回路到空腔諧振器

回路中電能的損耗大大增加。

很可惜，上面所說的并不是这种回路在过渡到特高频时所贈送給我們的唯一的《意外礼物》。原來隨着頻率的增加，由于所謂趨膚效应，回路中的衰減顯著地增加了。趨膚效应表現在交变电流并不通过導体的整个断面，而只是通过靠近導體表面的一層。這一層的厚度（即电流鑽進金屬的深度）隨着頻率的增加而減小。因此，对于交变电流來說，电阻是增大了。交变电流通过該層的厚度还与導體的導磁系数和电導率有关。对于銅質導線來說，此層之厚度实际上可以按公式

$$d = \frac{6.3}{\sqrt{f}}$$

來計算，式中 d 系該層之厚度（公分）， f 系頻率（赫）。

不难計算，当頻率為1兆赫時，該層的厚度約為0.06公厘；当頻率為3000兆赫時，电流將僅在約1微米的薄層中通过。直徑為1公厘的銅質導線的电阻在这种情形下約增加到60倍。这就將在綫匝回路中引起大得不能容許的振盪衰減。

由此可見，此种綫匝回路是不宜用于特高频振盪回路的。原因是：1)輻射电磁能；2)振盪衰減太大（品質因數很低）。

因此，問題就在于減小它的电阻以及消除电磁能的輻射。

現在我們在这个綫匝上并聯第二個、第三個綫匝等等（圖 3, 6）。這樣聯結的電阻（在 A 、 B 兩點間測得的）將隨着并聯綫匝數的增加而減小。但是，在此種聯結下，電容 C 和電感 L 將隨着圈數的增加而發生變化。看來和電容及電感乘積有關的回路固有頻率似乎也應該變化。但事實上它並不變化，因為隨着圈數的增加，雖然電容增大了，但電感却相應地減小了（註）。

增加并聯綫匝的數目，最後可以得到一個叫作空腔諧振器的空心金屬圓柱體（圖 3, 6）。它的理論及計算方法是由蘇聯學者 $M \cdot C \cdot$ 聶曼教授研究出來的。

在特高頻的實踐中，採用了各種各樣的諧振器，如柱形諧振器、環形諧振器、長方形諧振器等等。現在我們僅僅來描述一下特種形式的環形諧振器，因為我們以後討論特高頻電子管時是要用到它的。圖 4 示出了這樣一種諧振器，它的各個常數在某種程度上來說是集中的：電力綫（帶有箭頭者）主要集中在諧振器的中心部分（ $A-B$ ）。磁力綫（用“叉”和“點”代表，“叉”表示垂直進入圖面的磁力綫，“點”表示自圖面向外垂直發出的磁力綫）是許多環繞電場力綫的圓環；這些磁力

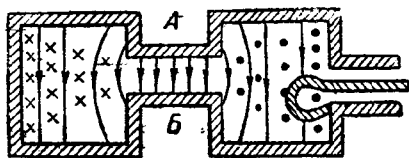


圖 4. 具有集中常數的空腔諧振器

〔註〕 在 n 個同樣大小的電容 C 并聯的情況下，總的電容 $C_{обш}$ 增加到 n 倍，即 $C_{обш} = n \times C$ 。 n 個綫圈并聯時的電感 $L_{обш} = \frac{L}{n}$ 。

綫分佈在環形容積之中，且靠近周边的地方較密。諧振器內的振盪通常表示能量的轉換：電場能量變成磁場能量及磁場能量變成電場能量。

電磁能量不可能跑出諧振器範圍以外，因為由於特高頻振盪，電場鑽進諧振器金屬壁的深度非常微小，實際上只是在諧振器的內表面引起電流。那麼能量是怎樣向外引出以輸送至負載，例如說輸送至天綫的呢？圖4中示出了從諧振器中引出能量的許多方法中的一種。金屬環的一端鉗在諧振器器壁上，另一端伸成一條直桿，穿過鉗在諧振器側壁的一個小孔上的金屬圓筒。磁力綫穿過金屬環，圍繞着金屬環形成一個個閉合的圓環。當磁場變化時，磁力綫切割金屬環，在環內感生電動勢。這樣，金屬環好像是一小型的交流發生器。金屬環延伸出來的直桿同金屬圓筒（直桿即處於此圓筒的軸心位置）形成了輸送電能的電路（關於能量的輸送電路將在下面的幾章內詳細敘述）。

這樣，對特高頻情況下的回路性質的研究使我們創造出一種新型回路——空腔諧振器。

現在我們來討論一下，隨着振盪頻率的增加，發生器的第二個組成元件——電子管——有怎樣的變化。

電子流將電池能量“灌入”回路

今考慮一個最簡單的三極電子管發生器（圖5），此時先不考慮柵極的作用。

當電子管板極電路中產生電子流的時候，便出現了將電容器充電的電流，於是在電路中發生振盪。因為回路的振盪電壓

作用在电子管的陰極和板極之間，所以這兩極間的电場的大小和方向將按周期規律变化。在正半周期內（就板極言），电場加速电子的运动，电子的动能依靠振盪能量而增加。这一多余的能量以热能的形式由

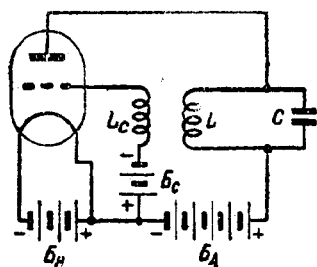


圖 5. 最簡單的高頻發生器电路

冲击板極的电子逸到了板極上。在振盪的負半周期內，电場阻碍着电子，电子的动能轉变成回路的振盪能量（通过电容器再充电的过程）。这种电子能量与場的能量彼此間的交換，是下述一般規律性的实例：若电場阻碍着电子，則电子的动能轉变成場的能量；当电場加速电子时，則場的能量轉变成电子的动能。

在我們所考慮的例子中，回路中的能量並沒有得到任何的补充。的确，回路在負半周期內从电子獲得多少能量，就在正半周期內給与电子多少能量。

現在來研究柵極的作用。由于柵極比板極更靠近陰極，故柵極上电压即使有很小的变化，也將对管中的电子流產生顯著的影响。在柵極和陰極間接一耦合綫圈 L_c ，并使它靠近回路綫圈 L 。我們知道，耦合綫圈要这样的接到陰極和柵極上去，即使得柵極上电压的符号恆与回路在板極上形成的电压的符号相反。因此，当板極上电压为正半周期时，在柵極上將得到負半周期的电压；由于这个原因，一部分电子受柵極排斥飛回陰極，因而流到板極的电子流便減小了。当板極上电压为負半周