

微波与雷达技术

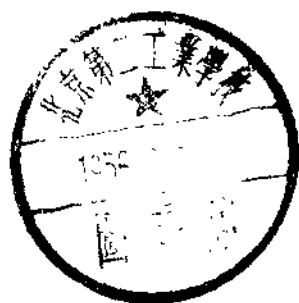
蘇聯 A. Я. 布列特巴爾特編



人民邮电出版社

微波與雷達技術

蘇聯 A. Я. 布列特巴爾特 編



人民郵電出版社



1955

ОСНОВЫ ТЕХНИКИ
САНТИМЕТРОВЫХ ВОЛН В РАДИОЛОКАЦИИ

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО
ПОД РЕДАКЦИЕЙ
А. Я. БРЕЙТБАРТА

ИЗДАТЕЛЬСТВО "СОВЕТСКОЕ РАДИО"
МОСКВА—1951

內 容 提 要

本書是微波與雷達技術方面的基礎讀物。

全書共分十三章及二附錄。第一章至第四章敘述電磁場和電磁波的基礎理論、各種微波元件、微波振盪器和微波的測量方法。第五章至第十一章敘述脈衝雷達的基本原理及其各組成部分；並指出了雷達的發展方向。第十二、十三章分別介紹微波在通信和物理方面的應用。

微 波 與 雷 達 技 術

原編者:	蘇聯 А. Я. 布列特巴爾特
譯者:	田 幸 雨 之
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 供 應 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: 117 1956年1月南京第一版第一次印刷 1—2,500冊
850×1168 1/32 183頁 印張11¹⁴/₂ 字數 262,000字 定價 (8) 2.12元

★北京市書刊出版業營業許可證出字第〇四八號★

俄 譯 本 前 言

“微波與雷達技術”這本書是從“微波與雷達電子學”(Microwave and Radar Electronics)一書翻譯過來的。該書總結了戰爭時期美國和英國雷達技術的主要發展方向。此外，並約略提到微波與脈衝雷達技術對各個物理與技術部門的影響。

原書個別章節內的錯誤，在這本俄譯本中已作了修正；另外，原書的部分材料，因其與微波或脈衝雷達技術沒有直接關係，故加刪削。

A. H. 布列特巴爾特

目 錄

俄譯本前言

第一章 電磁場與電磁波

第一節 電子和場..... (1)

第二節 電場和磁場..... (2)

第二章 同軸綫 波導與空腔諧振器

第一節 同軸綫..... (30)

第二節 波導..... (33)

第三節 空腔諧振器..... (40)

第三章 微波振盪的產生

第一節 用空腔諧振器產生振盪..... (51)

第二節 調制電子的速度 速調管..... (56)

第三節 微波的高功率振盪器 磁控管..... (64)

第四章 微波技術

第一節 微波的檢波和測量..... (76)

第二節 阻抗的測量..... (83)

第三節 微波傳輸的元件..... (95)

第四節 微波輻射器..... (107)

第五節 功率測量..... (116)

第六節 其他微波儀器..... (117)

第七節 空腔 Q 值測量..... (124)

第五章 脈衝綫路

第一節 週期性重發脈衝的頻譜..... (126)

50180

第二節 視頻放大器	(150)
第三節 脈衝發生器	(137)
第四節 脈衝遲延綫路	(157)
第五節 精確掃描與時間刻度綫路	(162)
第六章 顯示器	
第一節 陰極射綫管	(167)
第二節 顯示器類型	(174)
第三節 顯示器綫路的各部分	(180)
第四節 顯示器的方塊圖	(190)
第七章 調諧放大器	
第一節 單調諧放大器、帶寬和增益	(195)
第二節 參差調諧放大器	(199)
第三節 雙調諧放大器	(202)
第四節 雙T濾波器的音頻放大器	(203)
第八章 微弱信號的放大	
第一節 噪音	(209)
第二節 雷達接收機的一般述評	(213)
第三節 超外差接收機	(215)
第四節 超外差雷達接收機的輔助綫路	(227)
第九章 伺服機件與計算機	
第一節 同步機	(238)
第二節 伺服機件	(242)
第三節 伺服機件用來控制軸的轉動	(244)
第四節 計算機	(251)
第十章 特殊綫路	
第一節 穩定的電源設備	(257)

第二節 陰極輸出器.....	(261)
第三節 多諧振盪器.....	(263)
第四節 移位器綫路.....	(269)
第五節 減低頻率的間歇振盪器.....	(272)
第六節 選擇放大.....	(275)

第十一章 雷達技術

第一節 雷達的物理基礎.....	(279)
第二節 距離方程式的分析.....	(288)
第三節 雷達.....	(304)
第四節 雷達信號.....	(318)
第五節 角、內準確測定與自動跟踪.....	(321)
第六節 移動目標的指示.....	(323)

第十二章 微波無線電通信

第一節 傳播特性.....	(326)
第二節 通信發射功率.....	(329)
第三節 頻率穩定.....	(331)
第四節 多路通信.....	(331)
第五節 微波通信的各種不同應用.....	(333)

第十三章 微波在物理上的應用

第一節 微波的吸收現象.....	(335)
第二節 熱輻射的測量.....	(342)
第三節 微波質點加速器.....	(347)
第四節 微波和超電導.....	(351)
第五節 微波應用在其他領域.....	(353)

附錄一、 傅里葉積分

附錄二、 單位制度

第一章

電磁場與電磁波

本書的內容主要是與雷達的發展相聯系而產生的技術。在雷達中採用了強力電磁能源，極短的脈衝，快的掃描速度和特別的顯示器。

現代雷達用微波^{譯註}發射；因此，雷達的發展必然帶來微波方面的很大成就，這些成就還成功地運用在其他各種研究工作中。

第一節 電子和場

在後面我們所研究的現象中都是假定電子是最輕的質點，它在電場中幾乎沒有慣性。例如，在1伏/公分的電場中電子產生的加速度接近於重力加速度的 2×10^{12} 倍。在第一微秒內，電子將走過10公尺。沒有任何疑問，電子能夠跟得上快速的運動。雖然這個事實早已爲人所熟知，但是很奇怪，直到1940年以前還很少應用。在電子管中電子被當作沒有慣性的電流攜帶體，這電流受較小的電壓所控制，但是這裏並未涉及到高速度的問題。當第一批迴旋加速器製造出來時，其應用的頻率是10兆週，在那時已認爲是很高的速度了。

電子的高速度在雷達開始發展的時候就被應用了，它們應用在速調管和磁控管中，以得到100,000兆週的電磁振盪。在陰極射綫管中 fastest 掃描的時候，射綫掠過螢光屏不超過1微秒，例如應用在

^{譯註} 微波通常是指波長在1公分到30公分範圍以內的電磁波。

氣體放電的研究中。也發展了其他的快速動作，例如在雷達自動距離追蹤組合中，當得到回波時，控制電壓在很短時間內形成，不超過一微秒。這種過程每經過 500 微秒重複一次，結果使螢光屏上的標誌與反射信號精密地重合。在這種機器中由於採用了快速電子開關，可能在不到一秒內解出簡單的方程式。

這種機器的實現需要我們考慮一系列的技術問題。譬如使脈衝磁控管工作必須加上一定大小的脈衝電壓和電流；如果一個開關綫路的綫路電容超過一定大小，而管子常數選擇得不適當，就不能在不到一微秒的時間內工作起來；可能裝置一個 30 兆週的放大器而得不到任何放大；所以只有清楚地瞭解全部的工作過程，並考慮到次要現象，才能夠懂得這些技術上的特點。

在雷達技術中要用下列元件：波長 1 至 30 公分的強力多腔磁控管；0.5 至 30 公分波段功率為一毫瓦到數瓦的連續振盪的速調管；30 公分波段，功率為一千瓦和 6 公分波段功率為數瓦的三極管振盪器。在微波波段，從發射機到天綫的能量傳輸技術是比較簡單的。利用氣體放電管當作微波通路的開關已經被研究出來。

在接收方面研究出了很好的晶體檢波器，其靈敏度接近於理想；30 兆週到 60 兆週的中頻放大器；帶寬為 10 兆週的視頻放大器；示波器掃描電路；為遠距離傳送目標座標的計算機及各種真空管開關綫路和顯示器輝亮綫路等。並且設計了為研究可變調制用的特別靈敏的儀器。以上簡單的敘述介紹了微波雷達技術發展的輪廓。

在第一章中，研究的是電磁場和電磁波的一般特性。

第二節 電場和磁場

波長 1 公厘 (mm) 到 30 公分左右的電磁波在電磁振盪的頻譜

中所佔的位置是在高頻無線電波與原子的熱放射和光放射之間，很短波長的無線電波可以用來研究分子的低頻能態轉換。

由於這種波所佔的中間位置，用來說明它的文字就有一些不平常。它採用物理學術語“場”的概念，也採用工程上的術語“阻抗”的概念。兩者都有重要的意義。然而微波技術大半是以電磁場的概念來解釋的，因此它的性質需要更詳細地研究。較長的電磁波，如無線電廣播用的電磁波，是用集中參數元件組成的綫路產生的。這樣，在產生10兆週振盪的振盪槽路中可以看到電容器和電感綫圈。但是在微波振盪器中，綫圈的導綫和電容器的片子看不到了，因此了解電場和磁場的基本關係對微波技術是具有決定性意義的。槽路中的關係只是電場和磁場關係的一個特例。槽路的概念是很有價值的，它仍在很大程度上被拿來應用於微波技術。

雖然如此，爲了了解無線電波的放射與傳播、集膚效應和波導的原理，必須回憶一下電磁場的基本方程式。下面儘可能以最基本的方式敘述一下這些方程式。因爲微波技術是和基本的電量和聯系的，所以下面的說明將從電荷和電場的特性開始。

我們將採用絕對（高斯）單位制。在這種單位制內，電場強度以CGSE單位度量，磁場強度以奧斯忒或高斯度量，電荷和電流用CGSM單位。選用這個單位制的理由是從它說明基本原理的觀點來看是比較簡單；而不是從解決工程問題的觀點來看是比較好，或是可以使方程式的推演更簡便一些。

附錄（二）給出了絕對單位和實用單位（MKS）的關係，並且表示出本章所導出的關係式在實用單位制中採取什麼形式。

電和磁的現象是隨着互相關聯着的電場和磁場的產生而來的。爲了確切地說明它們，應當同時考慮兩種場，因爲解釋輻射現象需

要這樣做；然而這是很複雜的。通常是先單獨考慮由靜止電荷形成的電場，然後再擴充到完全的情況。這裏也將採取這種次序。

電荷附近的場 庫倫定律 我們知道，自然界的多數現象和物質構造可以根據基本質點——電子和質子的性質得到解釋。這些質點的性質雖然還不完全了解，但它們所產生的作用已可以確切地加以說明。基本的性質在於：任何一個帶電質點的周圍都有電場存在。這個電場由四個量所決定，我們先研究其中的三個：質點的電荷；從所考慮的地點到帶電質點的距離；和這一點對帶電質點的方向。第四個因數是帶電質點處於靜止狀態的時間長短，這也有很大的意義。我們先認為這個時間足夠長，然後考慮當這個時間足夠短時會有什麼情況發生。

除非把第二個帶電質點拿到所考慮的地點，帶電質點的電場是不能被發現的。那時場表現為作用於質點上的機械力的形式，這就是衡量場的方法。假如用符號 $\vec{E}$ 表示電場強度，而第二質點的電荷為 e ，則作用於此質點的力可表示為

$$\vec{F} = e\vec{E}.$$

請注意： $\vec{F}$ 和 $\vec{E}$ 具有方向，即都是矢量。 E 作用的方向是沿着兩個帶電質點的連線。正如同為庫倫所確定的，而後又為卡汶狄許和麥克斯韋所證實了的，電場強度 $\vec{E}$ 與 $\frac{1}{r^2}$ 成正比。此處 r 是兩個質點間的距離。這可以利用來決定電荷的單位：單位電荷的定義是：兩個等量電荷相距一公分，相互作用力為一達因時的電荷量。根據這個定義得出與電荷 e 相距 r 處的電場強度等於

* 符號 $\vec{E}$ 表示一個矢量，它的特性是具有大小和方向。

$$E = \frac{e}{r^2}, \quad (1.1)$$

並且 E 的方向是沿着連接電荷與所考慮之點的直線方向。這就是庫倫定律的內容。

電子和質子差不多永遠以上百萬的數值存在。此外，還由於運動是發生在包括大量原子的物質當中，電荷的運動更加複雜。我們把這些條件的影響留待以後考慮。現在請讀者注意這個事實：電子和質子是具有數量相等而符號相反的電荷。改變電荷符號，自然就改變了作用於電荷的力的方向。由於這個緣故，物質的電的中性狀態才有可能。正負電荷的數值是十分接近於相等的，這可能是物質最原本的性質。

電場的能 電荷之間相互作用力的存在促使我們對這個現象進行解釋。最簡單的結論是認為這個力量和萬有引力一樣，是物質的基本性質。在法拉第得出利用媒質來表示電磁現象會更容易理解的結論以前，這觀點一直存在着。法拉第拉用了頗為特殊的機械上的比擬來解釋，這個方法又為麥克斯韋進一步發展了。現在，受彈性變形的以太的概念雖然已不存在，但是法拉第認為電場現象不僅僅決定於電荷本身，而且與電荷周圍空間的特性有關，這一概念仍然牢固地保持着。我們引用圍繞電荷的電場的概念，而不用彈性媒質變形的電場的概念。電場實際存在的概念是很重要的。如果採取這個觀點，就可以找出有電場 $\vec{E}$ 存在的單位體積內能量的公式。如果承認這個基本假定：場真正存在並且帶有能量，那麼很顯然，用什麼方法找到這個公式是沒有多大關係的。可以想像電場是用某種簡單方法產生的，譬如場被限制在二塊小板之間的空間中，然後計算一下這個電場的能量。假定有二塊小板，相距 d 公分，表面電荷密

度 S ，一塊小板帶正電荷，另一塊帶負電荷。在這種情形下，電場強度為 $E=4\pi S$ ；電場的功等於正電荷從一塊板移到另一塊板的功，這個功可用電場從零變化到 E 的平均值（即 $\frac{E}{2}$ ）和電荷大小及兩塊板間距離的乘積表示。對每平方公分面積來說，電荷為 S 個 CGSE 單位，所以電場的功等於 $2\pi S^2 d$ 。因為用電場強度表示較方便，把 $S=E/4\pi$ 代入，得到極板面積為一平方公分、極板間距離為 d 公分的體積中的能量等於 $E^2 d/8\pi$ 。一立方公分體積內的能量為 $E^2/8\pi$ 爾格。

交變電場的效應 預先肯定說作用於靜止電荷的力是電場的唯一表現是沒有任何根據的。實在，光和無線電波在本質上也是電的現象，而波的運動在性質上也不是靜止的，假如根據前面所下的結論，我們就不能解釋光波和無線電波是電的現象。因而可以意料到，電場的變化必然引起某種輔助的現象。正確地敘述這些現象並不像敘述電場本身那樣簡單，因為需要考慮電場強度的大小，它的方向和變化的速度。不但如此，電場的改變可能並不影響靜止的電荷，但對運動的電荷却產生一定的作用。所有這些就給我們提出了一些新的困難。

電荷運動時（因而也就是電場變化時）如果有另外的電荷在同一方向平行運動，就很容易發覺輔助現象的存在。同符號電荷應該互相排斥，但是觀察的事實表明運動的電荷互相吸引。這種運動電荷的相互作用就叫做“磁性”。它已被奧斯忒和安培用實驗方法研究出來了，但是變化電場中磁的產生，在麥克斯韋給電磁場做出全面的定義以前，是不了解的。

這些學者們的發現可以簡單歸結如下：如果我們用一個運動電荷來測試電場，例如用陰極綫示波器中的電子射綫，那麼可以發現

有力作用於這射綫上，這個力並不是由於靜電場的緣故。爲了解釋這種力，我們說有“磁場”存在，其強度用符號 $\vec{H}^*$ 表示。磁場作用於以速度 $\vec{v}$ 運動的電荷 e 的力量等於

$$\vec{F} = \frac{e\vec{v} \times \vec{H}}{C} \quad (1.2)$$

其中 C 是個常數，大小等於光速，向量乘積 $\vec{v} \times \vec{H}$ 表示力朝着取捷徑把 $\vec{v}$ 轉向 $\vec{H}$ 的右螺旋的運動方向。力的大小等於 ev 和 H 的積再乘其間夾角的正弦。這個公式較其相應公式 $\vec{F} = e\vec{E}$ 爲複雜，但是應當採用它，因爲它與實驗結果相符合。

麥克斯韋指出了，這用實驗方法決定出來的磁場是由變化的電場產生的。它們之間的關係雖然很簡單，但是包含着某種形式的量，而我們對這些量作數量上的計算是不熟悉的。磁場是隨時間變化的電場產生的。但是所產生的磁場並不與電場的方向一致，也不固定在空間某一個固定點。變化的電場所產生的磁場是散佈開去的，它的形狀爲一個圓圈。這種場正好由矢量分析中叫作“旋度”的公式所決定。

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1.3a)$$

這個方程式可以用矢量在直角坐標的空間軸上的投影表示出來：

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= \frac{1}{c} \frac{\partial E_x}{\partial t} \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= \frac{1}{c} \frac{\partial E_y}{\partial t} \end{aligned} \quad (1.3b)$$

*本書差不多僅只研究自由空間中的場，對於自由空間中的場 $\vec{H} = \vec{B}$ ，因此像通常的用法一樣，磁場強度用 $\vec{H}$ 來表示。

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \frac{1}{c} \frac{\partial E_z}{\partial t}$$

這個方程式除了一種情形之外是很難運算的。如果強度為 H 的磁場穿過一條閉合曲線，那麼我們就能夠得到穿過這條閉合曲線 C 所圍成的面積 Σ 的旋度的面積分和磁場強度在閉合曲線上的綫積分之間的關係。當然我們不能取任意的閉合曲線，而取最簡單的閉合曲線，以用最小的力量得到所需要的結果。

斯托克斯定理把這個關係用下面的方程式表示出來：

$$\oint_C \vec{H} \cos \theta dl = \int_{\Sigma} \text{rot} \vec{H} \cos \varphi dS。$$

在此處，左面部分是沿閉合曲線的綫積分， θ 角為 $\vec{H}$ 與 dl 間的夾角。右面部分是旋度的面積分， φ 是小面積 dS 的法綫與 $\text{rot} \vec{H}$ 的方向之間的夾角。

在有電場變化的閉合曲線中，應用斯托克斯定理，可得到

$$\oint_C \vec{H} \cos \theta dl = \frac{1}{c} \int_{\Sigma} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cos \varphi dS。 \quad (1.36)$$

方程式 (1.36) 的用途可以從圍繞一個等速運動電子的磁場的研究中看出來。讓我們來研究距離電子運動軌道不遠的一個點。那裏的電場方向是沿着連接電子和這一點的直綫，而且它的大小和方向是隨着電子運動而變化着的。 $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ 是一個矢量，它很容易用幾何方法畫出，如圖 1.1 所示。這個矢量在電子最接近於所考慮的點的瞬間是平行於電子運動的方向的。電場的變化引起了磁場，其方向圍繞着電子運動的直綫。磁場強度的大小可以表示為：

$$H = \frac{ev \sin \theta}{cr^2}, \quad (1.4)$$

此處 v 是電子速度， r 是從所考慮的點到電子的距離， θ 是 r 方向和電子運動方向之間的夾角。

我們把這個公式應用到小段導線 dl 上的電子運動。如果 N 是單位長導線上電子的數目， v 是電子的平均速度，那末每秒鐘通過導線截面的電子數將是 Nv 。導線中的電流可表示為：

$$i = Nev,$$

磁場（在這裏用 dH 表示）將為運動於小段導線 dl 中的電子所決定，電子的數目為 Ndl 。這數目用導線中的電流表示就是 $i \frac{dl}{ev}$ 。根據公式（1.4）

$$dH = \frac{1}{c} \frac{idl \sin \theta}{r^2} \quad (1.5)$$

這就是有名的安培定律的公式。

電流的最重要的特性，即它的磁場，可以理解為由運動電荷產生的變化電場的結果。我們還想再一次着重地指出在運動電荷周圍空間中所發生的現象的重要性的真實性。

交變磁場的效應 變化的電場產生磁場並不是最後的結果。法拉第和亨利曾經證實，正像變化的電場產生旋變磁場一樣，變化的磁場也產生旋變電場。上面所說的可以表示為我們所熟悉的形式：

$$\oint E \cos \theta \, dl = -\frac{1}{c} \int_{\Sigma} \frac{\partial H}{\partial t} \cos \varphi \, dS \quad (1.6)$$

這就是，在閉合曲線中所產生的電動勢與穿過閉合曲線的磁通變化速度成正比，而符號相反。由於這個公式在很多情況下應用於微波方面不十分方便，例如在研究平面電磁波時，所以要適當的利用別

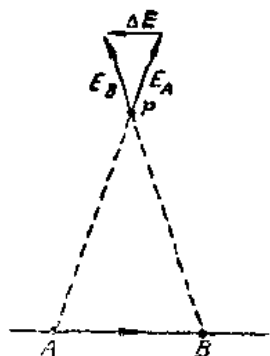


圖 1.1 運動電荷附近的電場。P點電場由 E_A 變為 E_B 。結果出現平行於 AB 的向量 ΔE 。這個變化的電場產生磁場，其方向圍繞着 AB 。

的關係。如果把 (I.6) 公式作為基本關係的積分形式，那麼它的另一個形式是：

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial H_x}{\partial t} \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial H_y}{\partial t} \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial H_z}{\partial t}\end{aligned}\quad (\text{I.7a})$$

或者寫成矢量形式：

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (\text{I.7b})$$

這個通用形式的法拉第定律公式，是根據斯托克斯定理改變 (I.6) 公式得到的，它把兩種場直接聯繫起來。這是相當複雜的，但是，將來還要證明，它在很多情形下可以大大化簡。

電磁波 在結束這個簡短的電磁波理論基礎敘述以前，值得研究一下一個重要的結果，這個結果是可以從上面所給出的兩個基本方程式得到的。這兩個基本方程式把時間的導數和距離的導數聯繫起來。 E 對時間變化得愈快， H 對距離的變化也愈大。這個性質對於電磁波的傳播是必要的。在彈性的固體中，波在傳播的時候所引起的變形就產生了力，它使媒質得到加速度。時間的導數和距離的導數就是這樣的互相聯系着。聯系着這些導數的方程式中包含有決定傳播速度的媒質彈性與媒質密度。現在想像一個很簡單的過程——電子的上下運動。可以完全合理地假定，在時間為 t 時，在 z 軸上的 z 點，產生了電場 E_z 。並且可以這樣選擇方向，使 E 在 x 軸和 y 軸上的分量等於零。以後我們再討論為什麼可以這樣做。這樣電場將成為平面極化電場。把問題縮小為簡單的電磁場後，現在我們可以看