

# 超高频接收机

苏联B.И.西福罗夫著

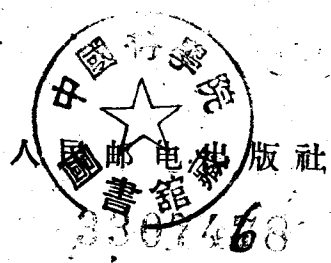
湯国权 陈炳南 朱庆璋译

人民邮电出版社

|         |
|---------|
| 电子学研究所图 |
| 73-459  |
| 182     |
| 16      |

# 超 高 頻 接 收 机

苏联 В. И. 西 福 罗 夫 著  
 湯国权 陈炳南 朱庆璋 譯



В. И. СИФОРОВ  
РАДИОПРИЕМНИКИ  
СВЕРХВЫСОКИХ  
ЧАСТОТ  
ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ДОПОЛНЕННОЕ  
ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР  
МОСКВА—1957

超 高 頻 接 收 机

著 者: 苏联 В. И. 西 福 罗 夫  
譯 者: 湯 国 权 陈 炳 南 朱 庆 璋  
出版者: 人 民 邮 电 出 版 社

北京东四 6 条 13 号

(北京市书刊出版业营业登记证出字第 048 号)

印刷者: 北 京 市 印 刷 一 厂  
發行者: 新 华 书 店

开本 850×1168 1/32

1959 年 9 月北京第一版

印张 18 12/32 页 294

1959 年 9 月北京第一次印刷

印刷字数 509,000 字

印数 1—3,700 册

統一書号: 15045·总 956—無 277

定价: (10) 3.45 元

## 內 容 提 要

這本書共有 21 章，很詳細地講述了 有关超高频接收机的各个方面，特別着重地講述了雷达接收机、脉冲通信接收机和电视接收机。書中用了不少篇幅講述超高频接收机及其元件中的物理現象，并講述了上述各种接收机的理論和計算方法。

DU03/02

## 第二版序言

本書講述超高频無線电接收机，包括雷达接收机、脉冲通信接收机和电视接收机。本書叙述超高频接收机及其部件中所發生的物理現象，指出各种电路的特点，并闡明这种接收机的原理及其計算方法。

本書中反映了苏联和国外学者們在超高频無線电接收理論和实践中的許多工作，也包括了作者自己的工作在内。

与第一版比較，本書增加了一些新的資料。增加了有关信息論和信号編碼理論的第十一章。在參考資料的目录中补充了一些苏联和国外作者的最近著作。接收放大管和电子器件參考数据也已重新修訂。

参加本書編写工作的有副教授 А.П. 西維爾斯和主任教員 В.А. 沃尔果夫。А.П. 西維爾斯副教授編写了有关雷达、脉冲通信、电视等超高频接收机特点的綜合叙述，以及有关接收机的自动調整和設計第十四、十五、十六、十九和卅章。主任教員 В.А. 沃尔果夫編写了第四章超高频振盪电路，第十七章第二节限幅器和鑑頻器，并編制了接收放大管主要数据表和超高频無線电接收的參考資料目录(譯註)。

在本書准备付印时，作者接受了各高級技术專門学校教研組的同志們和其他無線电專家們所提出的宝贵意見。作者謹向所有提出意見，帮助作者改进本書的同志們致謝。

作者相信本書对軍事学院、高級軍事学校和各高等学校的学生、研究生和教师們，对各兵种、各工業部門和从事無線电技术維護工作的工程技術人員，將有所帮助。

В.И. 西福罗夫

1956年4月

---

譯註：在譯本中參考資料目录从略。

# 目 录

## 第二版序言

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第一章 超高频接收机概论 .....             | 1  |
| 第二章 超高频时电子管中的物理现象 .....        | 3  |
| 1. 电流通过电子管的一般规律 .....          | 3  |
| 2. 运动电荷感应电流的定律 .....           | 6  |
| 3. 电子管的基本方程式 .....             | 11 |
| 4. 在直流时电子管的关系式 .....           | 13 |
| 5. 超高频二极管工作的分析 .....           | 16 |
| 6. 具有控制栅极的超高频电子管工作分析 .....     | 24 |
| 第三章 超高频波段内放大管的特性 .....         | 30 |
| 1. 放大管看作有源四端网络 .....           | 30 |
| 2. 超高频波段内放大管的初级参量 .....        | 33 |
| 3. 超高频波段内放大管的等效电路及特征方程式 .....  | 37 |
| 4. 电子管的“冷”及“热”参量及其与频率的关系 ..... | 40 |
| 5. 输入导纳 .....                  | 44 |
| 6. 跨导 .....                    | 52 |
| 7. 输出导纳 .....                  | 53 |
| 3. 反作用导纳 .....                 | 54 |
| 9. 用来放大超高频振荡的电子管 .....         | 57 |
| 第四章 超高频振荡回路 .....              | 63 |
| 1. 引言 .....                    | 63 |
| 2. 集中常数超高频振荡回路的一般特性 .....      | 64 |
| 3. 电容器的一般特性 .....              | 67 |
| 4. 固定电容器 .....                 | 72 |
| 5. 可变电容器 .....                 | 76 |
| 6. 超高频可变电容器的结构 .....           | 78 |
| 7. 超高频电感线圈的一般特性 .....          | 83 |
| 8. 电感线圈的计算 .....               | 86 |

|                |     |
|----------------|-----|
| 9. 超高频电感线圈的结构  | 94  |
| 10. 超高频扼流圈和电阻  | 100 |
| 11. 过渡型宽波段回路   | 101 |
| 12. 谐振线的—般特性   | 107 |
| 13. 谐振线的等效参量   | 110 |
| 14. 谐振线各项参量的计算 | 116 |
| 15. 谐振线的结构     | 122 |
| 16. 空腔谐振器的一般特性 | 136 |
| 17. 空腔谐振器的计算   | 139 |
| 18. 空腔谐振器的结构   | 147 |

## 第五章 电路及电子管的噪声 .....152

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 1. 接收天线的噪声           | 152 |
| 2. 导体内部的热运动噪声        | 156 |
| 3. 电子管的初级噪声参量及等效噪声电路 | 161 |
| 4. 高频时放大电子管的噪声       | 167 |
| 5. 超高频时放大电子管的噪声      | 172 |
| 6. 起伏干扰的结构           | 175 |
| 7. 起伏干扰的数学说明         | 177 |

## 第六章 超高频放大器的一般原理 .....181

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 1. 电子管的次级放大参量              | 181 |
| 2. 最大放大率的条件                | 183 |
| 3. 电子管初级参量与次级放大参量间的关系      | 186 |
| 4. 最大信号噪声比的条件。电子管的次级噪声参量   | 196 |
| 5. 没有统计关系时电子管初级与次级噪声参量间的关系 | 201 |
| 6. 有统计关系时电子管初级与次级噪声参量间的关系  | 209 |
| 7. 单级电路的噪声关系               | 217 |
| 8. 多级电路中的噪声关系              | 219 |

## 第七章 超高频放大器 .....224

|              |     |
|--------------|-----|
| 1. 超高频放大器概論  | 224 |
| 2. 共陰極放大級的电路 | 228 |
| 3. 共柵極放大級的电路 | 234 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 4. 兩級的超高频放大器电路 .....              | 239 |
| <b>第八章 中頻放大器</b> .....            | 243 |
| 1. 中頻放大器的概論 .....                 | 243 |
| 2. 中頻放大器諧振曲線的方程式 .....            | 244 |
| 3. 放大系数的計算 .....                  | 248 |
| 4. 选择性的計算 .....                   | 256 |
| 5. 噪声頻帶的計算 .....                  | 261 |
| <b>第九章 高频及中頻放大器中的瞬变过程</b> .....   | 264 |
| 1. 瞬变过程概論 .....                   | 264 |
| 2. 研究瞬变过程的方法 .....                | 265 |
| 3. 关于包絡綫的定理 .....                 | 281 |
| 4. 理想帶通滤波器中的瞬变过程 .....            | 283 |
| 5. 多級諧振放大器中的瞬变过程 .....            | 286 |
| 6. 多級頻帶放大器中的瞬变过程 .....            | 291 |
| <b>第十章 脉冲信号和干扰通过振盪系統的規律</b> ..... | 296 |
| 1. 矩形無綫电脉冲通过振盪系統 .....            | 296 |
| 2. 鐘形無綫电脉冲通过振盪系統 .....            | 298 |
| 3. 矩形無綫电脉冲情况下的最佳頻帶 .....          | 302 |
| 4. 鐘形脉冲情况下的最佳頻帶 .....             | 305 |
| 5. 矩形無綫电脉冲通过具有鐘形諧振曲綫的振盪系統 .....   | 313 |
| <b>第十一章 超高频接收机中的变频器</b> .....     | 316 |
| 1. 变频器概論 .....                    | 316 |
| 2. 变频的一般原理。变频器的参量 .....           | 318 |
| 3. 五極管混頻器 .....                   | 324 |
| 4. 三極管混頻器 .....                   | 325 |
| 5. 二極管混頻器 .....                   | 328 |
| 6. 晶体混頻器 .....                    | 333 |
| 7. 米波及分米波的外差振盪器 .....             | 341 |
| 8. 厘米波的外差振盪器 .....                | 342 |
| <b>第十二章 檢波器和視頻放大器</b> .....       | 345 |
| 1. 檢波器概論 .....                    | 345 |



|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 2. 电子管檢波器 .....                     | 346 |
| 3. 晶体檢波器 .....                      | 348 |
| 4. 具有簡單补偿的寬頻帶放大器 .....              | 352 |
| 5. 具有复杂补偿的寬頻帶放大器 .....              | 357 |
| 6. 陰極負載放大級 .....                    | 361 |
| 7. 其他視頻放大器电路 .....                  | 364 |
| <b>第十三章 超高频無綫电接收机的信号噪声比</b> .....   | 366 |
| 1. 超高频接收机的实际灵敏度和临界灵敏度 .....         | 366 |
| 2. 超高频接收机噪声系数的計算方法 .....            | 372 |
| 3. 接收脉冲信号时的信号噪声比 .....              | 375 |
| 4. 接收脉冲信号时噪声对陰極射綫管的影响 .....         | 377 |
| <b>第十四章 雷达接收机</b> .....             | 384 |
| 1. 雷达站和雷达接收机概論 .....                | 384 |
| 2. 雷达接收机元件 .....                    | 394 |
| <b>第十五章 脉冲無綫电话通信接收机</b> .....       | 413 |
| 1. 無綫电话信号脉冲傳輸概論 .....               | 413 |
| 2. 脉冲調制的种类 .....                    | 420 |
| 3. 脉冲時間調制多路無綫电话通信信号的接收 .....        | 424 |
| 4. 脉冲編碼調制多路無綫电话通信信号的接收 .....        | 435 |
| <b>第十六章 电视接收机</b> .....             | 443 |
| 1. 电视节目傳輸的基本原理 .....                | 443 |
| 2. 电视接收机概論、方框圖 .....                | 448 |
| 3. 电视接收机的天綫及輸入电路 .....              | 453 |
| 4. 电视接收机的各部分 .....                  | 455 |
| <b>第十七章 調頻信号的接收方法</b> .....         | 466 |
| 1. 調頻概論 .....                       | 466 |
| 2. 限幅器及頻率檢波器 .....                  | 469 |
| 3. 接收頻率調制信号时于扰的影响 .....             | 489 |
| 4. 接收調頻信号时的失真 .....                 | 496 |
| 5. 应用于調頻信号接收机中的中頻放大器及外差振盪器的特点 ..... | 498 |
| <b>第十八章 超再生接收方法</b> .....           | 499 |

|                                             |            |
|---------------------------------------------|------------|
| 1. 超再生的一般原理 .....                           | 499        |
| 2. 超再生电路的特性 .....                           | 503        |
| 3. 超再生电路的类型 .....                           | 509        |
| <b>第十九章 超高频接收机的自动控制</b> .....               | <b>513</b> |
| 1. 超高频接收机的自动增益控制 (APV) .....                | 513        |
| 2. 超高频接收机的自动频率微调 .....                      | 519        |
| <b>第二十章 超高频接收机的设计</b> .....                 | <b>523</b> |
| 1. 接收机方框图的选择和组成 .....                       | 523        |
| 2. 接收机所需总增益的决定和各部分间增益的分配 .....              | 526        |
| 3. 接收机通频带和谐振特性形状的选择 .....                   | 529        |
| 4. 提高接收机灵敏度的方法 .....                        | 532        |
| 5. 接收机控制装置的选择 .....                         | 535        |
| 6. 超高频接收机中频放大器的设计 .....                     | 537        |
| <b>第二十一章 信息论的若干问题</b> .....                 | <b>538</b> |
| 1. 消息传输理论概述 .....                           | 538        |
| 2. 在二基数传输理想编码的情况下的基本关系 .....                | 542        |
| 1. 在二基数传输时错误概率的一般关系式 .....                  | 542        |
| 2. 一编码组中有较多单元数目时的错误概率 .....                 | 544        |
| 3. 解码错误概率的分布规律 .....                        | 548        |
| 4. 解码错误概率对各种不同因素的关系的分析 .....                | 552        |
| 3. 具有修正编码体系的抗干扰性 .....                      | 554        |
| 1. 关于在编码组合之间至少有给定数目的单元彼此互不相同, 这些编码的数目 ..... | 555        |
| 2. 单元数目多的情况下, 具有修正编码体系的抗干扰性 .....           | 560        |
| 3. 关于在编码组合之间至少有给定数目的单元彼此互不相同, 这些编码的数目 ..... | 566        |
| <b>附录: 超高频接收放大管和电子器件的主要数据</b> .....         | <b>570</b> |

## 第一章 超高频接收机概论

30兆赫以上的频率称为超高频。与这种频率相应的电磁波称为超短波。波长短于10米的电磁波包括很宽的波段。波长从1米至10米的波叫做米波，从10厘米至1米的波叫做分米波，从1厘米至10厘米的波叫做厘米波，波长短于1厘米的波叫做毫米波。

超高频无线电接收机应用很广。它们已很有效地用于各种各样的雷达装置及超短波无线电通信线路，用于高质量的电视及无线电遥控系统等。

超高频无线电接收机可以根据各种不同的特征来分类。这些特征是：(1)业务种类，(2)所收信号的调制特性，(3)波段，(4)装置地点，(5)接收机的电路等。

根据业务种类，可分为无线电报、无线电电话、电视、雷达、无线电导航接收机，以及用来接收静止图像（传真）、无线电遥控信号的接收机等。

根据所收信号的调制特性，可分为接收振幅及频率键控信号、调制及调频信号、脉冲时间调制信号、脉冲编码调制信号的接收机等。

根据波段，可分为米波、分米波、厘米波及毫米波接收机。

根据装置地点，可分为飞机、轮船、坦克、汽车用接收机以及固定式和移动式接收机。

根据电路，可分为直接放大式、超再生式、超外差式以及二次超外差式（二次变频）接收机。

和长波、中波及短波无线电接收机比较起来，超高频无线电接收机具有许多特点。

首先应该指出，接收超高频时外界干扰的电平通常较低，而接收设备本身的内部起伏噪声起主要作用。这些噪声限制了接收设备可能的总放大率及灵敏度。由于这个理由在制作超高频无线电接收设备

時，對降低設備各部分（電子管、迴路、放大級、變頻器等）的內部噪聲電平給予很大的注意。

超高频無線電接收機的另一特点是頻帶很寬，也就是它們的通頻帶常常很寬，自几百千赫至几十兆赫。選擇這樣寬的通頻帶是由下列兩種情況決定的。第一，由於所收信號的頻譜很寬，在超高频波段內這些信號常常是延續時間約為幾微秒或幾分之一微秒的連續脈沖。第二，在許多情況下超高频接收機中選擇寬的通頻帶是由於這種接收機中存在着各種不穩定因素，以致本机振盪器頻率偏移的絕對值非常大。

超高频接收設備的各部分，在電氣數值及結構數據方面，與長波、中波及短波接收設備的各相應部分大不相同。

超高频波段內廣泛使用長綫段及空腔回路作為振盪回路。為了放大超高频振盪，使用一些特殊的電子管，如“橡實”管、盤封管、行波管。變頻器常用晶體混頻器。在厘米波波段的接收機中，廣泛採用反射式調速管作為振盪管。

超高频接收機的高頻放大器及變頻器的電路也有自己的特點，和波長較長的接收機的相應電路大大不同。

蘇聯及外國科學家進行了許多工作，對超高频接收機及其各個部件作了理論及實驗的研究，對超短波傳播和接收時所發生的各種複雜物理現象也作了定性及定量的研究。這些工作為創制各種各樣用途的新式超高频無線電接收設備奠定了基礎。

在超高频無線電接收的理論和實踐的發展中所取得的巨大成就，和所有蘇聯無線電技術的發展一樣，是共產黨和蘇聯政府不斷關懷的結果。

根據 В.И. 列寧的倡議，在 1918 年所建立的、由蘇聯無線電技術奠基人之一 М. А. 蓬奇-布魯也維奇所領導的尼日哥羅得無線電實驗室，曾進行許多很有價值的工作，這些工作對於超高频無線電接收技術的巨大意義只是在最近才發現，其中有 О.В. 洛謝夫用晶體和金屬絲所構成的接觸偶方面的研究工作（1923 年）及 М. А. 蓬奇-布魯也維奇

用栅极接地的三极管来放大电振荡的工作。

在苏联的许多科学研究院里，有很多无线电专家在工作着，他们正顺利地解决着现代超高频无线电接收技术中的许多复杂任务及问题，这些任务是苏联共产党第二十次代表大会通过的关于超短波广播、无线电接力通信线路、电视、无线电化、超高频无线电技术及电子学等的宏伟发展计划中提出的。

## 第二章 超高频时电子管中的物理现象

### § 1. 电流通过电子管的一般规律

要理解接收放大管在超高频波段内的基本特性，就必须抛开以前关于这些电子管工作的概念。根据以前的概念来看，电子管任一电极外部电路内的电流，是由单位时间内到达电极的电子数目来决定的。而根据现在的概念来看，任何电极的外部电路内的电流是电子管内部电子运动所引起的感应电流和普通的电容性电流的总和。

假定在两个平行的平板电极  $a$  和  $f$  中间分佈着电荷，且在这两电极上加一超高频交流电压（图1）。从电学理论可知，在这种情况下电极间任何一点上总电流密度可用下式表示

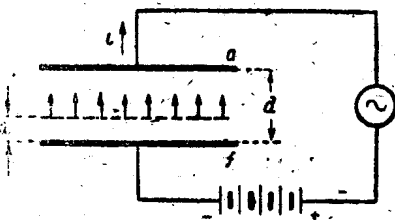


图 1 平板电极，电荷在其间运动

$$j = \rho v + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}, \quad (2.1)$$

式中  $j$  是总电流密度，以  $\frac{\text{安}}{\text{厘米}^2}$  表示；

$\rho$  是电荷的体积密度, 以  $\frac{\text{庫}}{\text{厘米}^3}$  表示;

$v$  是电荷运动的速度, 以  $\frac{\text{厘米}}{\text{秒}}$  表示;

$E$  是电场强度, 以  $\frac{\text{伏}}{\text{厘米}}$  表示;

$t$  是时间, 以秒表示;

$\epsilon$  是介电系数, 在所用单位制中等于  $8.85 \times 10^{-14}$ 。

(2.1)式右边的第一项, 即乘积  $\rho v$  是电荷运动所引起的对流电流密度  $j_K$ ; 第二项  $\epsilon \frac{\partial E}{\partial t}$  是由电场强度  $E$  的变化而引起的位移电流密度。因此, 电极之间任何一点上总电流密度是对流电流密度和位移电流密度的总和。

根据电学理论可知

$$\operatorname{div} j = 0.$$

因为在这种情况下, 总电流密度的矢量  $j$  垂直于电极, 所以上式可写成

$$\frac{\partial j}{\partial x} = 0,$$

式中  $x$  是从确定电流密度的平面到下面平板的距离。

从最后的关系式得出: 电极之间的总电流密度  $j$  与空间坐标  $x$  无关, 而只是时间  $t$  的函数。

至于(2.1)式中的其他变数 ( $\rho, v$  和  $E$ ), 一般说来都是时间  $t$  和坐标  $x$  的函数。

将(2.1)式沿空间坐标  $x$  从 0 到  $d$ , 也就是从下面平板到上面平板积分, 同时考虑到  $j$  值和  $x$  无关, 并以  $d$  除等式的两边, 即得

$$j = \frac{1}{d} \int_0^d \rho v dx + \frac{\epsilon}{d} \int_0^d \frac{\partial E}{\partial t} dx,$$

或

$$j = \frac{1}{d} \int_0^d j_k dx + \frac{\varepsilon}{d} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^d E dx,$$

式中  $j_k$  是对流电流的密度。

这里引用符号

$$\frac{\varepsilon}{d} = C_1,$$

并注意到

$$\int_0^d E dx = u_{fa},$$

式中  $u_{fa}$  是电极  $f$  和  $a$  之间的交流电压，则得

$$j = \frac{1}{d} \int_0^d j_k dx + C_1 \frac{\partial u_{fa}}{\partial t}. \quad (2.2)$$

式中的  $C_1 = \frac{\varepsilon}{d}$  是面积为每平方厘米的电极间的电容量，以  $\frac{\text{法}}{\text{厘米}^2}$  表示。

事实上，平板电容器的电容量  $C$  在静电单位制中（即以厘米表示），可用下式表示：

$$C = \frac{A}{4\pi d},$$

式中  $A$  是每一电极的表面面积，以厘米<sup>2</sup>表示。

$d$  是两平板间的距离，以厘米表示。

电容密度若以电极每平方厘米面积上的厘米数表示时，即为

$$C_1 \left[ \frac{\text{厘米}}{\text{厘米}^2} \right] = \frac{C[\text{厘米}]}{A[\text{厘米}^2]} = \frac{1}{4\pi d[\text{厘米}]},$$

或以每平方厘米若干法表示时，即为

$$C_1 \left[ \frac{\text{法}}{\text{厘米}^2} \right] = \frac{1}{9 \times 10^{11}} \frac{1}{4\pi d[\text{厘米}]} = \frac{8.85 \times 10^{-14}}{d[\text{厘米}]}.$$

从这个关系式还可以看到上述假定的正确性，因为在所选择的单位制内介电系数  $\epsilon = 8.85 \times 10^{-14}$ 。

(2.2)式的两边乘以每一电极的面积  $A$ ，得

$$i = \frac{1}{d} \int_0^d i_k dx + C \frac{\partial u_{fa}}{\partial t}, \quad (2.3)$$

式中  $i = jA$  是电极间的总电流，等于外部电路的电流；

$i_k = j_k A$  是通过所取的电极间截面的对流电流；

$C = C_1 A$  是电极间的总电容量。

显然，(2.3)式右边的第二项就是普通的电容性电流。当电极间没有电荷存在时，外部电路的电流将等于这电容性电流。而第一项由电极间的电荷运动所引起的电流就是感应电流。

从(2.3)式可以看出：电极间加有交流电压，并在电极间有电荷运动时，外部电路的总电流等于感应电流和电容性电流的总和。

## § 2. 运动电荷感应电流的定律

感应电流基本理论（或肖克莱-拉莫理论）内称：假如一个点电荷  $e$  在接地电极的系统内（图 2, a）以速度  $v$  运动，则在任一电极  $A$  的电路内所感应电流的瞬时值  $i$  将为

$$i = E_v e v, \quad (2.4)$$

式中  $E_v$  是电场强度沿速度方向的分量，而这电场是在下列条件下位于电荷所在点的电场：（1）电荷被移离，（2）电极  $A$  上的电位等于 1，（3）所有其他电极都接地（图 2, b）。

我们从能量的关系来证明这个定理。把电阻  $R$  接到电极  $A$  的电路中（图 2, b）。那么，这个电极的电位将等于  $-iR$ 。在电荷移离电极  $A$  和所有其他电极都接地的条件下，这电位在该电荷所在点上所产生的沿速度方向的电场强度分量将为  $-iRE_v$ 。于是作用于电荷  $e$  上的力将为  $-iRE_v e$ ，而该力在单位时间内所作的功（即功率）则等于



$$\frac{-iRE_v e ds}{dt}$$

式中  $ds$  是电荷  $e$  在时间  $dt$  内所移动的距离。

設  $\frac{ds}{dt} = v$ , 并改变上式的符号, 我們得到电荷运动时所損耗的功率为

$$P = iRE_v ev,$$

因为这功率消耗于电阻  $R$  上, 所以  $P = i^2 R$ 。使求得的兩功率公式相等, 并以  $iR$  除等式的兩边, 即得

$$i = E_v ev,$$

这就是所要证明的定理。

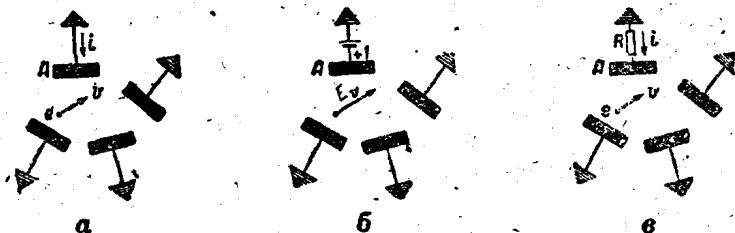


圖 2 有点电荷在其中运动的接地电极系統

我們利用感应电流的定理来計算两个平行平板电极系統中的电流的大小, 設在这兩电极間有电荷  $e$  以速度  $v$  沿垂直于电极的方向运动 (圖 3, a)。把电荷  $e$  移去, 將下面电极接地, 而使上面电极的电位等于  $+1$  伏, 則得出沿速度方向的电场强度  $E_v$  为

$$E_v = -\frac{1}{d}$$

式中負号是因为速度  $v$  和电场强度  $E_v$  的矢量方向相反。假如把圖 3, a 箭头所指的方向当作电流  $i$  的正方向, 則根据已証明的定理

$$i = \frac{ev}{d} \quad (2.5)$$

假如运动的电荷不是点电荷, 而是分佈在平行于电极 1 及 2 的平面 3 上 (圖 3, b), 那么可以把电荷分为許多小單元, 并把 (2.5) 式应