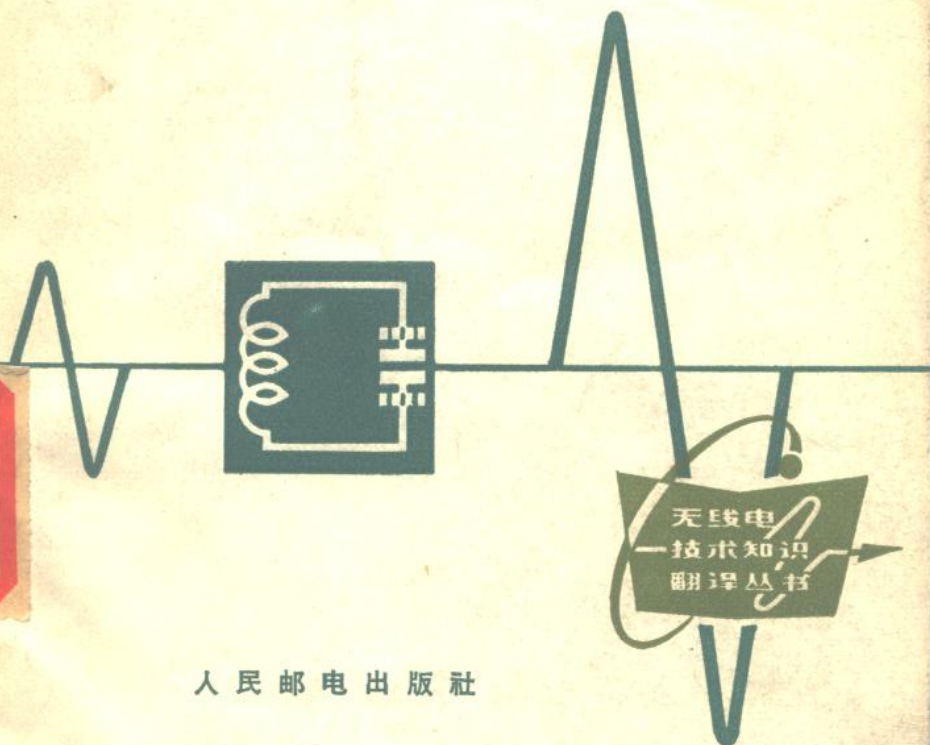


参量放大器

苏联 C. B. 貝尔卓夫著

丁佳良译

馬秉鉅校



人民邮电出版社

73.45573
297

参 量 放 大 器

苏联 C. B. 貝尔卓夫 著

丁 佳 良 譯
馬 秉 鋐 校

人 民 郵 電 出 版 社

С. В. ПЕРЦОВ
ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
1962

内 容 提 要

本书说明参量放大器工作的物理原理，特别着重于叙述最有前途的晶体二极管参量放大器。书中也讨论了晶体二极管 $p-n$ 结可变电容的获得机理；对参量放大器进行了分类，并讨论了一些主要类型的二极管参量放大器。书内还给出参量放大器基本特性的资料，指出它们用于各种无线电技术系统的接收设备中的可能性。

本书对象为有一定基础的无线电爱好者。

参 量 放 大 器

著 者：苏联 С. В. 貝 尔 卓 夫
譯 者：丁 佳 良
校 者：馬 秉 鋸
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许可证出字第〇四八号)
印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂
发行者：新 华 书 店

开本 787×1092 1/32 1964 年 7 月北京第一版
印张 2 页数 32 1964 年 7 月北京第一次印刷
印刷字数 45,000 印数 1—8,400 册

統一书号：15045·总1402—无394

定价：(科 4) 0.24 元

引 言

假若沒有象无綫电技术和电子学这些重要科学部門的全面發展，近年來科学的飞速进步便是不可思議的。建造和发射人造地球卫星以及星际宇宙火箭，就向无綫电技术提出了一系列十分重要的問題：实现与远离地面站几百万公里的客体进行无綫电通信，以及監視和获得从該客体发出的必要信息等等許多問題。由于装在发射到宇宙中去的客体上的发射設備功率和无綫电技术設備的天綫系統的尺寸受到限制，因而，对于在控制宇宙火箭飞行的系統中所采用的接收設備的质量提出了更高的要求。首先是要提高接收机的灵敏度。要知道，宇宙客体发射的信号功率只有 10^{-19} 瓦左右，或者还要低一些。

还有許多无綫电技术系統也必須放大极其微弱的信号。例如，用人造地球卫星作为无源或有源轉播器进行超短波的超远距离通信就需要放大极其微弱的信号。計算証明，当利用功率为 85 千瓦、頻率为 2000 兆赫的发射机，而卫星的飞行高度为 5000 公里时，可以同几万公里以外的地方进行暢通的联系。这时，在接收地点的信号功率不超过 10^{-15} 瓦。

当利用对流层散射实现通信时，或者在超远距离电视接收中，在无綫电中继綫路、雷达、无綫电天文学以及其它許多部門中，同样也会遇到接收很微弱信号的問題。

上述各通信系統絕大部分是工作在超短波波段。因此，在实际实现这些系統时，一个很重要的問題は制造能够接收微弱信号的无綫电接收設備，这个要求与提高接收机极限灵敏度的要求是等价的。不久以前还认为，对于米波波段，特别是对于厘米波段來說，這個問題是极复杂的。然而，近几年来制造出

了一些低噪声放大器，其工作原理完全是新的。属于低噪声放大器的首先是参量放大器、分子放大器和行波管。利用这种放大器作为特高频接收设备的输入级，能够显著地改善接收设备的主要质量指标，其中包括能够实现很高的极限灵敏度，接近于理论上的可能值。

本书中讨论一种最有前途的放大器，即晶体二极管参量放大器的构造、工作原理和主要特性。

00000

目 录

引言

无线电接收设备的噪声系数和极限灵敏度	1
低噪声特高频放大器	5
参量放大	7
参量放大器中应用的晶体二极管	13
单回路参量放大器	20
双回路参量放大器和放大-变频器	33
参量放大器的主要特性	43
参量放大器的应用前途	51
参考文献	59

无綫电接收設備的噪声系数和 极限灵敏度

极限灵敏度是无綫电接收設備的一个最重要的参量，它表征該設備在由天綫和接收机固有噪声造成干扰的条件下接收弱信号的能力。当接收机輸出端上的有效信号功率等于接收机和天綫的固有噪声功率时，天綫上信号功率（或电动势）的大小定义为接收机的极限灵敏度。在大多数接收系統中，为了能可靠地接收，輸入端的信号功率應該比无綫电接收設備的极限灵敏度的数值大一定倍数。因此，接收設備和天綫的固有噪声值愈小，則該設備接收弱信号的能力就愈强，因而它的极限灵敏度也就愈高。

噪声系数和噪声温度 接收設備中，产生固有噪声的源泉主要有两个：接收机（包括振荡迴路的損耗电阻在內）輸入电路中的噪声（电起伏）和主要由散粒效应引起的电子管的噪声。

輸入电路中的噪声是由自由电子的不規則热运动所引起的，而任何导体中都具有自由电子。由于热运动的不規則性，导体內电子分布的均匀性在个别时刻就要遭到破坏，因此在导体（电阻）两端产生一个起伏噪声电动势，它随时間作不規則的变化。

电子管的噪声由它的板极电流的脉动引起，因为在同样時間內，从阴极飞出的电子数目不等于决定板极电流强度的这些电子数目的平均值。这种現象称为散粒效应，由它引起的噪声称为散粒噪声。

接收机的天綫也是一个噪声源。天綫的噪声不仅决定于它

的純电阻的热噪声，而且还决定于一些其它原因，其中最重要的是天綫接收局外电磁振荡和周围媒质的热輻射等。因而，天綫不仅是一个有效信号源，而且同样也是个噪声源。

表征无綫电接收設備噪声性质的量是噪声系数。图 1 的綫路能够說明这个量的含义。額定功率为 $P_{c.BX}^*$ 的有效信号和額定功率为 $P_{m.BX}$ 的噪声由天綫加到（无綫电接收設備）放大級的輸入端。放大器輸出端信号和噪声的額定功率由 $P_{c.BMX}$ 和 $P_{m.BMX}$ 两个量表征。

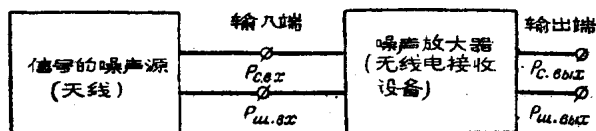


图 1 信号和噪声通过无綫电接收設備的情形

噪声系数这个量表明了信号和噪声的額定功率比值在从上述（无綫电接收設備）放大級的輸入端传到輸出端时变化了多少：

$$III = \frac{\left(\frac{P_c}{P_m}\right)_{BX}}{\left(\frac{P_c}{P_m}\right)_{BMX}}. \quad (1)$$

如果放大級沒有固有噪声，則輸入端和輸出端信号与噪声的額定功率比值應該相等，故噪声系数等于一。然而，由于放大設備的噪声，輸出端总的噪声功率比放大后的信号源之噪声功率要大一些，超出的部分就等于放大器固有噪声的数值。这导致輸出端比值 P_c/P_m 的减小，噪声系数就是这种减小的一

* 一个信号源給予匹配負載的功率称該源的額定功率。

个量度。由噪声系数的定义可知，它是一个无量纲的量。然而，常常利用下列关系式：

$$III(\text{分貝}) = 10 \lg III. \quad (2)$$

表示成分貝*。

噪声系数表征同信号源合在一起的接收设备的性能。为了表征放大级固有的噪声性质，常常采用“噪声温度”¹的概念。噪声理论中推出的一个公式说明利用这一概念来表征系统的噪声性质是合理的。根据噪声理论，电阻的噪声额定功率与电阻数值无关，而仅决定于它的温度和它与测量设备相连接的电路的通频带：

$$P_m = kTB, \quad (3)$$

其中 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ 焦耳/度——玻尔兹曼常数；

T ——电阻的绝对温度，即凯尔文温度 ($T = 273^\circ + t$ ，这里 t 是摄氏温标的度数)；

B ——通频带，赫（一般它是一个常数，因此电阻的温度完全决定了它的噪声性质）。

通常在计算噪声时都认为，电阻处在室温中。这样， $T = T_0 = 273 + 20 = 293 \approx 300^\circ$ 绝对温标 (300°K)。在所有计算中， T_0 这个量取作标准噪声温度。

如果同某一级（这一级在电性质上与我们所研究的放大级相同，但是没有噪声）的输入端相连接的纯电阻加热到某一温度，使得在输出端仍能获得实际放大级给出的噪声功率，则这个温度就称为放大级的噪声温度 T_m 。

噪声温度与噪声系数之间有一简单的关系式：

* 关于分贝的定义和用途可参阅：方波，一个奇怪的单位——分贝，无线电，4(1963)，7、8。——译者注。

¹ 有时也用“有效温度”代替“噪声温度”。

$$T_m = T_0(III - 1). \quad (4)$$

表 1 中列举了不同频率范围内无线电接收设备的噪声系数和噪声温度的典型值。一般，噪声温度的概念同样可以用来表征天线的噪声性质。

表 1

频 率 (兆赫)	III	III(分貝)	$T_m(^{\circ}\text{K})$
30	2—5	3—7	300—1 200
60	4—6.5	6—8	900—1 650
100	6.5—16	8—12	1 650—4 500
600	10—32	10—15	2 700—9 100
3 000	15—100	12—20	4 200—30 000
10 000	15—150	12—22	4 200—45 000

无线电接收设备的极限灵敏度决定于它的噪声系数和天线的噪声温度：

$$P_{np} = k T_0 B(III + t_a - 1), \quad (5)$$

其中 $t_a = \frac{T_a}{T_0}$ ——天线的相对噪声温度；

T_a ——天线的噪声温度 (T_a 往往要比天线的实际温度大许多，这是由于天线接收局外电磁振荡的缘故)。

从关系式 (5) 看出，为了提高极限灵敏度，应尽可能地降低系统的噪声系数。根据实际计算中所许可的精确度，我们将认为无线电接收设备的噪声系数决定于它的前两级的噪声：

$$III = III_1 + \frac{III_2 - 1}{K_{p1}}, \quad (6)$$

其中 III ——设备的总的噪声系数；

III_1 ——第一级的噪声系数；

III_2 ——第二級的噪声系数；

K_{p1} ——第一級的額定功率放大系数。

从关系式 (6) 看出，当第一級的放大系数足够大时，噪声系数表达式中的第二項可以忽略。这时 $III \approx III_1$ ，即系統的噪声系数将由它的第一級（輸入級）的噪声系数来决定。因此，为了提高特高频接收设备的极限灵敏度，必須采用放大系数足够大的低噪声放大器作为輸入級。

电子管放大器在特高频范围内已不能滿足这个要求。电子管放大級的噪声系数随着频率的升高而急剧增大（参閱表 1），而它的放大系数則由于板-阴极和栅-阴极間寄生电导的增加而降低。因此，直到目前为止，分米波段和厘米波段的接收机是沒有射頻放大級的。因为这种设备的第一級一般是噪声系数較大（約为 10—20）而額定功率传输系数很小的（0.15—0.30）变频級。这时，接收设备的噪声系数很大，而极限灵敏度很坏。

由于散粒噪声按其本质来說是与电子管的工作机构有关，要想靠合理地設計电子管的方法来显著地降低特高频电子管的噪声，那是不可能的。提高特高频接收机灵敏度的唯一方法就在于研制一种工作原理嶄新的放大设备。

低噪声特高频放大器

建造低噪声的特高频放大器的必要性导致最近研制出一批新型的放大设备。属于这些设备的有量子或者分子放大器、参量放大器 (ПЧ) 和行波管 (ЛБВ)。

表 2 中列出的参量，說明利用这些器件作为特高频放大器的可能性。

表 2

行 波 管			分 子 放 大 器			参 量 放 大 器			
頻 率 (千兆赫)	放大 系数 (分貝)	噪 声 溫 度 (°K)	頻 率 (千兆 赫)	放大 系数 (分貝)	噪 声 溫度 (°K)	頻 率 (千兆 赫)	放大 系数 (分貝)	噪 声 溫度 (°K)	放大器 冷却时 的噪 声 溫度 (°K)
1—2	25	1 500—3 000	2.8	30	25	3.1	20	100	50
1.1—1.4	27	1 200							
2.5—3.5	25	1 000	5.5	28	28	5.84	16	100	—
2—4	28	1 600—3 300	9	30	65	6	18	150	44
9	20	4 500				6	18	65	21
						9.37	17	500	—
						11.5	10	400	—

注：1. 用分貝表示的功率放大系数由下式决定： $K_p(\text{分貝}) = 10 \lg K_p$ 。

2. 冷却是降低参量放大器噪声的方法之一。表中给出的是相当于冷却到液态氮的温度($T \approx 87^\circ\text{K}$)时的数据。

3. 表内的资料是从国外文献中摘录下来的。

从表中看出，分子放大器在特高频范围内具有最小的噪声电平。然而，在参量放大器加以冷却的情形下，参量放大器和分子放大器的噪声温度具有相同的数量级。比较一下低噪声放大器和特高频电子管的噪声特性，就能够对我们所研究的设备的优点有明确的了解。

采用低噪声放大器作为特高频无线电接收设备的输入级时，能够显著地改善它的噪声特性，因而就能够把它的极限灵敏度提高一至两个数量级。当接收设备中采用低噪声放大器时，表征接收设备的噪声温度值如图 2 所示。

分子放大器的许多缺点阻碍了它的广泛应用。这些缺点中最严重的是：结构复杂而笨重；必须采用价值昂贵的磁系统；在功率脉冲信号通过后恢复时间长；必须冷却到液态氮的温度等等。

对极限灵敏度要求很高的接收系统中,使用行波管也受到限制,这是由于行波管具有足够高的噪声电平的緣故(最好的行波管的噪声温度也不低于 $800-900^{\circ}\text{K}$);而且,这种噪声本质上就是电子管的散粒噪声,是不能予以消除的。此外,行波管的体积和重量都很大,而效率很低。因此,参量放大器是最有前途的,它既消除了分子放大器所固有的缺点,而在噪声特性方面又比行波管要好得多。

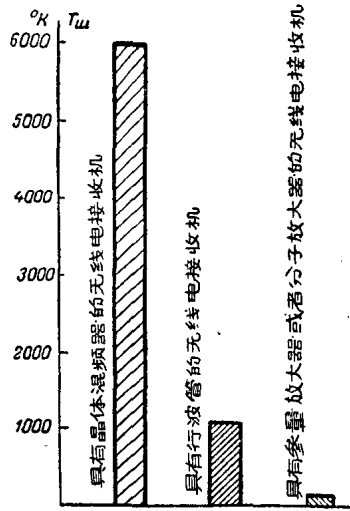


图2 普通无线电接收设备和输入端为低噪声放大器的系统的噪声特性比较图

参量放大

参量放大器的放大机构与一般电子管或者晶体管放大器的放大机构有很大的区别。电子管或者晶体管放大器是由于输入信号控制器件中的恒定电子流而产生放大。这点可用图3,a加以说明。这里,频率为 ω_1 的输入信号用它的功率 $P_{\text{BX}}(\omega_1)$ 表征;放大所必须的能量由功率为 P_{e} 的直流电源供给;放大后的信号 $P_{\text{BIX}}(\omega_1)$ 从输出端取出。这种放大机构几乎永远固有一种由散粒效应所引起的高的噪声电平。

在参量放大器中,放大是由于迴路中的一个电抗性元件(电容或者电感)随时間作周期性的变化而产生的。参量放大器

的主要部件是一个储能装置，它的电抗值靠频率为 ω_3 的本机振荡器供给的高频能量而周期性地改变。一般说来，本机振荡器的频率 ω_3 与输入频率 ω_1 不相等(图 3, б)。

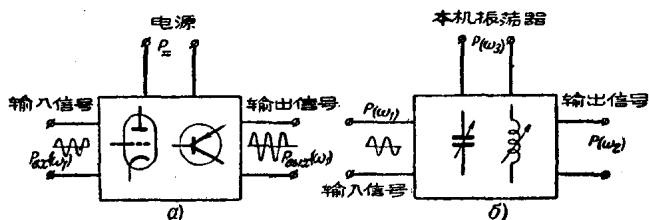


图 3 两种不同的放大机构的比较
а—电子管或者晶体管放大器；б—参量放大器

下面将证明，在一定的条件下，借助电抗值的这种周期性变化，可以实现放大所必须的能量传递，即把能量从本机振荡器传递到放大器回路中。因此，参量放大器与一般放大器所不同的是，放大所须的能量不是以直流能量的形式供给，而是以高频电磁振荡的形式供给。在输出端放大后的信号频率为 ω_2 。一种类型的参量放大器的 ω_2 就等于输入信号的频率 ω_1 ；而另一种类型的参量放大器的 ω_2 则是本机振荡器和输入信号的频率之和 $\omega_3 + \omega_1$ ，或是它们之差 $\omega_3 - \omega_1$ 。

由于上述放大机构中没有电荷的传输过程，因此参量放大器中也就不存在散粒效应，而它恰恰是普通放大器中的主要噪声源。参量放大器中的主要噪声源是可控元件（例如电容）的固有噪声。如果制造元件的工艺合适，则这种噪声可以比其它的特高频放大设备的固有噪声低得多。

所以取参量放大器这个名字，正如上面已经指出的，是因为其中通过改变振荡回路的一个电抗参量的方法而产生放大。有一些文献中，参量放大器也称为“可变电抗放大器”、“电抗

性放大器”等等。

利用对电系统的参量激励来产生和放大无线电信号的思想是由苏联学者 Л. И. 孟台斯坦和 Н. Д. 巴巴列克西在本世纪三十年代首先提出的。他们曾建立了参量放大和激励（再生）的严谨理论。但是，因为这些工作都是属于普通的频率范围内的，对于噪声系数的数值的要求不高；此外，那时还没有小型的、能够在高频范围内工作的可变电抗元件，因此参量放大器没有得到推广。

无线电技术新的领域的发展，及因此而向特高频频段过渡，都导致了在这一频段内制成低噪声接收系统的必要性。与此同时，又研制出了晶体二极管和铁淦氧，这些器件可以成功地用作参量系统的可控电抗元件。

参量放大机理 为了说明参量放大器工作的物理原理，我们来研究一下图 4, a 所示的振荡回路，该回路由电感 L 和电容器 $C(t)$ 组成，而其电容量可以随它的一块极板的位移而改变。电阻 R 表示回路中的电阻损耗。

我们假设，把一个频率为 f 的正弦小信号电压加到回路。这时，电容器两块极板上的电压和电荷将按正弦规律变化（图

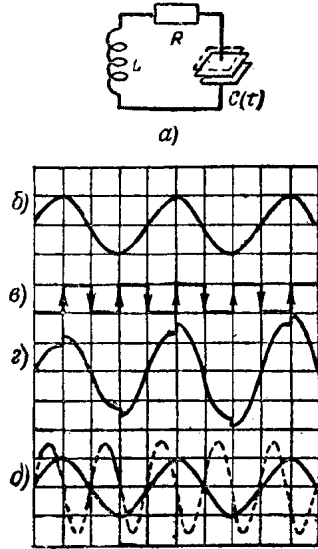


图 4 描述参量放大器内工作过程的图形

a —振荡回路，其电容量 $C(t)$ 随时间变化； b —电容器上待放大信号的电压； c —电容器极板的机械位移； d —参量放大过程中，电容器上电压的增大情形； d —待放大信号电压和波泵电压（图中虚线所示）之间的最佳相位关系

4,б)。为了得到放大,当电容器上的电压为最大值时,把两块极板拉开;而当它上面的电压等于零时,把它们推近。表征电容器极板机械位移的曲线如图 4,б 所示。因为电容器上的电压在一个周期内两次达到最大值(正的最大值和负的最大值——译者注),故与图 4,б 相符,极板机械位移的频率应该等于待放大信号频率的两倍。由于电容器极板之间存在着电场,所以需要作一定的机械功来克服极板之间由异性电荷引起的引力。由于极板是当电容器上的电压(也即电容器内的电场)等于零的时刻靠近的,因此,这时没有作任何机械功,也就不损耗能量。根据能量守恒定律,极板拉开时消耗的机械能量转化为电容器中电场的能量,这就引起电容器上待放大信号电压的增大(图 4,в)。因此,当上述电容量突变时,能量便从外部能源送入回路。传送给电场的能量的值与电容器容量改变的大小成正比。电容器上的电压增长到回路中的电阻上消耗的功率等于所作的机械功时为止。应该指出,上述过程中,回路内的能量每半个周期都得到补充,也就是说,好象以两倍于信号的频率将能量送入回路。

用数学方法可以很简单地说明我们上面讨论的过程。大家知道,电容量为 C 的电容器充电至电压 U ,则电容器电场中所储存的能量 E 由下式表示:

$$E = \frac{U^2 C}{2}. \quad (7)$$

这时,电容器极板间相互吸引的机械引力

$$F = \frac{E}{d},$$

其中 d ——两块极板间的距离。

为了把极板拉开 Δd 的距离,应该作的功是

$$\Delta A = F \Delta d = E \frac{\Delta d}{d}.$$

这个功轉化为电容器电場的位能。

电容器的电荷和它上面的电压之間的关系由下式表示:

$$q = UC,$$

其中 q ——电容器上的电荷。

因此, 关系式(7)可以改写为:

$$E = \frac{q^2}{2C}. \quad (8)$$

另一方面, 电容器的电容

$$C = \frac{\epsilon S}{d}, \quad (9)$$

其中 ϵ ——介质的介电常数;

S ——极板的面积;

d ——两块极板間的距离。

将式(9)代入式(8), 便得以下的形式:

$$E = \frac{q^2 d}{2\epsilon S}. \quad (10)$$

当改变两块极板間的距离时, 电容器电場的能量就得到一个增量

$$\Delta E = \frac{q^2}{2\epsilon S} \Delta d = \frac{q^2}{2C} \cdot \frac{\Delta d}{d} = E \frac{\Delta d}{d}, \quad (11)$$

它就是等于把极板拉开时所作的功 ΔA 。

因而, 能量 ΔE 消耗于拉开已充电的电容器极板。可以証明, 这时电容器上的电压要增大。我們用符号 U_1 表示拉开前电容器极板上的电压, 而用符号 U_2 表示将极板拉开 Δd 以后其上的电压。注意到关系式(9)