

行波管与速调管的离子噪声分析

巩华荣¹, 官玉彬¹, 王文祥¹, 唐昌建², 魏彦玉¹, 黄民智¹

(1. 电子科技大学物理电子学院 成都 610054; 2. 四川大学应用物理学院 成都 610051)

【摘要】从波动理论与运动学理论出发, 采用小信号近似, 分析了行波管与速调管中的离子噪声现象, 推导出基于离子张弛振荡引起的相位噪声表达式, 并对离子噪声形成的相位噪声特性进行分析, 指出随着电位波动的幅度增大, 相位噪声同时增加; 载波信号频率越高, 相位噪声越高。

关键词 相位噪声; 速调管; 行波管; 离子振荡

中图分类号 O441.4 **文献标识码** A

Analysis of Ion Noise in TWTs and Klystrons

GONG Hua-rong¹, GONG Yu-bing¹, WANG Wen-xiang¹, TANG Chang-jian², WEI Yan-yu¹, HUANG Min-zhi¹

(1. School of Physical Electronics, UEST of China Chengdu 610054; 2. College of Applied Physics, Sichuan University Chengdu 610051)

Abstract Ion noise of TWTs and klystrons are analyzed using small signal method by motion theory and moment theory. The relationship between phase noise and signal frequency, voltage fluctuation are obtained. From the analysis results we find when the amplitude of voltage fluctuation and signal frequency increase, the phase noise would increase.

Key words phase noise; traveling wave tube; klystron; ion oscillation

速调管与行波管作为大功率微波真空器件, 广泛应用于通信、雷达、电子对抗、遥感等领域。但是和所有真空器件一样, 管子不可能处于绝对的真空中, 总是带有少量的残余气体。电子束碰撞电离这些背景气体, 会产生正离子, 其空间电荷效应会改变电子束的状态, 进而影响到电子束与波的互作用, 使信号产生振幅与相位(特别是相位)的周期性扰动, 这种扰动被称为离子噪声, 有时也称为相位噪声^[1]。

随着通信技术与探测技术的进步, 对信号源稳定性的要求也相应提高, 微波管的相位噪声研究已成为大功率微波领域的研究热点。许多文献对由离子张弛振荡引发的相位噪声做了详细的研究^[1~4], 但大多数的研究集中于离子噪声的物理机理, 特别是离子的产生、运动及其对电子束的影响。而对波本身特别是低频噪声调制到高频信号的过程的研究还远不完善。本文基于小信号近似, 从波动理论与运动学理论出发, 分别研究了离子振荡对行波管与速调管的输出信号的影响, 并分析了输出信号的频谱特性与相位特性。

1 理论分析

1.1 相位噪声的起源

微波管的相位噪声在其诞生之初就为人们所注意, 但在很长时间内都没有很清晰的阐释, 不过大多数研究都认为与电子束的脉动起伏有关。离子噪声的重要特点是频率很低, 一般在几兆赫兹, 有时可达到低声频以至超低声, 这样低的频率是无法由微波谐振电路产生的, 也远低于管子内的任何等离子体振荡频率,

收稿日期: 2004-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60271001;10276011); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目

作者简介: 巩华荣(1977-), 男, 博士生, 主要从事物理电子学方面的研究。

近似于张弛振荡。具体的物理过程大致如下: 电子束由于非平衡的布里渊聚焦而产生了沿轴向的脉动, 由于空间电荷效应, 在轴线产生了静电势阱。由电子束碰撞产生的正离子被俘获在势阱中, 当填充到一定程度, 电子束聚焦状况会发生变化, 势阱向阴极移动, 离子随之被释放, 打在阴极上, 这一过程周期性地反复进行。在离子被俘获、逃逸、再俘获的过程中, 沿轴线静电势阱要相应发生变化, 使电子束的轴向速度改变, 再与高频场相互作用, 形成输出信号的噪声。

1.2 行波管相位噪声分析

从行波管的小信号近似出发, 根据波动理论, 可得到行波管的特征方程:

$$j \frac{KI_0}{2V_0} \frac{\beta_e \Gamma_0 \Gamma^2}{(\Gamma_0^2 - \Gamma^2)(j\beta_e - \Gamma)^2} = 1 \quad (1)$$

式中 K 为耦合阻抗, 单位为欧姆。 I_0 为电子束电流; V_0 为电子束电压, 单位为 V ; $\beta_e = \omega/v_0$ 为电子相位常数; Γ 为慢波线上传播的纵向电场的传播常数; 即“热”波的传播常数; Γ_0 为慢波结构的等效传输线常数; 即“冷”波的传播常数。

引入离子后, 电子束电压在漂移管区已不是常数, 而产生了低频波调制, 其形式可写为:

$$V = V_0(1 + \Delta V \cos(\Omega t - \beta_1 z)) \quad (2)$$

式中 V 为沿漂移管轴向的电子束电压, ΔV 为电压波动幅度, Ω 为波动周期, β_1 为扰动波的传播因子, $\beta_1 = 2\pi/\lambda$, λ 为电子束包络的脉动波长, 取决于电子枪与聚焦系统。定义:

$$C^3 = \frac{KI_0}{4V_0} \quad (3)$$

式中 C 为增益参量, 令 $a = 1 + \Delta V \cos(\Omega t - \beta_1 z)$, 则式(1)变为:

$$\frac{(\Gamma_0^2 - \Gamma^2)(j\beta_e - \Gamma)^2}{j\beta_e \Gamma_0 \Gamma^2} = 2C^3 a \quad (4)$$

电子束电压的扰动很小, $\Delta V < 0.01V$, $q \approx 1$ 。运用小信号近似, $\Gamma_0 = j\beta_e$, $\Gamma = j\beta_e - \beta_e Ca\delta$, $\beta_e Ca\delta \ll 1$, 解得增长波传播常数为:

$$\Gamma = -\frac{\sqrt{3}}{2} \beta_e Ca^{1/3} + j\beta_e \left(1 + \frac{C}{2} a^{1/3}\right) \quad (5)$$

令:

$$q = a^{1/3} = (1 + \Delta V \cos(\Omega t - \beta_1 z))^{1/3} \approx 1 + \frac{\Delta V}{3} \cos(\Omega t - \beta_1 z)$$

增长波的输出电场可表示为:

$$E = \frac{1}{3} E_{in} \exp(j\omega t) \exp\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \beta_e C q z\right) \exp\left(-j\left(\beta_e + \frac{1}{2} \beta_e C q\right) z\right) \quad (6)$$

式中 E_{in} 为输入信号($z=0$ 处)的电场。

由上式可见, 电位的低频扰动被调制到高频载波频谱附近的, 输出信号的幅度与相位均产生了畸变, 说明离子噪声不仅包含相位噪声, 同时也包含幅度噪声。为分析离子噪声的频谱特性, 令:

$$m_a = \frac{\sqrt{3}\Delta V}{6} \beta_e C z \exp(-j\beta_1 z), \quad m_p = \frac{\Delta V}{6} \beta_e C z \exp(-j\beta_1 z),$$

式(6)可写为:

$$E \equiv E_0 \left(\exp(j\omega t) + \frac{m_a + jm_p}{2} \exp(j(\omega + \Omega)t) + j \frac{m_a^* + jm_p^*}{2} \exp(j(\omega - \Omega)t) \right) \quad (7)$$

式中 $E_0 = \frac{1}{3} E_{in} \exp\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \beta_e C z\right) \exp\left(-j\left(\beta_e + \frac{1}{2} \beta_e C z\right) z\right)$ 。由上式可知, 噪声频谱在载波的两侧对称分布, 它是一种单频噪声, 这里忽略了调制信号的高次谐波。

1.3 速调管离子噪声分析

为使物理过程明晰, 仅考虑双腔速调管, 根据运动学理论与小信号近似, 群聚电流的交变分量为:

$$i = I_0 X \exp(j\omega t - j\theta_0) \quad (8)$$

式中 I_0 为直流电子束电流; $X = \frac{1}{2} M \frac{V_{in}}{V_0} \frac{\omega z}{v_0}$ 为群聚参量; V_{in} 为输入间隙高频电场幅值; V_0 为电子束电压;

M 为间隙耦合系数; ω 为高频场角频率; v_0 为电子直流速度; $\theta_0 = \frac{\omega z}{v_0}$, 为直流渡越角。

考虑离子噪声后, 电子束在漂移空间速度要受到低频电压扰动波的调制。同样假设电压波动由(4)式表示, 则根据 $\frac{1}{2} m v^2 = eV$, 直流速度就有了低频扰动, 形式变为 $v = v_0(1 + \Delta v \cos(\Omega t - \beta_1 z))^{1/2}$, 其中 $\Delta V = \Delta v$ 。群聚电流成为:

$$i = I_0 \frac{1}{2} M \frac{V_{in}}{V_0} \frac{\omega z}{v_0} \left(1 - \frac{1}{2} \Delta v \cos(\Omega t - \beta_1 z) \right) \exp \left(j\omega t - j \frac{\omega z}{v_0} \left(1 - \frac{1}{2} \Delta v \cos(\Omega t - \beta_1 z) \right) \right) \quad (9)$$

与行波管相同, 电位的低频扰动被调制到高频载波频谱附近, 且噪声频谱在载波的两侧对称分布。

2 相位噪声表达式

2.1 行波管

根据信号调制理论将式(7)化为:

$$E = E_0 \left(1 + \frac{\sqrt{3}\Delta V}{6} \beta_e C z \cos(\Omega t - \beta_1 z) + j \frac{\Delta V}{6} \beta_e C z \cos(\Omega t - \beta_1 z) \right) \quad (10)$$

式中 $E_0 = \frac{1}{3} E_{in} \exp \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \beta_e C z \right) \exp \left(j\omega t - j \left(\beta_e + \frac{1}{2} \beta_e C z \right) \right)$ 相位噪声表达式为:

$$K_p^T = \overline{\left(\frac{\Delta V}{6} \beta_e C z \cos(\Omega t - \beta_1 z) \right)^2} = \left(\frac{\Delta V}{12} \beta_e C z \right)^2 \quad (11)$$

可见相位噪声除了和电位波动幅度直接有关外, 还与管子互作用长度、增益参量、电子波传播常数有关。

2.2 速调管

同理式(9)化为:

$$i = I_0 \frac{1}{2} M \frac{V_{in}}{V_0} \frac{\omega z}{v_0} \left(1 - \frac{1}{2} \Delta v \cos(\Omega t - \beta_1 z) + j \frac{1}{2} \frac{\omega z}{v_0} \Delta v \cos(\Omega t - \beta_1 z) \right) \exp \left(j\omega t - j \frac{\omega z}{v_0} \right) \quad (12)$$

相位噪声为:

$$K_p^K = \left(\frac{1}{4} \frac{\omega z}{v_0} \Delta v \right)^2 \quad (13)$$

3 数值计算

以Ku波段行波管为例, 计算相位噪声的数值, 管子主要参数为: 阴极电压-4.92 kV, 电流为0.177 A, 工作频率取14 GHz, 28 GHz, 42 GHz, 耦合阻抗分别为32.625 Ω 、1.161 Ω 、0.061 Ω 。电压波动幅度 ΔV 取0~0.01V, 相位噪声单位取dBc/Hz, 计算结果如图1所示。

以DX124中功率双腔速调管为例, 计算速调管相位噪声, 管子参数为: 阴极电压-10 kV, 电流为0.2 A, 工作频率取8.5 GHz, 9.5 GHz, 10.5 GHz, 电压波动幅度 ΔV 取0~0.01V, 下面是相位噪声单位取dBc/Hz。

从上面两只管子可知, 随着电位波动幅度的增大, 相位噪声也同时增加, 但增长幅度随 ΔV 的增加有所减缓。此外相位噪声与与载波频率有关, 信号频率越高, 相位噪声越大。对于消除离子噪声来讲, 电位波动幅度涉及到管子结构设计、聚焦磁场与残余气体的种类。

文献[5]提出了相位噪声的另一种表达式, 计算最大相位角偏移, 利用推导出的相位噪声表达式, 可以很容易地得到相位角偏移。文献[5]还提出一种消除离子噪声的方法, 这种方法是在假定离子噪声引起的是电压振荡而非波动, 沿轴电位点各自的振动幅度成正弦变化, 电位的波动成为驻波的条件上提出的, 这时

只要将波的输出窗口选在波节附近, 就可以消除离子振荡。但是考虑到正离子的逸出方式是轴向逸出, 逸出的过程中由于聚焦作用使电子束脉动相应平移, 因此造成的电子束波动应该是行波而非驻波, 因此这种消除离子噪声的方法也是不能成立的。

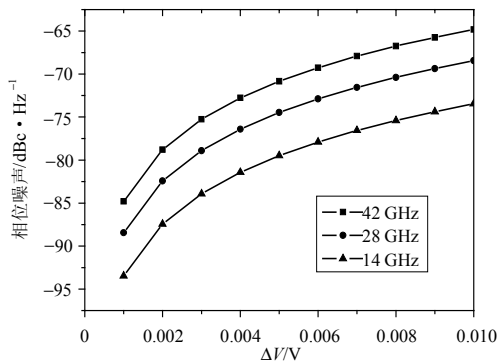


图1 行波管相位噪声与电压波动幅度关系

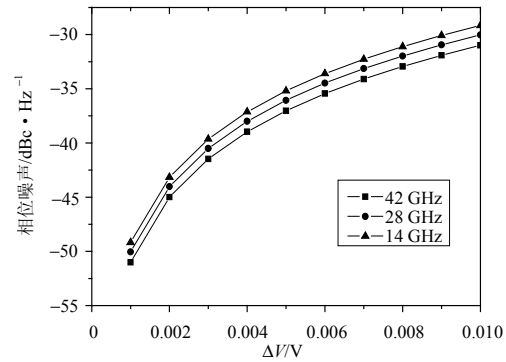


图2 速调管相位噪声与电压波动幅度关系

4 结束语

通过小信号近似, 采用波动理论与运动学理论分析, 严格地推导出行波管与速调管低频离子噪声被调制到载波上的机理。并对离子噪声形成的相位噪声特性进行分析, 得到了相位噪声表达式。揭示出影响相位噪声的因素。这对消除离子噪声与管子设计提供了参考。

参考文献

- [1] Manheimer W M. On the theory of ion noise in microwave tubes[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1999, 27(4): 1 146 -1 163
- [2] Manheimer W M. Theory and simulation of ion noise in microwave tubes[J]. Physics of plasmas, 2001, 8(1): 297 - 320
- [3] Charles K. Birdsall. Simulation of low frequency noise in a CCTWT[R]. California: EE Department of Berkley, 1999
- [4] Clouch L D, Evans K, Hartnagel H L, et al. Correspondence low frequency output fluctuations of microwave tubes[J]. Int.j.Electronics, 1969, 27(2): 195 -199
- [5] Lau Y Y, David P C. A note on low-frequency ion noise and its reduction in linear beam microwave tubes[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(3): 790 -793

编辑 孙晓丹