

Ka 波段 Gunn 锁相源的研究¹

张国春 周白华 张 樟 恽小华

(南京理工大学微波工程研究中心 南京 210094)

摘 要 本文对 Ka 波段锁相源作了分析和研究,探讨了毫米波锁相环路的稳定性和相位超前补偿问题。采用双锁相环路研制了腔稳偏压调压控振荡器(VCO)、高次倍频器、低相噪微波锁相源等关键部件,采用了表面安装技术(SMT)和高密度组装技术,使研制的毫米波锁相源具有小型化、低相位噪声、高稳定度等特点。

关键词 毫米波, 锁相环, 相位噪声, 频率稳定度

中图分类号 TN015

1 原理

随着毫米波技术的发展,人们对毫米波信号源的噪声性能和频稳度要求越来越高,锁相法是改善毫米波信号源性能的有效方法^[1,2]。本文所述的 Ka 波段小型高可靠锁相源,其原理框图如图 1 所示。它由毫米波组件、毫米波锁相环路、微波锁相源、倍频组件和晶振等五个模块组成。其工作原理为:毫米波 VCO₁ 的输出信号经耦合输入到混频器,与微波锁相源倍频输出的毫米波基准信号混频出中频信号,经放大后输入到鉴相器(PD),与晶振信号比相,其相位误差电压经环路放大、滤波后反馈控制 VCO₁,达到锁定 VCO₁ 并改善毫米波信号性能的目的。

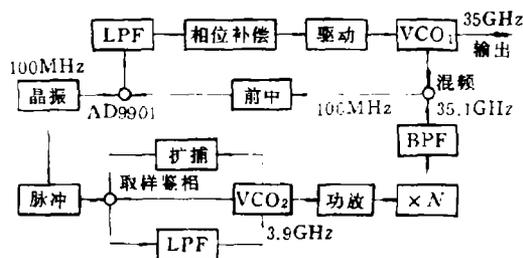


图 1 Ka 波段 Gunn 锁相源原理框图

2 毫米波锁相环路的稳定条件

在毫米波偏压调锁相源中,低相噪毫米波锁相环的带宽很宽,且环路较复杂,除 VCO、PD、LPF 外,中放、直放和电流驱动是不可缺少的,它们的引入对宽带环路的稳定性影响很大,此时环路等效为五阶环,故环路的稳定性至关重要。

将中放、直放、驱动器等等效为低通滤波器,此时环路的特征方程为:

$$s(1 + s/\omega_1)(1 + s/\omega_2)(1 + s/\omega_3) + KF(s) = 0, \quad (1)$$

¹ 1994-12-21 收到, 1995-05-16 定稿

式中, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为中放(单边带)、直放和驱动器的 3dB 带宽, K 为环路的总增益, $F(s)$ 为环路滤波器的传递函数。将 (1) 式化为标准形式:

$$a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0. \quad (2)$$

(2) 式中系数为: $a_0 = K/T_1$, $a_1 = KT_2/T_1$, $a_2 = 1$, $a_3 = 1/\omega_1 + 1/\omega_2 + 1/\omega_3$, $a_4 = (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)/(\omega_1\omega_2\omega_3)$, $a_5 = 1/(\omega_1\omega_2\omega_3)$ 。

根据 Hurwitz 准则^[3], 环路稳定条件是特征方程的系数满足:

$$\begin{vmatrix} a_4 & a_5 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & 0 \\ a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ 0 & 0 & a_0 & a_1 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_0 \end{vmatrix} > 0. \quad (3)$$

假定 $F(s) = (1 + sT_2)/(sT_1)$, $K = \omega_n^2 T_1$, 可得

$$\omega_n < \left[\frac{(a_5 - a_3 a_4)(a_3 - T_2)}{(a_5 - T_2 a_4)^2} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

为保证锁相环路满足稳定条件, 在理论上可作如下处理。(4) 式右边对 T_2 取极值, 得 $T_2 = (2a_3 a_4 - a_5)/a_4$ 。将 T_2 及各系数代入 (4) 式, 得五阶环的稳定条件为

$$\omega_n < \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\omega_1 \omega_2 \omega_3}{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3} \right]^{1/2}. \quad (5)$$

我们还可以应用 Bode 准则判断环路的稳定性。图 2 表示五阶环路的 Bode 图与环路带宽的关系。其中 $K = 2\pi \times 5\text{MHz}$, $\omega_1 = 2\pi \times 0.5\text{MHz}$, $\omega_2 = 2\pi \times 0.1\text{MHz}$, $\omega_3 = 2\pi \times 0.1\text{MHz}$, $\xi = 0.707$, 由 (5) 式可算得: $\omega_{n \max} = 0.265 \times 10^6 \text{ (rad/s)}$, $B_{L \max} = 0.5 \omega_{n \max} (\xi + 1/4\xi) = 140\text{kHz}$ 。

观察图 2, 当 $B_L = 150\text{kHz}$ 时, 环路处于不稳定状态, 当 $B_L < B_{L \max} = 140\text{kHz}$ 时, 从 Bode 图上看环路在理论上是绝对稳定的, 这也验证了 (5) 式的正确性。

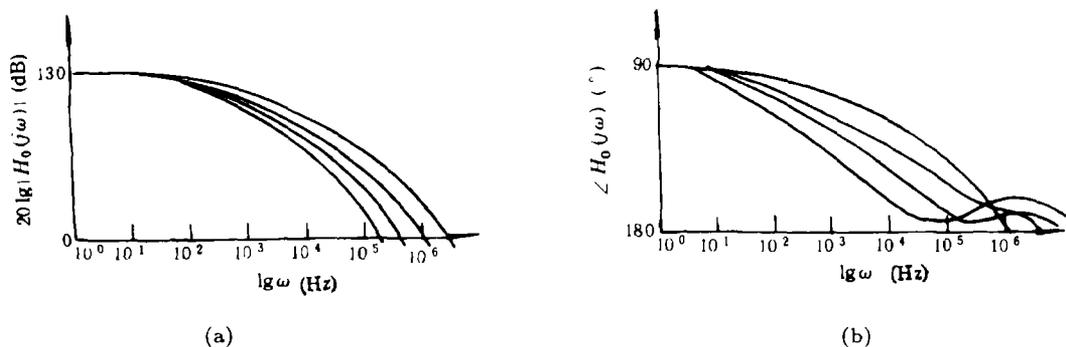


图 2 五阶环 Bode 图与环路带宽的关系

(a) 幅度 (图中曲线从左至右 $B_L = 30\text{kHz}$, 50kHz , 100kHz , 150kHz)

(b) 相位 (图中曲线从左至右 $B_L = 30\text{kHz}$, 50kHz , 100kHz , 150kHz)

表 1 短期频率稳定度

$t(s)$	晶振 (100MHz)	压控振荡器 (35(GHz))	点频锁相源 (35GHz)
0.001	2.1×10^{-10}	7.9×10^{-10}	2.2×10^{-10}
0.010	2.4×10^{-11}	1.1×10^{-9}	2.4×10^{-11}
0.100	1.5×10^{-12}	2.3×10^{-9}	1.5×10^{-12}
1.000	2.2×10^{-12}	3.0×10^{-9}	2.2×10^{-12}

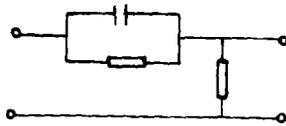


图 3 相位超前网络

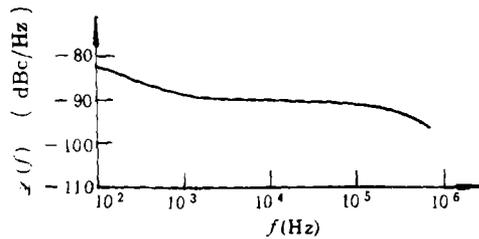


图 4 毫米波锁相源的相位噪声曲线

如图 2 所示, 当 $B_L < B_{L \max}$ 时, Bode 图上总存在最大相移处, 而此时环路增益还远远大于 1; 如果环路中器件的非理想性导致在最大相移处引进附加相移, 那么当总相移量超过 180° , 环路就满足起振条件, 严重时会导致环路失锁, 此时任何微自激就可能影响锁相源的相位噪声, 这在多次测试中得到验证。为了使环路真正能稳定地工作, 并且要消除微自激, 必须增加环路的相位裕量^[4]。图 3 是一种实用的相位超前网络, 它可以在一个倍频程内提供 $10 \sim 20^\circ$ 的相位超前量, 中心频率变化很宽。在毫米波锁相环路中加进这一相位超前网络可使相位裕量至少达到 20° , 保证环路能稳定可靠地工作。

3 研制方案和结果

锁相源的研制方案按模块介绍如下: 毫米波组件主要由腔稳偏压调 VCO_1 、平衡混频器等组成。微波锁相源主要由微波低噪声 VCO_2 、取样鉴相器、脉冲发生器等组成, 取样头采用肖特基梁式引线串联管, 脉冲发生器采用阶跃二极管, 取样头与脉冲发生器集成在一起。 VCO_2 采用低噪声单片 VCO, 其相位噪声 $\mathcal{L}(100\text{kHz}) = -110\text{dBc/Hz}$, 为了保证近端、远端相位噪声均小, 根据锁相环理论分析^[5] 环路带宽应选择为 100kHz 左右。毫米波锁相环路采用 AD9901 作为鉴相器, 它是数字模拟混合型鉴相器, 且具有鉴频功能, 因此环路入锁较快, 约 $10\mu\text{s}$ 。环路放大器采用 OP37E, 鉴相频率为 100MHz 。由于 VCO_1 为偏压调, 因此采用了电压线性好、宽带的 VMOS 电流驱动器。倍频组件采用单片功放、阶跃管高次倍频和小型 E 面全金属膜片输出波导滤波器。晶振的相位噪声 $\mathcal{L}(1\text{kHz}) = -150\text{dBc/Hz}$ 。

由于结构上采用了 SMT 和高密度组装技术, 研制的 Ka 波段 Gunn 源的体积仅 $60 \times 100 \times 120\text{mm}^3$ 。我们用时域和频域两种方法对 Gunn 源的性能进行了测试, 结果分别如表 1 和图 4 所示。其中 $\mathcal{L}(1\text{kHz}) = -90\text{dBc/Hz}$ 。

参 考 文 献

- [1] Carlstron J E. IEEE Trans on MTT. 1985, MTT-33(7): 127-129.

- [2] Bester M. International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1986, 7(1): 206-208.
- [3] 刘绍球等. 控制系统工程, 北京. 电子工业出版社, 1985, 154-167.
- [4] Li Dunfu, Yun Xiaohua. Stability for 8mm Phase Locked Souce, International Conference on Milimeter Wave and Far-infrared Technology. Beijing: June 19-23, 1989, 606-609.
- [5] Robins W P. Phase Noise in Signal Sources, Pereprinlisinlis Ltd, London: UK. 1982, 93-133.

STUDY OF Ka-BAND GUNN PHASE-LOCKED SOURCE

Zhang Guochun Zhou Baihua Zhang Zhang Yun Xiaohua

(MERC, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

Abstract A Ka-band phase-locked source (PLS) is analyzed and studied in detail. The stability of the millimeter wave PLL and the theory of phase compensation are discussed. In the practical scheme, the double PLL is applied, and the key components, such as the stable-cavity bias-tuned VCO, high-order multiplier and low phase-noise microwave PLL are developed. The SMT and high density assembly technology are utilized in structure. Finally the millimeter wave PLS possesses features of miniaturization and low phase noise and high frequency stability.

Key words Millimeter wave, Phase-locked loop, Phase noise, Frequency stability

张国春: 男, 1963年生, 工程师, 主要从事锁相与频率合成技术、信号处理、计算机控制等方面的研究工作.

周白华: 女, 1965年生, 工程师, 主要从事锁相与频率合成技术、信号处理、计算机控制等方面的研究工作.

张 樟: 男, 1958年生, 高级工程师, 主要从事微波和毫米波器件, 锁相与频率合成技术等方面的研究工作.

恽小华: 男, 1965年生, 副教授, 主要从事现代雷达、主动式导引头、锁相与频率合成技术等方面的研究工作.