

Ka 波段锁相系统研究*

鲍景富 朱君范 陈玉生

(电子科技大学微波中心 成都 610054)

摘要 利用多环方案,研制了八毫米波锁相源系统. 实验表明, 34.7GHz 频率点输出的相位噪声指标(傅氏频率为 1kHz 时)为 -78dBc/Hz , 杂散优于 -60dBc , 输出功率大于 40mW.

关键词 锁相环, 振荡器, 毫米波, 信号源, 相位噪声

1 引言

信号源是电子系统中最基本最重要的组成部分. 由于雷达、通讯、空间技术的迅速发展, 对信号源提出了越来越高的要求, 而微波频段的拥挤现象, 又使得开发毫米波资源并投入实用势在必行. 毫米波高稳定信号源是毫米波系统中较难以实现的子系统. 通过倍频是获得毫米波源的有效办法, 但是设计倍频器难度较大, 如倍频器的输入输出匹配, 较高的输入驱动功率, 对杂散的抑制以及对输出信号的放大等. 通过锁相方法可获得高的频率稳定度, 低的相位噪声和杂散, 而且毫米波压控振荡器(mmW-VCO)也容易实现, 这在毫米波系统应用中(如作为毫米波接收前端的本振源)有很大的作用. 本文中锁相系统采用多环、谐波混频的方式锁相 mmW-VCO, 得到高稳定 mmW 信号源.

2 毫米波锁相系统的构成和分析

2.1 毫米波锁相环的实现方案 毫米波锁相振荡源的最终目的就是将毫米波自由振荡信号源锁定在一个频率较低的基准源上, 以获得与基准源相同的长期频率稳定度和良好的相位噪声性能指标. 目前毫米波锁相系统有的采用脉冲取样锁相环的方法^[1], 这种方法要求工艺技术很高. 一般多采用双环或多环方案, 就是整个毫米波锁相系统中有几个环路同时存在. 本锁相系统中有基准环(I), 微波参考环(II), 毫米波锁相环(III), 具体方框图如图 1.

2.2 毫米波锁相源长期稳定度分析 由图 1, 在环路锁定时, 毫米波输出信号 f_{mm} 和微波参考源本振信号 f_{LO} 在谐波混频器上进行谐波混频获得中频 f_{IF} , 有如下关系:

$$f_{mm} = N_2 f_{LO} \pm f_{IF}, N_2 \text{ 是谐波次数};$$

而 $f_{LO} = N_1 f_{100} = 10N_1 f_{10}$, $f_{IF} = f_{FLUKE} = N f_{10}$, 则

$$f_{mm} = 10N_1 N_2 f_{10} \pm N f_{10} = (10N_1 N_2 \pm N) f_{10}.$$

1993-11-25 日收到, 1994-07-18 定稿

* 电子部电科院预研项目资助

鲍景富 男, 1964年生, 助理研究员, 博士生, 从事间接式频率综合器和高稳定毫米波信号源研究.

朱君范 男, 1933年生, 教授, 长期从事频率稳定和综合方面理论和实验研究

陈玉生 男, 1970年生, 博士生, 研究兴趣是锁相环中相位噪声分析.

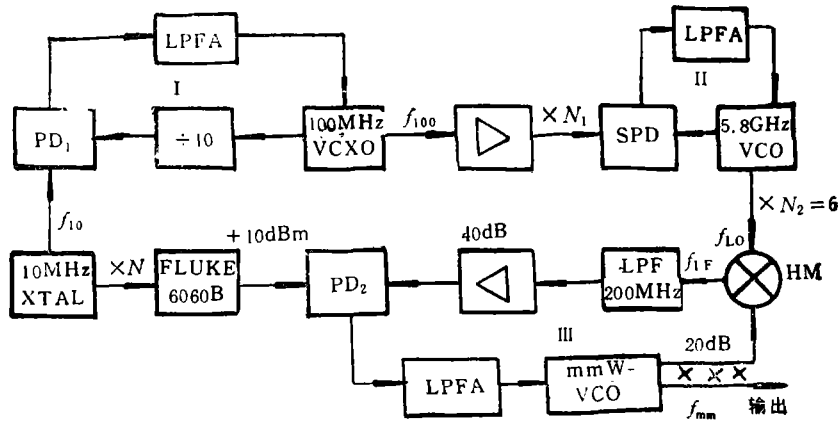


图1 Ka 波段锁相振荡源系统框图

毫米波锁相源输出的频率长期稳定度为

$$\Delta f_{mm}/f_{mm} = (10N_1N_2\Delta f_{10} \pm N\Delta f_{10}) / (10N_1N_2 \pm N)f_{10} = \Delta f_{10}/f_{10},$$

即毫米波锁相源的频率长期稳定度与 10MHz 基准源的长稳一致。

2.3 毫米波锁相源相位噪声分析^[2] 图1中毫米波锁相振荡源系统输出信号的相位噪声功率谱密度由下式决定:

$$S_{\varphi_{mm}}(f) = \left[N_2^2 S_{\varphi_{LO}}(f) + S_{\varphi_{IF}}(f) + \frac{S_{\varphi_{Kd}}(f)}{K_d^2} \right] |H(j\omega)|^2 + S_{\varphi_{VCO}} |1 - H(j\omega)|^2. \quad (3)$$

(3)式中 $S_{\varphi_{LO}}(f)$ 为微波锁相源输出的相位噪声功率谱密度, $S_{\varphi_{Kd}}(f)/K_d^2$ 为毫米波环路中鉴相器引入的附加相位噪声密度, $S_{\varphi_{VCO}}(f)$ 为毫米波振荡器自由振荡时的相位噪声功率谱密度。整个锁相系统的闭环传输函数 $H(j\omega)$ 有下列关系:

$$\left. \begin{aligned} |H(j\omega)| &\approx 1, \text{ 当 } \omega < \omega_n \text{ 时;} \\ |H(j\omega)| &\approx 0, \text{ 当 } \omega > \omega_n \text{ 时.} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(4)式中 ω_n 为闭环系统中的自由角频率, $|H(j\omega)|$ 具有低通特性。所以(3)式变为

$$S_{\varphi_{mm}}(f) \approx \begin{cases} N_2^2 S_{\varphi_{LO}}(f) + S_{\varphi_{N0}}(f) + S_{\varphi_{Kd}}(f)/K_d^2, & \omega < \omega_n \text{ 时;} \\ S_{\varphi_{VCO}}(f), & \omega > \omega_n \text{ 时.} \end{cases} \quad (5)$$

由于本实验系统中, $N_2 = 6$, 微波本振源通过 6 次谐波后将新增相位噪声 $20 \lg 6 = 15.6 \text{ dB}$, $S_{\varphi_{IF}}(f)$ 是由型号为 FLUKE6060B 综合信号发生器产生, $S_{\varphi_{Kd}}(f)/K_d^2$ 是由低噪声双平衡混频器作鉴相器带来的新增噪声, 故 $N_2^2 S_{\varphi_{LO}}(f) \gg S_{\varphi_{IF}}(f) + S_{\varphi_{Kd}}(f)/K_d^2$, 所以(5)式可简化为

$$S_{\varphi_{mm}}(f) \approx \begin{cases} N_2^2 S_{\varphi_{LO}}(f), & \omega < \omega_n \text{ 时;} \\ S_{\varphi_{VCO}}(f), & \omega > \omega_n \text{ 时.} \end{cases} \quad (6)$$

由(6)式可知, 毫米波锁相信号源输出的相位噪声 $S_{\varphi_{mm}}(f)$ 在环路带宽之内主要由微波参考源决定, 而带宽之外由毫米波压控振荡器决定。

3 毫米波锁相电路设计和测试

在毫米波锁相环中, 微波参考源^[4]同 mmW-VCO 信号在 Ka 波段谐波混频器上进行谐波混频, 得到的中频信号经滤波放大后在正弦鉴相器上与 FLUKE6060B 综合信号

发生器本振信号进行正弦鉴相,获得误差电压 V_e, V_e 经环路滤波放大后用压控毫米波振荡器,达到毫米波锁相的目的。

3.1 毫米波锁相电路的设计 毫米波压控振荡器的中心频率为 33.5~35.5GHz, 压控灵敏度 $K_o = 4\text{MHz/V}$, 输出功率大于 40mW, 自由振荡稳定度为 $10^{-5}/\text{d}$, 按中心频率 35GHz 计算, 频率漂移: $\Delta f = 35\text{GHz} \times 10^{-5} = 350\text{kHz}$. 选 $\omega_n = 500\text{kHz}$ 和 $\xi = \sqrt{2}/2$; 实验测得毫米波锁相环中鉴相灵敏度 $K_d = 40\text{mV}$, 环路直流放大器采用运放电路, 选直流增益 $A = 100$, 无源比例积分器作为低通滤波器^[5], 其电路如图 2。

$$F(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1 + s\tau_2}{1 + s(\tau_1 + \tau_2)}$$

$\tau_1 = R_1C$, $\tau_2 = R_2C$, 选 $C = 0.1\mu\text{F}$; 则 $K_p = K_oK_dA = 16\text{MHz}$; $R_2 \approx 28\Omega$, 实验中选 $R_2 = 24\Omega$; $R_1 \approx 800\Omega$, 实验中选 $R_1 = 1\text{k}\Omega$ 。

环路稳定性判断, 即分析设计的电路是否稳定。相位余量^[6]为 $\Delta\varphi = 63^\circ$, 整个锁相环系统的最大相移为 $\angle H(j\Omega_m) = -158^\circ$, 即 $\Delta\varphi(\Omega_m) = 22^\circ$, 所以整个环路具有无条件的稳定性。

3.2 毫米波锁相源的测试^[7] 在整个毫米波锁相环中, 要测试的电路主要有: 微波参考锁相源、毫米波谐波混频器特性、毫米波锁相环中的中频放大器、中频鉴相器、环路低通滤波器、直流放大器以及一些环路参数。经实验测定: 同步带为 16MHz, 与理论计算 16MHz 相符; 快捕带为 1.2MHz; 开机半小时后, 环路正常工作, 性能稳定。

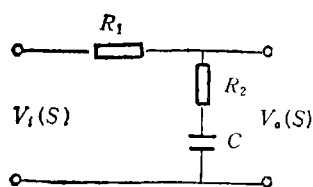


图2 比例积分滤波器

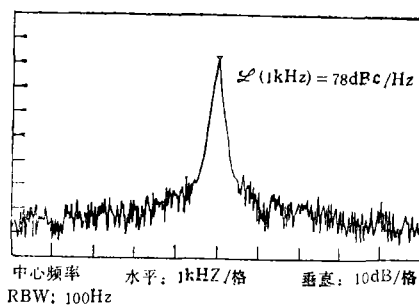


图3 Ka 波段锁住时的频谱图

利用 HP8561A 频谱分析仪测得毫米波频谱特性, 其单边带相位噪声优于 $-78\text{dBc}/\text{Hz}$ (傅氏频率为 1kHz 时), 频谱结果如图 3。

4 小结

近年来, 毫米波电路和系统在国外发展得非常迅速, 并且已经应用到雷达、通信、制导和射电天文等众多领域。尽管我们对毫米波锁相系统的研究已有部分成果, 但这仅是实验阶段。为了更好地服务于工程, 还将进一步实现锁相系统的集成模块化。本锁相系统长期频率稳定度为 $10^{-9}/\text{d}$, 相位噪声为 $S_L(1\text{kHz}) = -78\text{dBc}/\text{Hz}$, 优于 Davis 等人^[8] 的指标 $S_L(1\text{kHz}) = -68\text{dBc}/\text{Hz}$ 。

毫米波锁相系统的研制成功, 有助于毫米波频率综合器的研究和开发, 以推动我国毫

米波技术的发展。

参 考 文 献

- [1] H.K. Microwave Inc. Microwave J. 1991, 34(4):139—140.
- [2] 张有正,等. 频率合成技术. 北京: 人民邮电出版社,1984,71—79.
- [3] 杜正弥,等. 中山大学学报,1982,21(1): 54—62.
- [4] 鲍景富,等. 全国微波年会论文集(下). 合肥: 1993,756—759.
- [5] Vadim M. Frequency Synthesizers Theory and Design, Third Edition, New York;John wiley & Sons, 1988, Chapter 4.
- [6] 连汉雄编著. 微波锁相振荡源. 北京: 人民邮电出版社,1982,210—220.
- [7] 陈捷平,等. 微波学报,1992,31(4): 44—48.
- [8] Davis R G. IEEE Trans. on MTT, 1991, MTT-39(10):1746—1753.

STUDY OF Ka-BAND PLL SYSTEM

Bao Jingfu Zhu Junfan Chen Yusheng

(*Microwave Centre, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054*)

Abstract An 8mm wave PLL system is designed and manufactured by use of multi-loops. It is measured that the phase noise of mm-wave PLL source is-78dBc/Hz (Fourier frequency is 1kHz offset carrier 37.4 GHz), spurious is lower than-60dBc, output power is higher than 40mW.

Key words PLL, Oscillator, mm-wave, Source, Phase noise