

75~115 GHz 相位锁定固态源*

陈善怀 徐之材 杨桂攀

(中国科学院紫金山天文台, 江苏, 南京, 210008)

摘要 介绍了采用体效应管压控振荡器的 W 波段相位锁定系统, 该系统在紫金山天文台 13.7 m 毫米波射电望远镜中作为本地振荡器, 可复盖 75~115 GHz 的频率范围, 输出功率大于 5 mW. 用伺服放大器的输出信号控制体效应振荡器的偏压得到锁定带宽大于 100 MHz.

关键词 毫米波, 相位锁定, 体效应管, 振荡器, 固态源.

引言

相位锁定振荡器 (PLO) 可产生频率精度高, 相位噪声低的信号, 在各种现代无线电设备中已得到了广泛的应用. 随着毫米波技术的发展, 我们在 80 年代初就开始了毫米波锁相技术的研究, 先后研制出 1.25 cm~8 mm 波段的相位锁定固态源, 并向更高的频率发展.

获得高精度 3 mm 波段信号的方法基本有四种: 第一种是用倍频方式^[1], 先锁定较低频率的振荡源, 再用倍频器得到所需频率; 第二种是采用分谐波注入锁定技术; 第三种是直接锁定方式^[2~4]; 第四种是锁频并配以参量锁定技术^[5]. 第一种方法简单而有效, 但从射电天文学向亚毫米波发展, 先解决 3 mm 波段锁相技术, 再发展倍频技术, 将更有利于得到亚毫米波信号, 所以我们采用第三种方法. 这一方法的关键器件之一是 3 mm 波段压控振荡器. 由于缺少符合要求的电调变容二极管, 我们利用 Gunn 振荡器偏压的推频特性来实现 3 mm 波段 PLO. 研究结果表明, 这一方案不但可行, 而且得到的优良锁相特性与文献 [1~4] 报道的结果相同.

1 锁相系统

锁相系统框图见图 1. 它主要包括: (1) 由 3 mm 波段管压控振荡器 (VCO) 及谐波混频器等组成的毫米波单元; (2) 参考信号源; (3) 由鉴频器和鉴相器组成的中频单元; (4) 环路放大器等. 图 1 中 C 为 10 dB 定向耦合器; GO 为 Gunn VC●; HM 为谐波混频

* 国家自然科学基金资助项目

本文 1993 年 12 月 13 日收到, 修改稿 1994 年 5 月 4 日收到

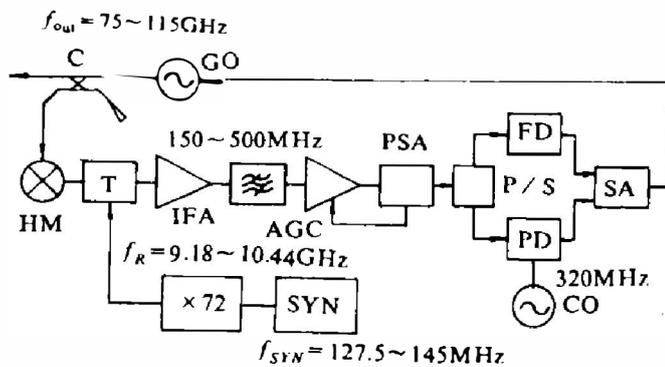


图 1 锁相系统框图

Fig. 1 Block diagram of the system

器；IFA 为前置中频放大器；AGC 为带有电控衰减器的放大器；PSA 为中频功率取样和放大电路；p/s 为功率分配器；FD 为鉴频器；PD 为鉴相器；SA 为环路放大器； $\times 72$ 表示倍频次数为 72 的倍频器；SYN 为频率综合器；CO 为 320 MHz 晶体振荡器。

为使系统能复盖整个 75~115 GHz 频率范围，要求基准频率在 127.5~145 MHz 范围内可调。基准频率 (f_{SYN}) 经 72 次倍频

后得到参考信号频率 f_R 。GO 的取样信号频率与 f_R 的 n 次谐波相混频，得到约 320 MHz 的中频频率。此中频信号经滤波，放大和稳幅后，同时送入鉴频器和鉴相器。首先，鉴频器输出频率误差信号，再经环路放大器送至电压跟踪电源，控制 GO 工作电压，实现频率锁定。在频率锁定过程中，一旦频率误差小到进入锁相环的捕捉带宽，则系统进入相位锁定状态。

2 毫米波单元

毫米波单元由 Gunn VCO，宽带谐波混频器和定向耦合器等组成，这是系统关键部分之一。系统对 Gunn VCO 的主要要求是 (1) 机械调谐范围宽，以使用尽可能少的 VCO 就能复盖整个频带；(2) 电调谐范围大于 100 MHz，并具有较好的电调谐线性；(3) 输出功率大于 5 mW，并且在电调谐的情况下比较稳定。

文献 [6,7] 采用谐波提取的方式设计了两种不同结构的宽带机械调谐 Gunn VCO。用两只 Gunn VCO 复盖 75~115 GHz 的频率范围。其输出功率满足要求，线性电调谐范围大于 250 MHz，在一定区域可达 500 MHz 以上。图 2 为输出功率和频率随工作电压的变化曲线，对谐波混频器的主要要求是：(1) 不采用机械调谐即可复盖系统的整个频率范围；(2) 变频损耗小。

我们选用国产 4 mm 波段封装 GaAs 肖特基势垒混频二极管作为变频器件。所研制的谐波混频器，在谐波次数小于 12 时，变频损耗小于 50 dB，其性能与国外同类产品相当^[8]。

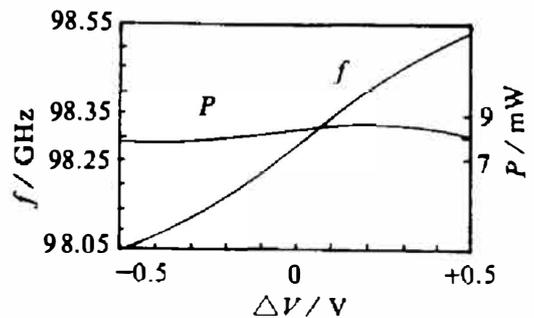


图 2 Gunn VCO 输出功率和频率随工作电压的变化曲线

Fig. 2 Output power and frequency of Gunn VCO vs. operating voltage

3 参考信号源

对参考信号源的主要要求是：(1) 输出频率在 9.18~10.44 GHz 范围内可调；(2) 输

出功率大于 5 mW; (3) 有较纯的频谱, 杂波抑制大于 40 dB; (4) 相位噪声低.

对 f_R 的选择选得高虽可以降低谐波混频器工作的谐波次数, 减少变频损耗; 但对于某一固定的谐波次数, 为了实现系统的宽频带复盖, f_R 的范围势必要加宽, 这将增加参考信号源的研制难度, 为此, 我们作了综合考虑, 选取 f_R 为 9.18~10.44 GHz.

基准频率 f_{SYN} 由频率综合器提供. 我们选用 FLUK6160B 频率综合器, 它具有数控功能和较低的相位噪声. 选取 $f_{\text{SYN}} = 127.5 \sim 145$ MHz, 经过 3 个 2 倍频器和 2 个 3 倍频器即可得到所需的 f_R . 采用多个倍频次数较低的倍频器和多个滤波器, 是为了使 f_R 的频谱较纯. 测试结果, 其杂波抑制度大于 50 dB.

根据倍频次数 $N = 72$, 谐波次数 $n = 8 \sim 11$, 以及 CO 的频率为 320 MHz, 即可得系统输出频率 f_{out} 与 f_{SYN} 之间的关系:

$$\text{上锁状态} \quad f_{\text{out}} = 72 \cdot n \cdot f_{\text{SYN}} + 320(\text{MHz}), \quad (1)$$

$$\text{下锁状态} \quad f_{\text{out}} = 72 \cdot n \cdot f_{\text{SYN}} - 320(\text{MHz}). \quad (2)$$

图 3 给出了 n , f_{SYN} 和 f_{out} 间的关系. 图 3 中 U、D 分别代表上锁和下锁状态. 由图 3 可见, 系统能保证输出频率范围为 75~115 GHz.

相位噪声恶化是毫米波 PLO 共同存在的问题. 本系统中, $N = 72$, 如果取 $n = 11$, 则总的等效倍频次数为 792, 相位噪声恶化的理论值为

$$20 \log 792 \approx 60 (\text{dB}), \quad (3)$$

本系统 SYN 的相位噪声优于 -115 dB (频偏为 1.2 kHz), 则相位噪声的估算值 (频偏为 1.2 kHz) 为

$$-115 + 20 \log 792 \approx -55 (\text{dB}), \quad (4)$$

由此可见, 短毫米波 PLO 相位噪声的恶化是比较严重的, 所以, 要选用相位噪声低的频率综合器作基准源.

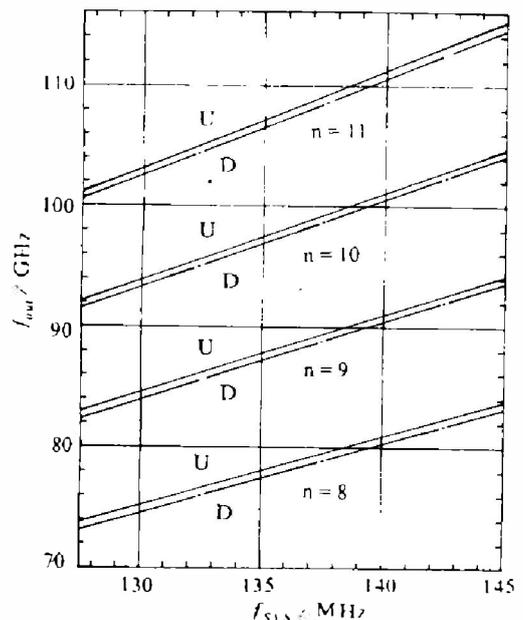


图 3 系统输出频率与 f_{SYN} 和 n 的关系

Fig. 3 Output frequency of the system vs. f_{SYN} and n

4 中频单元

中频单元采用 AGC 电路来克服因 Gunn 管 VCO 工作频带宽以及由于改变 Gunn 管偏压进行调谐所造成的 VCO 输出功率稳定性的变差, 从而保证锁相环能工作在最佳状态. 另外, 本单元由于采用了锁频、锁相双重控制方式, 具有较宽的快捕带宽和锁定带宽.

数字鉴频和鉴相电路具有体积小, 工作可靠性高的特点; 但会恶化系统的相位噪声, 所以, 采用模拟电路实现鉴频和鉴相.

5 环路放大器

环路放大器中有鉴频信号放大器和鉴相信号放大器. 鉴频放大器前装有状态选择开关, 以选择“上锁”或“下锁”状态. 鉴相放大器是二阶有源网络. 两个放大器的输出信号通过电阻叠加电路合成为一路输出.

由于采用控制 Gunn 管偏压来实现 VCO 的频率调整, 所以, 要求环路放大器能够输出较大的电流 (0.5~0.9 A), 并具有低的输出阻抗. 为此, 在环路放大器末端采用跟踪稳压电源. 为了保护 Gunn 管, 电路中还附加了工作参数可调的限流保护电路和过压保护电路.

6 系统的性能

我们研制的相位锁定固态源能复盖 75~115 GHz 的频率范围. 其输出功率大于 5 mW. 在 93 GHz 附近可达 20 mW, 锁定带宽大于 150 MHz, 在个别频率区间可达 500 MHz. 环路放大器中的保护电路起到了有效的保护作用.

图 4 为参考信号谱, f_R 为 9.16 GHz, 频率分辨率为 10 kHz/格. 图 5(a) 和 5(b) 均为锁定状态下的中频信号谱, $f_{IF} = 320$ MHz, 频率分辨率分别为 2 kHz/格和 1 MHz/格.

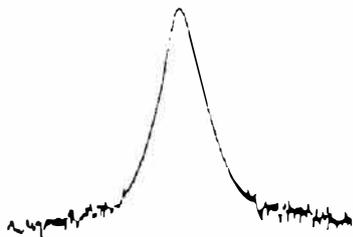


图 4 参考信号谱
Fig. 4 Spectrum of reference signal

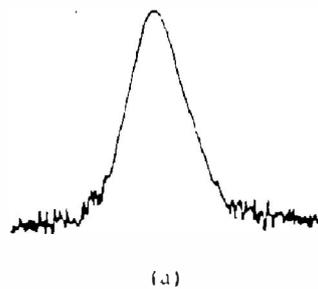
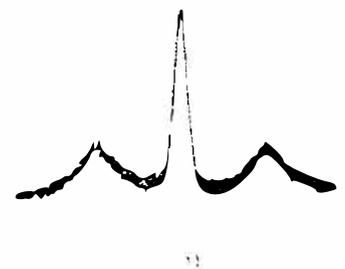


图 5 中频信号谱
(a) 频率分辨率 2 kHz/格; (b) 频率分辨率 1 MHz/格
Fig. 5 Spectrum of IF signal
(a) Frequency resolution 2 kHz/div;
(b) Frequency resolution 1 MHz/div



7 结语

本工作的重点是探索采用控制 Gunn VCO 偏压的方法来实现 3 mm 波段的相位锁定技术, 以及探索实现宽频带复盖和降低相位噪声的方法. 成功地研制出性能良好的 PLO, 它安装在紫金山天文台 13.7 m 口径毫米波射电望远镜上作为本地振荡器, 实现 3 mm 波段宇宙空间的分子谱线观测. 由此证明了本方案的可行性和合理性, 为今后采用倍频技术

获得 1.3 mm 和 0.8 mm 波段的信号打下了基础.

致谢 研究工作得到东南大学等单位组成的基金专家组的领导和帮助. 研究条件和补充经费由中国科学院射电天文联合开放研究实验室提供. 性能优良的 Gunn 器件由机电部 55 所邓衍茂研究员提供. 在此表示衷心的感谢.

参考文献

- 1 Archer JW. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1982, **30**:824~825
- 2 Bestor M *et al.* *Phase-Locked Millimeter Wave Gunn Oscillators with Large Mechanical Tuning Range*. In: *Proc. of the 13th Eur. Microwave Conf.*, Nurnberg, 1983. 308~313
- 3 Carlstrom JE *et al.* *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1985, **33**:610~619
- 4 Davis RC, Lazarus MJ. *Microwave Journal*, 1986, **29**:103~107
- 5 Hiroshi Okamoto, Mutsuo Ikeda, Shingi Kodaira *et al.* *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1987, **35**:657~661
- 6 肖可成. *电子学报*, 1992, **20**(9):100~102
- 7 吕 迅. *紫金山天文台台刊*, 1991, **10**(3):237~240
- 8 史生才, 陈善怀. *紫金山天文台台刊*, 1991, **10**(3):241~246

A 75~115 GHz PHASE-LOCKED SOLID STATE SOURCE*

Chen Shanhuai Xu Zhicai Yan Guipan

(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China)

Abstract A W-band phase-locked system using Gunn VCO was developed. This system has been used as a local oscillator for the 13.7 m millimeter-wave radio telescope of PMO. Its operating frequency range is 75~115 GHz and the output power is greater than 5 mW. By using the output signal of a servo amplifier to control the bias voltage of the Gunn oscillator, a lock-in bandwidth of more than 100 MHz is achieved.

Key words millimeter wave, phase-locked, Gunn diode, oscillator, solid state source.

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China.