

小型 Ka 频段锁相倍频源*

徐锐敏** 延波 李积微

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

【摘要】介绍了小型毫米波跳频频率合成器的研究方法。为了满足系统小型化要求，采用微波频段锁定后倍频到毫米波频段的锁相倍频方案，选用超小型、无任何补偿措施的普通10 MHz 晶振。整个毫米波锁相源在150 cm³体积内实现。测试结果为：输出频率29~31 GHz，步进20 MHz，相噪优于 - 65 dBc/Hz@10 kHz，输出功率大于10 dBm，可用于8 mm 接收机作本振或发射机基准源使用。

关键词 毫米波，小型化，步进式合成源，锁相倍频，相位噪声

中图分类号 TN752.7

振荡器是毫米波系统的关键部件之一，其性能的好坏直接关系到整机性能的优劣^[1]。随着毫米波整机系统工程实用化的提高，尤其是全固态、全相参、全集成制导系统和星载转发器对频率源小型化和高稳定性的要求，小型步进频综组件为最佳选择^[2]。

1 原理

小型 Ka 频段锁相倍频源原理如图1所示，由普通10 MHz 晶振、微波步进锁相源和毫米波4倍频器组成。其中微波步进锁相环由鉴相器、环路滤波器、压控振荡器、分频器等构成。

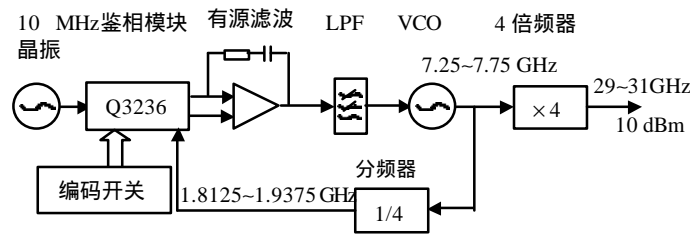


图 1 毫米波锁相倍频方框图

以晶振输出的10 MHz 信号作为参考信号，将 VCO 输出的信号7.5±0.25 GHz 耦合出一部分，由预分频器4分频后为1875±62.5 MHz在鉴相器 Q3236中与参考信号鉴相，将其相位误差信号转化为误差电压，经环路滤波器和低通滤波器滤波后控制微波VCO，使VCO输出频率受控于设置的频率点。频率控制由编码开关实现，然后将其输出信号经4倍频器后得到29~31 GHz 的毫米波信号。

2 系统性能分析

2.1 系统长期稳定性

由图 1 所示，输出毫米波信号为

$$f_{out} = 4f_{VCO} = 4N(N_1 / N_2) f_{ref} \tag{1}$$

其中 N_1 为鉴相器的 VCO 分频比， N_2 为鉴相器的参考分频比^[3]，有

$$\Delta f_{out} = 4N(N_1 / N_2) \Delta f_{ref} \tag{2}$$

故

$$\frac{\Delta f_{out}}{f_{out}} = \frac{4N(N_1 / N_2) \Delta f_{ref}}{4N(N_1 / N_2) f_{ref}} = \frac{\Delta f_{ref}}{f_{ref}} \tag{3}$$

2001 年 7 月 17 日收稿

* 国防科工委预研基金资助项目

** 男 42 岁 硕士 教授

可见,当环路锁定后,毫米波输出信号与参考晶振具有相同的长期频率稳定度。

2.2 系统相位噪声

微波锁相环的输出相噪可表示为^[1]

$$S_{F0}(f) = S_{Ff}(f) |H(j\omega)|^2 + S_{FH}(f) |H_e(j\omega)|^2 \quad (4)$$

其中

$$S_{FL}(f) = S_{FI}(f) + S_{Fa}(f)/K_0 + S_{Fc}(f)/N \quad (5)$$

代表低通型相位噪声, $S_{FI}(f)$ 、 $S_{Fa}(f)/K_0$ 和 $S_{Fc}(f)/N$ 分别是参考信号鉴相器和分频器引入的相位噪声。本系统中采用的鉴相器为Q3236,其相噪指标为 $-154\text{dBc/Hz}@100\text{Hz}$,而所使用的晶振考虑小型化要求,采用未加任何补偿措施的普通晶振,其相噪指标较差,分频器引入的相噪很少^[1],故有

$$S_{FI}(f) \gg S_{Fa}(f)/K_0 + S_{Fc}(f)/N^2 \quad (6)$$

$S_{FH}(f) = S_{FVCO}(f) + |K_V/\omega|^2 S_{Fb}(f)/K_0^2$ 代表高通型相位噪声,一般

$$S_{FVCO}(f) \gg |K_V/\omega|^2 S_{Fb}(f)/K_0^2 \quad (7)$$

所以微波锁相环的输出本位噪声可近似表示为^[5,6]

$$S_{\Phi_0}(\omega) = \begin{cases} S_{\Phi_I}(f) |H(j\omega)|^2 & \omega < \omega_n \\ S_{\Phi_{VCO}}(f) |H(j\omega)|^2 & \omega > \omega_n \end{cases} \quad (8)$$

式中 ω_n 为环路的自然谐振频率。

微波锁相环的输出经过4倍频后相噪恶化理论值为12 dB。另外,环路中的鉴相器、分频器、放大器和环路滤波器等引入的相噪归为环路引起的相噪恶化,根据工程经验,大约为5~10 dB。

3 系统设计

本频综源计划用于毫米波频段卫星转发器作本振使用,因此,小体积、高可靠性和高稳定度,以及低功耗为设计中必须考虑的问题。

3.1 晶体振荡器

由于小型化、低功耗要求的限制,选用普通国产晶振,其体积仅有 $15\text{mm} \times 5\text{mm} \times 5\text{mm}$,相噪为 $-136\text{dBc/Hz}@10\text{kHz}$ 。

3.2 鉴相器

鉴相器是锁相环的关键部件之一,其性能直接影响系统性能。本系统选用 Qualcomm 公司的 Q3236,其相噪极低为 $-154\text{dBc/Hz}@100\text{Hz}$,鉴相输入频率高达2 GHz,具有低功耗、高鉴相灵敏度,内置可编程分频器等特点,可实现输出频率步进。

3.3 毫米波4倍频器

采用毫米波 HEMT 单片,适当改变直流偏置,加大输入信号幅度,使该器件工作在强非线性区,外于饱和状态,可产生4次谐波输出。设计输出网络,使之谐振在4次谐波频率,可提高4倍频效率,抑制其他谐波输出。

3.4 环路类型及参数

本振相环采用二阶环,环路滤波器采用有源比例积分滤波器,构成二阶二型环,如图2所示。

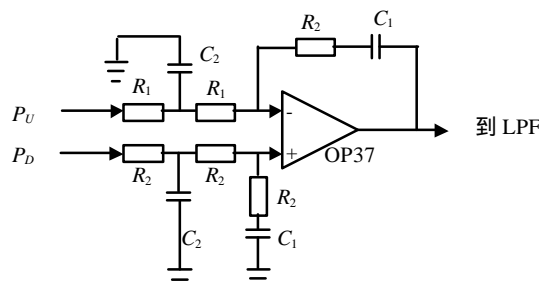


图2 有源滤波器

环路滤波器的传递函数为

$$F(s) = \frac{(1 + st_2)(1 + st_1)}{st} \quad (9)$$

式中

$$t_1 = \frac{K_V K_\Phi}{\omega_n^2 N} \quad (10)$$

$$t_2 = \frac{2x}{\omega_n} \quad (11)$$

和

$$t_1 = R_1 C$$

$$t_2 = R_2 C$$

式中 K_V 为 VCO 的压控灵敏度; K_Φ 为鉴相灵敏度; N 为环路分频比; ω_n 为自然谐振频率; x 为阻尼系数。 ω_n 、 x 决定环路噪声性能、稳定性、环路入锁间, 通过合理选择其值, 可使环路达到最佳性能。

3.5 低通滤波器

为了更有效地滤除鉴相频率及其谐波分量, 提高杂散抑制度, 在有源滤波器后须附加 LC 低通滤波器。为了尽可能减小低通滤波器对环路相位余量的影响, 其极点应尽可能远离环路自然谐振频率, 同时要小于鉴相频率 f_D , 如图 3 所示。其电压传递函数为

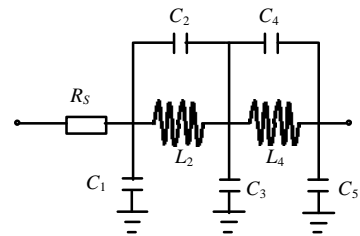


图3 低通滤波器

$$F_R(s)^{-1} = \left[1 + \frac{s^2 L_4 C_5}{1 + s^2 L_4 C_4} \right] \left[1 + \frac{s^2 L_2 C_3}{1 + s^2 L_2 C_2} \right] (1 + s C_1 R_s) + \left[\frac{s^2 L_2 C_5}{1 + s^2 L_2 C_2} \right] (1 + s C_1 R_s) + \left[1 + \frac{s^2 L_4 C_5}{1 + s L_4 C_4} \right] (s C_3 R_s) + s C_5 R_s \quad (12)$$

该滤波器应具有陡峭下降特性, 采用考尔滤波器。

4 测试结果

微波锁相环路采用 Q3236, 鉴相频率选为 1 250 kHz, 此时环路自然谐振频率和阻尼系数分别取为 $2\pi \times 100$ kHz 和 0.85。环路本底噪声优于 -120 dBc/Hz, 对输出相噪影响可忽略不计, 因此输出相噪取决于 10 MHz 参考信号和微波 VCO。

采用双面高密度组装技术, 使毫米波锁相倍频源包括晶体总体积在 30 mm×50 mm×20 mm 之内, 输出频率 29~31 GHz, 步进频率 20 MHz, 相噪优于 -65 dBc/Hz@10 kHz, 输出功率大于 10 dBm, 电源功耗小于 5 W, 入锁时间为 10 μs, 无失锁状态。

5 结论

本毫米波锁相倍频源为卫星通信毫米波转发器本振专项研制, 其性能技术指标以及体积、功耗满足要求。如果改用高性能低相噪的温补或恒温 10 MHz 晶振, 其相噪指标会大幅度改善。

参 考 文 献

- 1 白居宪, 低噪声频率合成器. 西安: 西安交通大学出版社, 1990
- 2 恽小华, 恽才华, 张闰春, 等. 8 mm 小型化低相噪声锁相源, 红外与毫米波学报, 1995, 14(5):383 ~ 385
- 3 鲍景富, 朱君范, 陈玉生, Ka 波段锁相系统研究, 电子科学学刊, 1995, 17(3):311 ~ 314
- 4 闵洁. Ka 频段卫星通信微波频率综合器, 无线电通信技术, 1995, 12(3):32 ~ 34
- 5 Zhang Yonghong, Wu Zhengde, Tang Xiaohong, *et al.* W-band smart synthesizer. Journal of University of Electronic Science and Technology, 1999,28(2):353~356 [张永鸿, 吴正德, 唐小宏, 等. W 波段小型锁相源. 电子科技大学学报, 1999, 28(8):353~356]
- 6 Cheng Yusheng, Zhu Junfan, Bao Jingfu. Phase noise analysis of millimeter-wave phase locked loop, Journal of University of Electronic Science and Technology, 1996,25(6):595~598 [陈玉生, 朱君范, 鲍景富, 毫米波锁相环相位噪声分析研究, 电子科技大学学报, 1996,25(6):595~598]

Smart Ka-band Phase Locked and Frequency Multiplying Source

Xu Ruimin Yan Bo Li Jiwei

(Institute of Applied Physics, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract The development for smart millimeter wave jumping frequency synthesizer is suggested in this paper. To meet the need of miniaturization, the method of phase locked in microwave band and then multiplying into millimeter wave band is applied, and the super-small, ordinary 10 MHz crystal oscillator is chosen in the system. The volume of the synthesizer is in 150 cm³. The testing results show that phase noise is better than - 65dBc/Hz@10kHz and output power is over 10 dBm in 29 ~ 31 GHz output frequency and 20 MHz step frequency. The millimeter synthesizer can be used in the Ka-band receiver as local oscillator or the transmitter as standard source.

Key words millimeter wave; miniaturization; step frequency synthesizer; phase locked and frequency multiplying; phase noise