

文章编号: 1001-893X(2012)08-1340-05

L 频段高稳梳状谱电路设计与实现^{*}

韩鹏飞

(中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051)

摘要:利用阶跃恢复二极管的强非线性特点, 设计了一个输入信号频率 100 MHz、输出信号频率 0.9~1.4 GHz 的梳状谱电路, 经开关滤波器电路处理后可以实现 6 个单频点输出。梳状谱电路经优化设计和调试, 以较低的驱动功率实现了模块高稳定输出。在 $-55^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ 工作温度范围内、输入信号功率 $0 \sim +3 \text{ dBm}$ 条件下, 梳状谱电路驱动功率为 20 dBm 左右, 测试模块输出信号功率变化小于 1.5 dB, 附加相位噪声劣化小于 1 dB。

关键词:滤波器; 梳状谱电路; 阶跃恢复二极管; 低附加相位噪声; 高幅度稳定性

中图分类号: TN702 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.08.024

Design and Implementation of an L-band Comb Spectrum Generator with High-amplitude Stability

HAN Peng-fei

(The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: A 0.9 GHz to 1.4 GHz comb spectrum generator with 100 MHz input signal is designed based on high non-linear characteristic of step recovery diode. Six single output signal can be attained through a switch filter circuit. By optimization of design and adjustment high-amplitude stability of the module output power is realized with low comb spectrum generator drive power. The variation of output power is not more than 1.5 dB and the additional phase noise is not more than 1 dB, at temperature $-55^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ and input power $0 \sim +3 \text{ dBm}$, at the same time the drive power of the comb spectrum generator is about 20 dBm.

Key words: filter; comb frequency spectrum generator; step recovery diode; low additional phase noise; high-amplitude stability

1 引言

某项目中需要用到分频段滤波器模块, 要求输入信号频率 100 MHz, 功率 $0 \sim +3 \text{ dBm}$; 输出 0.9 GHz、1.0 GHz、1.1 GHz、1.2 GHz、1.3 GHz、1.4 GHz 共 6 个频点; 工作温度 $-55^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$, 输出信号幅度 $-10 \pm 1.5 \text{ dBm}$; 附加相位噪声恶化小于 3 dB。需要说明的是, 该组件对可靠性有明确要求, 用户不希望使用温补衰减器降低输出信号功率波动。

整个模块由梳状谱电路和开关滤波器两部分组成。其中开关滤波器电路中的开关、滤波器高温时插损增大, 低温时插损降低, 放大器高温时增益降低, 低温时增益增大, 因此开关滤波器具有高温时幅度降低, 低温时幅度增大的变化特性, 并且这种变化是固有的, 只能通过选择合适的器件将变化控制在一定范围, 无法通过调试消除或改善。输入信号有 3 dB 的功率波动, 具有的很宽工作温度范围, 不利于控制输出幅度变化; 另外, 考虑到组件输出信号多达 6 个频点, 各频点输出幅度变化的不一致性和用

^{*} 收稿日期: 2012-05-23; 修回日期: 2012-08-10

于调整幅度的衰减器衰减量的不连续性,在不使用温度补偿衰减器的前提下,要求与之配套的梳状谱电路本身必需具备很高的输出幅度稳定性,是性能实现的关键电路。设计思路:一是梳状谱电路形式要简单,易于实现;二是理论设计和实际试验相结合,通过试验对电路参数进行优化调整,使之达到最佳整体效果。

新设计了一种梳状谱电路,利用阶跃恢复二极管(SRD)制作梳状谱发生器。经优化设计和调试后,最终结果表明,整个频段滤波器全部电性能指标满足要求,并且通过了 SJ 20527A - 2003《微波组件通用规范》规定的试验,达到了设计预期。

本文重点说明梳状谱电路部分的设计与实现,开关滤波部分实现相对容易,不展开叙述。

2 梳状谱电路设计

根据要求,梳状谱电路输入信号频率 100 MHz,功率 0 ~ +3 dBm;输出信号:0.9 ~ 1.4 GHz。

脉冲发生器是梳状谱电路的重要组成部分,由于 SRD 脉冲发生器不需要空闲电路,电路具有简单、紧凑的特点,利于提高可靠性,本文梳状谱电路采用了 SRD 脉冲发生器。脉冲发生器理论参考了文献[1 - 2],设计上主要参考了文献[3]给出的电路结构,该文献未给出参数设计和最终结果,本设计具体电路上与之也不相同,是一种全新的设计。

典型的 SRD 梳状谱电路原理框图如图 1 所示。电路由驱动放大器、低通滤波器、SRD 脉冲发生器 3 部分组成。

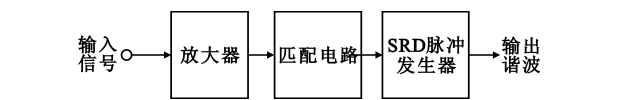


图 1 SRD 梳状谱电路原理框图
Fig.1 Circuit principle diagram of SRD comb spectrum generator

要使 SRD 产生较大的窄电流脉冲,从而获得丰富的谐波输出,首先需要使用驱动放大器将输入信号放大到一定的功率来推动 SRD 产生脉冲;低通滤波器的作用是实现输入与输出信号的隔离,把放大器产生的功率有效地加到二极管上,最大限度地产生更强的窄脉冲电流,同时使二极管产生的谐波能量不能回串到放大器中。

2.1 SRD 的选择

设计梳状谱电路脉冲发生器首先要选择合适的

SRD,SRD 的主要参数有:阶跃时间 t_t ,少数载流子寿命 τ ,结电容 C_J ,反向击穿电压 V_B ,串联电阻 R_S 等。

SRD 应有足够高的截止频率、足够大的少数载流子寿命以及足够小的阶跃时间。二极管的选则应符合以下条件:

(1)阶跃时间 t_t :为获得高效率倍频的关键参数,一般认为 t_t 应小于所需输出频率 f_N 周期的一半,本设计中 f_N 对应最高输出频率 1.4 GHz,应选 $t_t < 350$ ps;

(2)少数载流子寿命 τ : $\tau > \frac{1}{2\pi f_{in}}$ (f_{in} 为输入频率);至少应满足 $\omega\tau > 10$,本设计输入频率 100 MHz,应选 $\tau > 14$ ns;

(3)结电容 C_J :对于 50 Ω 系统,结电容增大会导致匹配困难,而且降低倍频效率,通常阻抗要求: $10 \Omega < \frac{1}{2\pi f_N C_J} < 20 \Omega$;

(4)反向击穿电压 V_B :输出功率与 V_B 的平方成正比,从提高功率容量的角度,希望提高 V_B ,但 V_B 大,则器件 I 层厚,导致阶跃时间增长,影响工作频率上限,所以 V_B 不是越大越好。

根据以上要求,阶跃恢复二极管选用 M - pulse 公司的 MP4033,其参数见表 1。

表 1 阶跃恢复二极管 MP4033 参数表 Table 1 Step recovery diode MP4033 parameters				
t_t /ps	τ /ns	C_J (min ~ max) /pF	R_s (@100 mA) / Ω	V_B ($I_R = 10 \mu A$) /V
70	30	0.5 ~ 1.0	0.6	30

该 SRD 最大输出频率为 14 GHz,满足使用要求。

2.2 脉冲发生器电路设计

SRD 脉冲发生器电路如图 2 所示。

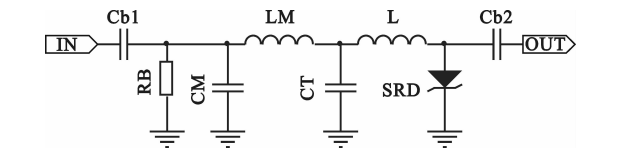


图 2 脉冲发生器电路
Fig.2 The pulse generator circuit

脉冲发生器电路包括 SRD、激励电感 L 和调谐电容 CT、匹配网络和偏置电路。其中 L 用于存储和释放能量,CT 用来调谐脉冲发生器的输入电纳,使脉冲发生器的输入阻抗成为纯电阻性的,并使激励电感在输入频率上失谐。

LM 和 CM 构成的 Γ 型匹配网络用于实现输入信号与脉冲发生器之间的匹配。

偏置采用自给偏压方式, 偏压电阻 RB 的大小决定了偏压的大小, 直接影响了输出功率、输出效率和稳定性, 如果设计不当, 可能导致整个梳状谱电路完全不能工作; 采用自给偏压方式时, 其功率取自激励源, 虽然倍频效率有所下降, 但电路简单, 稳定性高, 由于倍频次数不是很高, 为避免在使用频率上形成空闲回路, 自偏压电阻不串联扼流电感; 当倍频电路存在寄生振荡时, 可以通过调节 RB 消除寄生振荡。同时为了使偏压不被加到信号源电路中, 有必要设置隔直电容 Cb1。

Cb2 为输出端隔直电容, 作用是防止偏压被加到输出电路。

激励电感 L 和调谐电容 CT 参数初值用下面近似公式计算:

$$L \approx \frac{2.31 \times 10^{-2}}{C_j f_N^2} \approx 11.8 \text{ nH} \quad (1)$$

$$CT \approx \frac{1.265 \times 10^{-2}}{L f_{in}^2} \approx 107.2 \text{ pF} \quad (2)$$

匹配网络中电感 LM 和电容 CM 参数初值用下面公式进行计算:

$$LM = \frac{\sqrt{R_g R_{in}}}{2\pi f_1} \quad (3)$$

$$CM = \frac{1}{2\pi f_1 \sqrt{R_g R_{in}}} \quad (4)$$

式中, R_g 为信号源内阻, 对于 50 Ω 系统, R_g 为 50 Ω ; 由于调谐后输入阻抗成为纯阻性, $R_{in} \approx \omega L$, 得到 $LM = 30.6 \text{ nH}$, $CM = 82.9 \text{ pF}$ 。

偏置电阻 RB 参数初值可以用下面近似公式计算:

$$RB \approx \frac{2\tau}{\pi(f_N/f_1)^2 C_j} = 471.8 \text{ } \Omega \quad (5)$$

由于电容容值不可以任意选取, 实际使用时 CT 取值 100 pF, 通过调整电感 L 的值来达到最佳效果; 同样道理, CM 选用 82 pF 电容, 将来调整电感 LM 来达到最佳效果, 电阻 RB 取值 470 Ω ; 隔直电容均取值 1 nF。

利用上述元件参数, 使用 ADS 仿真软件进行仿真验证, 电路工作正常; 由于模块工作温度为 -55 $^{\circ}\text{C}$ ~ +85 $^{\circ}\text{C}$, 我们无法得到高低温条件下相对常温时准确的参数变化, 因此以稳定性为优化目标 EDA 软件无法实现。解决的办法是通过实验确定优化的设计参数。

实验发现, RB 最佳值与经验公式得到的值有较大出入, 分析其原因, 经验公式在计算时已经忽略了很多因素, 如元器件寄生参量的影响等, 另外, 由于输出需使用多频点, 选取不同倍频次数的得到初值结果有较大出入, 我们尚未掌握其准确规律。

我们通过实验来对参数进行优化, 经过大量实验, 表明选用的电容值可以满足使用要求, 激励电感 L、匹配电感 LM 值略有偏小, 分析原因认为是对应的电容 CT 由理论上的 107 pF 降低到 100 pF, 需提高 L 的电感量进行补偿, 电感 LM 的道理类似。

同时, 实验表明 RB 取值在 1 k Ω 左右时输出幅度稳定性好, 这时允许输入信号有较大波动。

2.3 其他设计

2.3.1 放大器

放大器的作用是为 SRD 脉冲发生器提供足够的驱动功率, 是梳状谱电路附加相位噪声的主要来源; 同时如果放大器输出功率过大, 则会对二极管过度激励, 使得相位噪声严重变坏。本文中放大器还有一个重要作用, 就是降低输入信号波动对输出信号的影响。查阅了部分有关梳状谱电路设计的文献, 多数的梳状谱电路驱动功率在 +26 ~ +27 dBm, 有的甚至更高, 如采用那样的设计, 直流功耗上将超出系统要求。直流功耗取决于驱动放大器的输出功率, 如何在满足系统要求的前提下降低驱动功率, 降低输入功率波动对输出幅度的影响是关键技术。

为解决以上问题, 我们做了大量的试验, 试验证明, 采用自给偏压方式的 SRD 脉冲发生器, 偏压电阻 RB 如选用得当, 通过适当调整其他参数, 可以适当降低对输入信号功率的要求。试验表明, 在 20 dBm 左右的驱动功率下, 可以设计出对应的 SRD 脉冲发生器。

系统给定输入信号功率为 0 ~ +3 dBm, 为降低输入信号功率波动的影响, 放大器应工作在一定程度的饱和状态, 增益应不低于 23 dB 左右, 输出功率在 20 dBm 左右。

放大器选用中国电子科技集团公司第十三研究所生产的一款单片放大器, 该放大器增益 25 dB, 线性输出功率 20 dBm, 使用频点输出驻波比小于 1.3。放大器与输入端口之间设计有衰减器, 使进入 SRD 脉冲发生器的功率控制在 21 dBm 左右。

2.3.2 低通滤波器

放大器与脉冲发生器之间设计了 5 节低通滤波器, 作为匹配电路的补充, 用来实现梳状谱电路输入

信号与输出信号的进一步隔离,降低信号谐波对 SRD 的影响。低通滤波器电路图如图 3 所示。

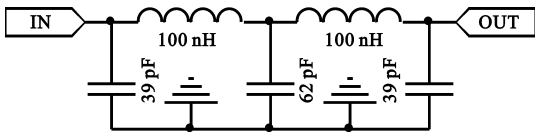


图 3 低通滤波器电路图
Fig.3 The low pass filter circuit diagram

低通滤波器仿真结果:100 MHz 回波损耗 -20.0 dB ,对200 MHz抑制为33 dB。

2.3.3 其他

用于实现自偏压的电阻采用两个电阻串联方式,实现偏压的精确调试;激励电感 L 与匹配电感 LM 采用空心电感形式,利于调试到最佳效果。

梳状谱电路与开关滤波器之间设计有衰减器,降低开关滤波器电路对梳状谱电路的影响。

3 电路实现与调试

3.1 电路实现

实际设计时,电路板采用厚度 $h = 0.762\text{ mm}$ 、介电常数 $\epsilon_r = 2.5$ 的 AD255 介质板,表面采用沉金处理。印制板长度67.5 mm,宽度18.5 mm,电路单元中贴装元件采用回流焊工艺,放大器、电感等采用手工焊接。使用 M2.0 螺钉将电路单元固定在箱体独立的腔体内。输入端口采用 SMA - K 接头,采用半柔性射频同轴线连接梳状谱电路单元和开关滤波器电路单元。梳状谱电路单元的照片如图 4 所示。

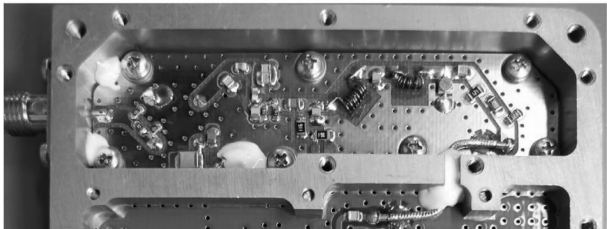


图 4 梳状谱电路实物照片
Fig.4 Photo of comb spectrum circuit

3.2 电路调试

调试时,首先控制输出幅度的波动:调试激励电感 L 和匹配电感 LM,使输出幅度波动达到最小,这样做可能会使效率有所降低,需要在后面的开关滤波器中补偿;再调节自偏置电阻 RB,使得常温时输

入信号在 $-2 \sim +5\text{ dBm}$ 时能够保证输出信号噪声本底稳定,这样才能保证高低温时的正常工作。由于开关滤波器电路高温时幅度降低增大,低温时幅度增大,并且无法通过调试克服,需要调试梳状谱电路与之配合。梳状谱电路调试最佳的效果是:梳状谱电路本身的输出功率幅度低温时幅度略有下降,高温时幅度略微升高,这样可以保证梳状谱电路与开关滤波器电路级联使用时,两者引起的幅度变化部分抵消,从而降低输出幅度波动。本模块样品最终高低温幅度相对于常温均承下降趋势,从而实现全工作温度范围内较小的功率波动。

4 测试结果

调试好的样品经清洁处理和点胶粘固后,对整个模块进行了详细测试。使用 100MHz 超底相噪晶振提供输入信号,晶振与模块输入端之间串接同轴衰减器,调整衰减器将输入信号功率控制在 $0 \sim +3\text{ dBm}$,工作温度 $-55\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

使用 Agilent E5052A 信号源分析仪测试噪声劣化,同晶振的相位噪声进行比较,在噪声理论恶化 $20\lg N$ (N 为倍频次数)的基础上,所有测试频点全温范围内附加噪声劣化均小于1 dB。

使用 Agilent 公司的 E4440A 频谱仪对整个模块进行三温测试,幅度测试结果如表 2 所示。

表 2 输出幅度测试记录			
Table 2 The output amplitude test record			
输出 频点 /MHz	输出幅度/dBm		
	常温	低温	高温
900	-10.19 ~ -9.62	-10.99 ~ -10.51	-10.58 ~ -10.01
1 000	-10.34 ~ -9.76	-10.74 ~ -10.23	-10.41 ~ -9.84
1 100	-10.14 ~ -9.59	-10.49 ~ -10.02	-10.03 ~ -9.48
1 200	-10.21 ~ -9.62	-10.59 ~ -10.22	-10.29 ~ -9.73
1 300	-10.01 ~ -9.44	-10.70 ~ -10.24	-10.31 ~ -9.75
1 400	-10.27 ~ -9.67	-10.70 ~ -10.27	-10.60 ~ -9.99

在全工作温度范围内,各输出频点的输出功率基本控制在 $-9.5 \sim -11.0\text{ dBm}$,输出幅度随输入功率变化引起的幅度波动小于1.5 dB。

文献[1]中仅给出一种 100 MHz 输入信号产生 2 GHz 单点输出的设计,未给出最终结果,无对比性。

5 结 论

我们研制出了驱动功率为 20 dBm 的梳状谱电

路,采用以上梳状谱电路的开关滤波器模块,在全工作温度范围内,附加噪声劣化小于 1 dB,整个模块输出幅度变化控制在 1.5 dB,以较小的驱动功率获得了较为稳定的输出,具有新颖性,设计的梳状谱电路达到了预期的高稳输出目的。开关滤波器模块通过了 SJ 20527A - 2003《微波组件通用规范》规定的全部试验,可靠性和指标满足系统要求。本文论述的设计理念和方法可以作为设计和制作其他频率的梳状谱电路的参考,这种梳状谱电路具有实用价值和工程价值。

参考文献:

- [1] 喻梦霞,李桂萍.微波固态电路[M].成都:电子科技大学出版社,2008.
YU Meng - xia, LI Gui - ping. Microwave solid state circuit [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China of Press, 2008. (in Chinese)

- [2] 顾其净,项家桢.微波集成电路设计[M].北京:人民邮电出版社,2008.
GU Qi - zheng, XIANG Jia - zhen. Microwave integrated circuit design [M]. Beijing: People's Post and Telecommunications Press, 2008. (in Chinese)
- [3] 徐振宇,钱澄.阶跃恢复二极管倍频器的设计[J].电子器件,2005,28(1):125 - 127.
XU Zhen - yu, QIAN Cheng. A Step Recovery Diode Frequency Multiplier[J]. Journal of Electron Devices, 2005, 28 (1):125 - 127. (in Chinese)

作者简介:

韩鹏飞(1973—),男,河北邢台人,1996年于四川大学获学士学位,现为工程师,主要从事微波射频接收模块的研究与设计工作。

HAN Peng-fei was born in Xingtai, Hebei Province, in 1973. He received the B.S. degree from Sichuan University in 1996. He is now an engineer. His research concerns microwave RF receiving module.

Email: pengfei_han@sina.cn, contact@hbmmc.com