



开关滤波器组的研制

张宇平, 高翠琢

(中国电子科技集团公司 第十三研究所, 石家庄 050051)

摘要: 选频网络广泛用于通信领域, 开关滤波器是选频网络中的关键部件。开关滤波器组采用 PIN 开关和腔体滤波器技术, 用 ANSOFT 仿真软件和 HFSS 高频仿真软件进行电路优化设计, 管芯采用烧结工艺, 产品的测试结果为通道隔离 ≥ 80 dBc、带外抑制 ≥ 70 dBc (矩形系数为 2)、频率为 8.4 ~ 18.4 GHz, 通过 5 路滤波器组实现, 每个滤波器带宽为 2 GHz。电路的优化设计有效地改善了开关滤波器通道隔离度和带外抑制等技术指标, 由于开关电路的频率范围宽, 通过改变滤波器的频率, 可形成系列化开关滤波器组产品。

关键词: 开关; 滤波器; 隔离度; 带外抑制

中图分类号: TN713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-353X (2009) 06-0598-04

Research and Fabrication of Switch Filter Bank

Zhang Yuping, Gao Cuizhuo

(The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Switch filter bank is a key device in frequency-selective net which is widely used in communication field. With technology of pin switch and cavity filter, optimization of ANSOFT and HFSS software, technics of chips sinter, switch filter bank achieves high specifications: isolation ≥ 80 dBc, sideband rejection ≥ 70 dBc (squareness factor is 2), frequency range is from 8.4 to 18.4 GHz. Frequency band is divided into 5 equal interval which is 2 GHz. Isolation and sideband rejection have been improved by optimized design. Series of products can be manufactured according to frequency of filter with wide frequency band switches.

Key words: switch; filter; isolation; sideband rejection

EEACC: 1270

0 引言

随着宽带通信技术的发展, 选频网络广泛用于频率合成器、发射机、接收机, 要求选频信号频谱纯度高、快速跟踪频率变化、频带宽等性能。用 ANSOFT 仿真软件和 HFSS 高频仿真软件优化设计的开关滤波器组带外抑制度高、开关通道之间的隔离度高, 有效地提高了选频信号的频谱纯度; 开关切换时间在微秒级以下, 开关时间快, 能够快速跟踪频率变化; 开关滤波器组由多路开关滤波器组成, 通过开关组切换到所需的波段, 能够满足宽带通信的要求。

1 工作原理

开关滤波器组由输入单刀多掷开关、滤波器组、输出单刀多掷开关、开关驱动控制电路构成, 工作原理图如图 1 所示。开关电路由 PIN 二极管组成, 开关时间短, 二极管正压导通, 负压截止, 二极管的导通和截止状态由驱动控制电路控制。滤波器采用腔体 IDD 结构交指滤波器, 带外抑制高。多路开关滤波器的频率为 8.4 ~ 18.4 GHz, 通过 5 路开关滤波器来实现, 每路滤波器的带宽为 2 GHz。例如, 当选频信号频率为 8.4 ~ 10.4 GHz 时, 控制电路驱动第 1 路输入开关、第 1 路输出开关设置为导通, 其他的输入、输出开关设置为截止, 第 1 路开关及滤波器处于工作状

态。其他路的滤波器由于相应的输入、输出开关截止而处于停止工作的关断状态。

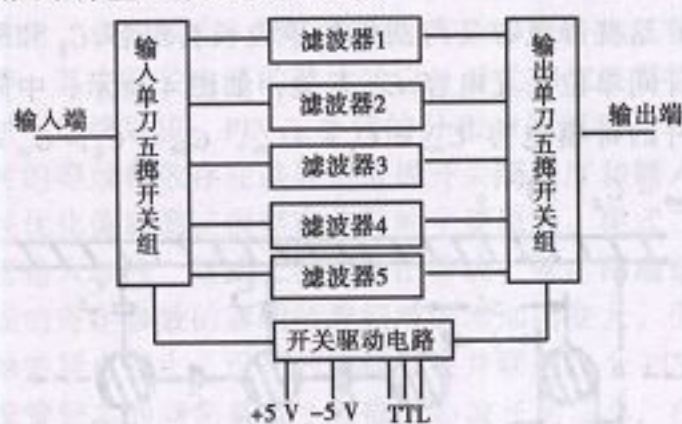


图1 开关滤波器组件电原理图

Fig.1 Schematic diagram of switch filter bank

2 电路优化设计

2.1 PIN 开关设计

在设计开关电路时主要考虑响应时间和隔离度这两项技术指标,选择响应时间快的器件,通过仿真软件进行电路优化,设计出高隔离度的开关电路。

开关滤波器组中的开关电路响应时间要求在微秒级以下, GaAs 器件的开关响应时间很短,但与 TTL 控制电平不兼容,一般由专门的偏置电路来驱动,而且 GaAs 开关的隔离度也比较低,因此选择能够满足要求的其他器件。PIN 二极管是开关滤波器中开关电路通常采用的器件,开关响应时间由 PIN 二极管的响应时间决定,二极管的响应时间由载流子寿命、正向导通电流、反向电流等参数决定^[1]。

$$T_s = \tau \ln(1 + I_s/I_r) \quad (1)$$

式中: T_s 为 PIN 二极管的开关响应时间; τ 为载流子寿命; I_s 为正向导通电流; I_r 为反向电流。

例如,某型号的 PIN 二极管载流子寿命为 7 ns, 单个 PIN 管的反向电流为 20 mA, 正向导通电流为 10 mA, 根据上述二极管开关响应时间公式计算出该型号的 PIN 二极管的开关响应时间为 2.8 ns。综合考虑 PIN 二极管载流子寿命、功率容量、二极管的分布参数等因素,合理地选择 PIN 二极管,能够满足开关响应时间的要求,通过 ANSOFT 仿真软件对开关隔离度进行优化,设计出能够满足通道高隔离度的快速响应的单刀多掷开关。

PIN 开关的电路结构可分为串联型、并联型、串并组合型等。无论采取哪种电路结构,无论是在低频段还是在高频段,由一个 PIN 管设计的开关通

道隔离度不会超过 40 dBc^[2], 如果开关的隔离度要求比较高,必须采用多个 PIN 二极管来实现。

简单的多个 PIN 管并联或者多个 PIN 管级联的开关电路最大隔离度为每增加一个 PIN 管隔离度增加 6 dB, 插入损耗随着所用 PIN 管数量的增加而增加^[2]。当 N 个级联或者 N 个并联 PIN 管的排列间距为工作波长四分之一 ($\lambda/4$) 时,在这个频率下复合结构的隔离度为一个 PIN 管隔离度的 N 倍, PIN 管的寄生电抗相互抵消,复合结构的插入损耗很小。PIN 开关复合结构排列间距为 $\lambda/4$ 时隔离度高、插入损耗小,但应用频带比较窄 ($f/10$)。

PIN 开关复合结构多种多样,如 Π 型、T 型、桥型,这三种是最常用的基本形式,其他结构大部分可以分解为这三种形式。开关滤波器组的频率为 8.4 ~ 18.4 GHz, 分别通过 5 路滤波器组实现,每个滤波器带宽为 2 GHz。在开关频率比较宽的情况下,串/并联型结构的通道隔离度远远大于简单的多个级联或者多个并联结构的隔离度,宽带开关的电路通常采用串/并联型结构。PIN 开关复合结构的通道隔离度、插入损耗与开关网络的阻抗关系为^[2]

PIN 开关复合结构的通道隔离度

$$L = 10 \lg \left[(1 + Z_0/2R_s)^2 + (X_c/2Z_0)^2 (1 + Z_0/R_s)^2 \right] \quad (2)$$

PIN 开关复合结构的插入损耗

$$IL = 10 \lg \left\{ (1 + R_s/2Z_0)^2 + [(Z_0 + R_s)/2X_c]^2 \right\} \quad (3)$$

其中: $X_c = 4\pi f C_i$

式中: L 为通道隔离度; Z_0 为特性阻抗; R_s 为开关网络的阻抗实部; X_c 为开关网络的阻抗虚部; C_i 为开关网络的寄生电容; f 为选频网络某路的频率。

仿真的单刀五掷开关通道隔离度优于 90 dBc, 插入损耗在 1 dB 以内。

图 2 所示为单刀五掷开关电路原理图, 开关电路由 5 路结构相同的串/并联二极管电路组成, 5 路并联, 每路对应 1 个频段。每路由 1 只梁式 PIN 二极管和 3 个并联的 PIN 二极管管芯组成。

开关滤波器组的通道隔离度一般要求优于 60 dBc, 本组件的隔离度优于 80 dBc。如果选择多路集成开关单片, 由于集成单片 PIN 管芯之间分布参数影响, 通道隔离度很难达到要求, 结构形式也不灵活。图 3 所示为单刀五掷开关的结构, 采取一串三并的 PIN 二极管结构形式, 其中串联二极管采

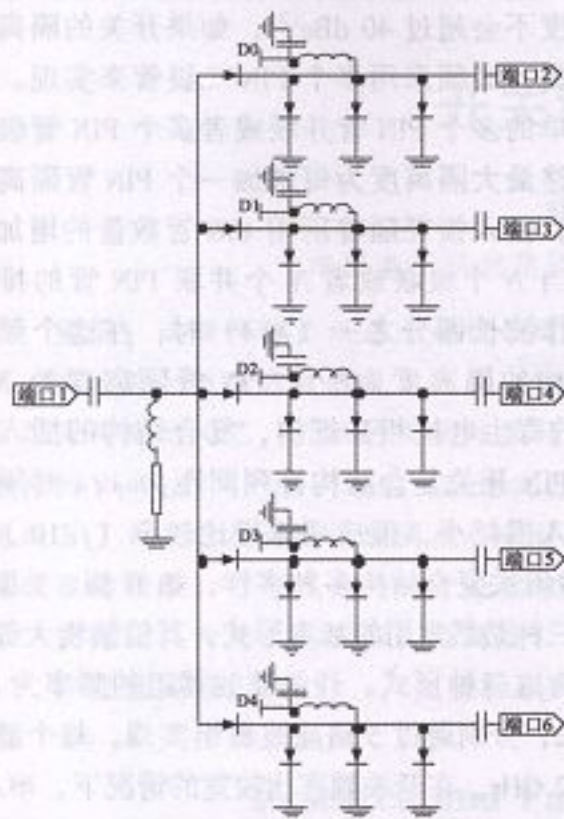


图2 单刀五掷开关原理图

Fig.2 Schematic diagram of SP5T switches

用梁式二极管，分布电容很小，并联二极管采用管芯封装，有效地提高了隔离度。并联管芯的装配采用烧结工艺，把管芯直接烧结在盒体的底部，通过键合线与基板上的微带线连接^[3]。

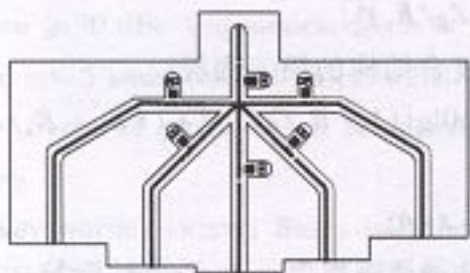


图3 单刀五掷微波开关结构

Fig.3 Structure of SP5T switches

2.2 滤波器设计

在设计滤波器电路时主要考虑频率范围和带外抑制这两项技术指标，通过 HFSS 高频仿真软件进行电路优化设计，设计出高带外抑制的滤波器电路。采用腔体圆杆 IDD 结构交指滤波器，便于设计滤波器的频率带宽，3 dB 带宽可覆盖 1% ~ 80% 或更宽，谐振器数目可从 2 ~ 11 个或更多。交指滤波器是在两平行接地板间平行放置几个相同的圆杆，圆杆的中心距离为 S' ，两杆的中心线间距为 b ，相邻圆杆表面间距离为 S 。

在计算耦合圆杆的设计数据时，忽略了相邻杆以外的边缘电容影响，用两个沿结构传输的 TEM

正交模来描述，即奇模和偶模。这两个 TEM 模具有不同的特性阻抗，它们与圆杆对地的静电容有关；这些静电容又与圆杆的单位长自电容 C_g 和两圆杆间单位长互电容 C_m 有关，如图 4 所示，中间圆杆的奇模电容 $C_{oo} = C_g + 4C_m$ ， $C_{oe} = C_g$ ， $C_m = (C_{oo} - C_g) / 4$ ^[4]。

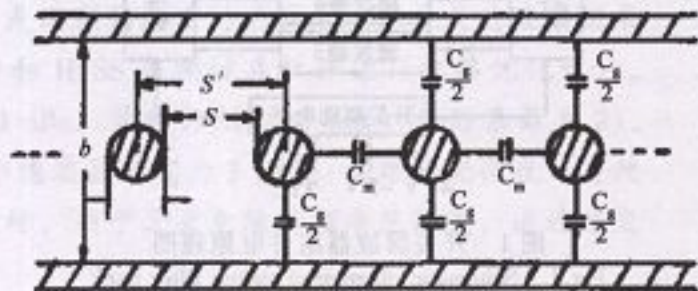


图4 平行接地板间的耦合圆杆

Fig.4 Coupling round poles between parallel earth-plates

在选定滤波器的结构后，经过 HFSS 高频仿真软件建模优化设计，用 9 节滤波即可实现带外抑制优于 70 dBc 的目标（矩形系数 2），滤波器带外抑制的实测结果为 85 dBc。滤波器盒体采取铝镀银结构，便于和开关的级联焊装。

3 实验结果与分析

3.1 开关滤波器组优化值和测试值比较

用 ANSOFT 仿真软件和 HFSS 高频仿真软件进行电路优化设计，电路板选取性能良好的基板材料，微带线镀金，每路串/并联开关电路中串联的二极管焊接在电路板上，3 个并联的二极管烧结在盒体的底部，盒体采用导热性能良好、强度大、密度小的铝合金材料，盒体表面镀银。仿真结果如图 5 所示。 IL 为插入损耗。

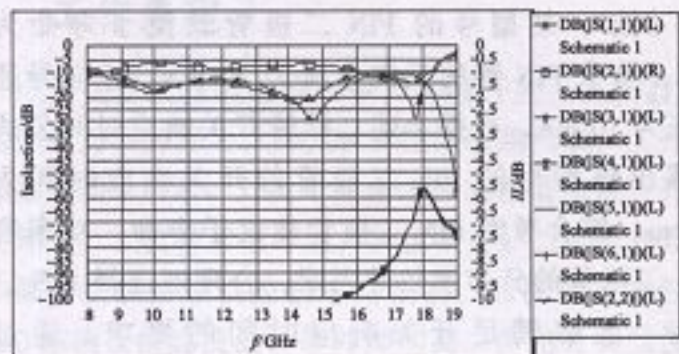


图5 单刀五掷开关仿真结果

Fig.5 Optimization results of SP5T switches

仿真结果为开关插入损耗 < 1 dB，驻波比 < 1.5 ，隔离度 > 90 dBc。测试结果为开关插入损耗 < 1.5 dB，驻波比 < 1.8 ，隔离度 > 84 dBc。

3.2 开关滤波器组件隔离度、插入损耗的误差来源

影响开关滤波器组性能的因素很多, 包括腔体效应、级联效应、器件模型、寄生参数、加工精度等。其中开关电路的腔体效应、开关和滤波器级联时不连续效应、PIN 二极管的分布参数模型与优化时的等效参数存在差异是造成开关隔离度和插入损耗优化值和测试值存在差异的主要原因。梁式二极管输入带线、梁式二极管输出带线、管芯两端键合线的寄生参数的影响随着频率的增加而变大, 引起的差异也越大。设计的每路开关并联的 3 个 PIN 二极管管芯的间距是每个频带中心波长的 $\lambda/4$, 在进行烧结工艺时, 间距不严格为中心波长的 $\lambda/4$; 在进行腔体圆杆 IDD 结构交指滤波器金加工时存在机械加工误差。另外高频仿真软件考虑的电磁场分布与实际差异也是引起误差的来源。

4 结语

开关滤波器组采用开关响应时间快的 PIN 二极管、带外抑制高的腔体圆杆 IDD 结构交指滤波器, 用 ANSOFT 仿真软件和 HFSS 高频仿真软件优化设计出隔离度高、带外抑制高、频带宽的单刀五掷开关滤波器组。优化值和实测值基本吻合验证了设计方

案、装配工艺的可行性。在研制过程中, 通过增加各路间的屏蔽措施, 解决了通道隔离高的难题。开关电路的频率范围较大, 合理改变滤波器的频率和路数, 便可形成系列化开关滤波器组产品。

参考文献:

- [1] CAVERLY R H, HILLER G. Distortion in p-i-n diode control circuits [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1987, 35(5): 492-501.
- [2] 惠普公司半导体产业事业部, 无线半导体应用指南 (一) [K]. 惠普公司, 23-109.
- [3] 端木义清. 宽带单刀多掷 PIN 开关的设计 [J]. 雷达与对抗, 2005(4): 54-56.
- [4] 甘本拔, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与设计 (上册) [M]. 北京: 科学出版社, 1973: 239.

(收稿日期: 2008-12-26)

作者简介:

张宇平 (1974—), 男, 石家庄人, 工程师, 研究方向为微波电路设计;



高翠娜 (1965—), 女, 石家庄人, 高级工程师, 研究方向为微波测试、计算机仿真。