

DDS 波形合成技术中低通椭圆滤波器的设计

刘抒珍, 童子权, 任丽军, 刘小红

(哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:以设计低通椭圆滤波器为目的,依据 DDS 的基本原理,采用了 EDA 仿真手段,研究了低通椭圆滤波器的设计方法,确定了滤波器的阶数和拓扑结构,并设计了相关参数.得出了截止频率为 120 MHz 的 9 阶低通椭圆滤波器幅频特性好,通带波纹小于 0.25 dB,具有快速的衰减速率,在 144 MHz 处衰减为 70 dB.

关键词: DDS; 低通椭圆滤波器; EDA 仿真

中图分类号: TN713.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2683(2004)05-0022-03

Design of Low-pass Elliptic Filter on DDS

LIU Shu-zhen, TONG Zi-quan, REN Li-jun, LIU Xiao-hong

(College of Measure-control Technology & Communication Engineering, Harbin Univ. Sci. Tech., Harbin 150040, China)

Abstract: Low-pass elliptic filter is designed according to the primary principle of direct digital synthesize technique using EDA simulation. The paper researched the method of designing low-pass elliptic filter, confirmed the order and framework of filter, and designed correlative parameters. A 9th-order low-pass elliptic filter is attained that its cut-off frequency is 120 MHz; its phase frequency characteristic is good; its passband ripple is less than 0.25 dB; and has speedy attenuation, which is 70 dB in 144 MHz.

Key words: DDS; low-pass elliptic filter; EDA simulation

低通滤波器是信号发生器中信号调理电路的重要部分,其核心原理大多采用 DDS 技术,即直接数字式频率合成技术.采用 DDS 技术的信号发生器具有良好的频率分辨率和快速、连续的变频性能,很宽的相对带宽.但是,由于 DDS 有一个明显的缺点,输出频率越接近 Nyquist 带宽的高端,采样点数越少,其输出的杂散干扰就越大.DDS 波形合成技术中低通滤波器的设计尤其重要,滤波特性的优劣对输出信号的性能起着重要的影响.本文就此问题,提出了设计一个截止频率为 120 MHz 的低通椭圆滤波器,确定滤波器的阶数和拓扑结构,并设计相关参数.

1 低通滤波器的设计

根据直接数字合成技术的原理^[1],输出信号频率 f_o 、晶振时钟 f_c 及频率控制字 ΔP 的关系为

$$f_o = \Delta P f_c / 2^N \quad (1)$$

目前有许多性能优越的 DDS 集成芯片,如 AD 公司的 AD9852. AD9852 的内部工作频率最高可达 300 MHz,内置 4 倍至 20 倍的可编程参考时钟倍频器. AD9852 有 5 种工作模式,分别为 FSK, BPSK, PSK, CHIRP 和 AM. 与其他 DDS 芯片相比,AD9852 的突出优点是工作模式多,输出初始相位、幅度可

收稿日期: 2004-05-17

作者简介: 刘抒珍(1980-),女,哈尔滨理工大学硕士研究生.

控, 频率分辨率高, 数模转换精确度高. 由奈奎斯特采样定理可知, 输出信号频率最高值是 DDS 芯片的时钟频率的一半, 但是为了得到较好的输出杂散性能, 一般让输出的信号频率小于参考频率的 40%, 即尽量使采样点数取得多一些, 因此 AD9852 能输出最高频率为 120MHz.

滤波器可以分为模拟滤波器和数字滤波器, 模拟滤波器又可以分为无源滤波器和有源滤波器. 一个滤波器是用一组输入-输出对或者激励-响应对表征的系统. 滤波器的性能用一些参数来表征, 最常用的技术参数是频率响应, 可以用两个 $j\omega$ 的多项式之比表示, 称传递函数. 根据传递函数的形式, 比较普遍的滤波器有巴特沃思、切比雪夫滤波器和椭圆滤波器.

1.1 滤波器的选择方案

采用 AD9852 的 DDS 系统中, 可以输出的信号频率最高为 120MHz, 则低通滤波器的截止频率为 120MHz, 由于有源滤波器中大多数运算放大器的开环增益不够和频带的限制, 有源滤波器主要应用于低频场合, 因此设计采用无源低通滤波器. 又根据传递函数的形式, 巴特沃思和切比雪夫滤波器的传递函数都是一个常数除以一个多项式, 为全极点网络, 仅在无限大阻带处衰减为无限大, 而椭圆函数滤波器在有限频率上既有零点又有极点. 极零点在通带内产生等波纹, 阻带内的有限传输零点减小了过渡区, 可获得极为陡峭的衰减特性曲线, 所以采用椭圆函数滤波器^[2].

椭圆函数滤波器的幅度函数为

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 R_n^2(\omega)} \quad (2)$$

式中 ε 为波纹参数, 有理函数 $R_n(\omega)$ 为

$$R_n(\omega) = \frac{\omega(\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - \omega^2) \cdots (\omega_k^2 - \omega^2)}{(1 - \omega_1^2 \omega^2)(1 - \omega_2^2 \omega^2) \cdots (1 - \omega_k^2 \omega^2)} \quad (3)$$

当 n 为奇数时, $k = (n-1)/2$.

$$R_n(\omega) = \frac{(\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - \omega^2) \cdots (\omega_k^2 - \omega^2)}{(1 - \omega_1^2 \omega^2)(1 - \omega_2^2 \omega^2) \cdots (1 - \omega_k^2 \omega^2)} \quad (4)$$

当 n 为偶数时, $k = n/2$.

如图 1 所示, 比较了五个极点的巴特沃思滤波器、0.1 dB 波纹的切比雪夫滤波器和 0.1 dB 波纹、二传输零点的椭圆函数滤波器的特性. 显然, 椭圆函数滤波器在过渡区内具有快得多的衰减速率.

1.2 椭圆函数滤波器的设计

在 DDS 波形合成技术中, 滤波器的设计首先主要考虑滤波的幅频特性, 电路的输入、输出阻抗匹

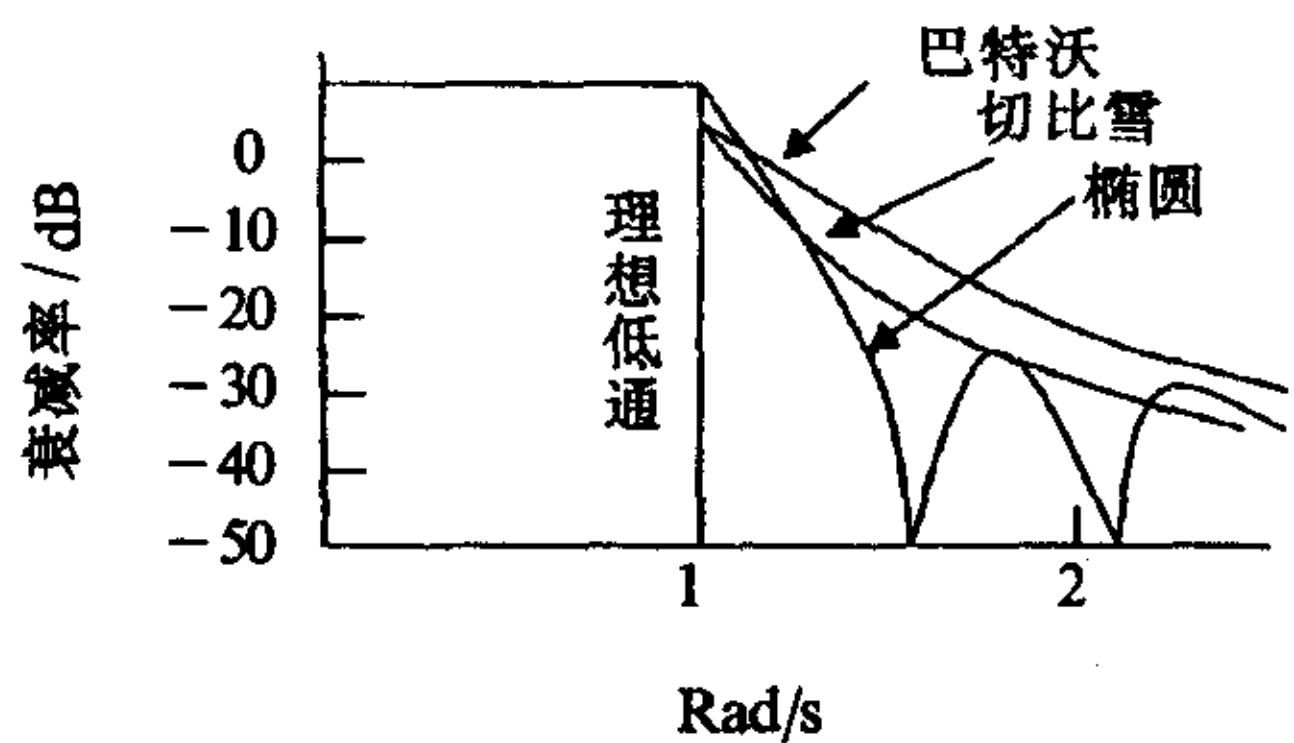


图 1 三阶巴特沃思、切比雪夫和椭圆函数滤波器的比较

配, 截止频率等, 根据设计参数确定具体曲线和归一化的元件值, 再根据实际去归一化得到实际的元件值^[3]. 其中滤波器的归一化是指将所有电抗元件都除上一个频率标度系数 (FSF), 就可把一个已知频率响应标定到不同频率范围. 以一个函数发生器为例, 它采用 AD9852 芯片为 DDS 核心, 输出最高频率为 120MHz, 输出电阻为匹配电阻即 50Ω, 要求滤波器有平坦的幅频特性和快速的衰减率, 本文设计的椭圆滤波器的主要指标如下: ① 3 dB 截止频率为 120 MHz, 电阻 R_1, R_2 为 100Ω; ② 在 144 MHz (f_s) 处最小衰减为 70 dB; ③ 通带波纹小于 0.25 dB.

椭圆滤波器的电路拓扑图如图 2, 根据电路拓扑图给出椭圆滤波器设计的具体步骤.

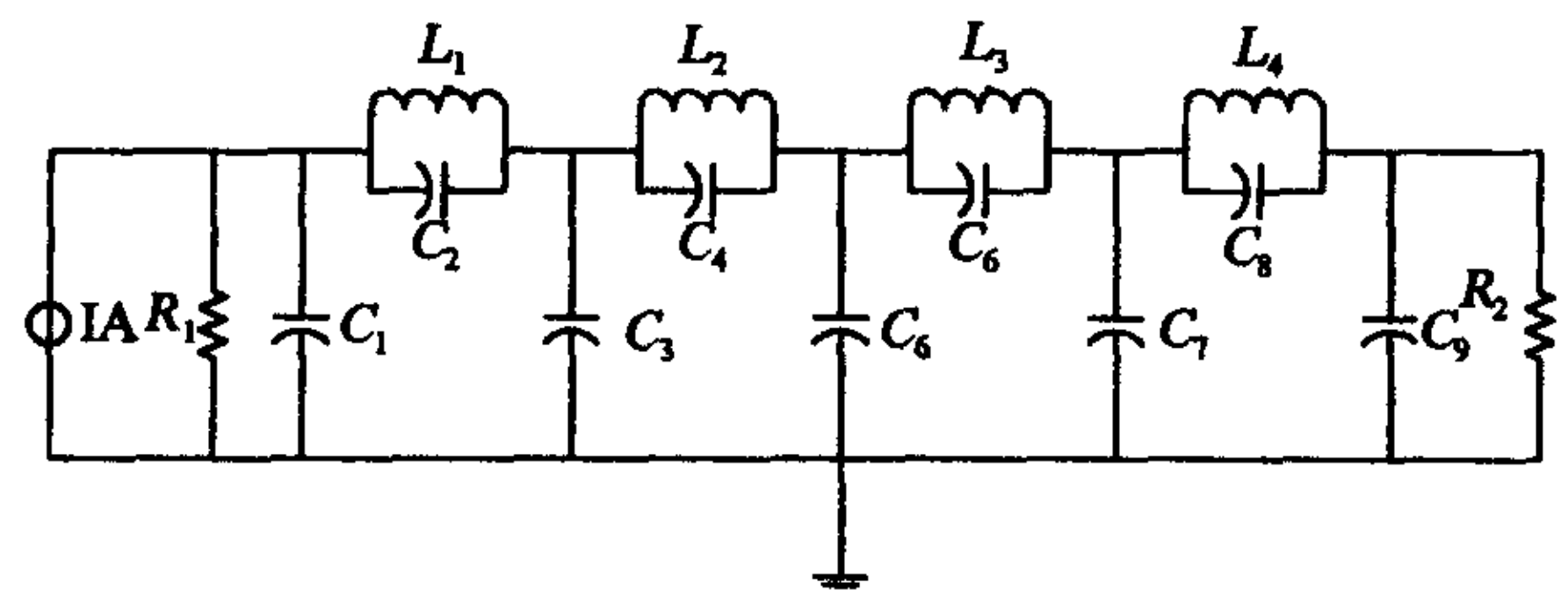


图 2 椭圆滤波器的电路拓扑图

- 1) 计算陡度系数 $A_s = f_s/f_c = 144/120 = 1.2$;
- 2) 计算反射系数 $\rho = \sqrt{\varepsilon^2/(1 + \varepsilon^2)} = 25\%$;
- 3) 根据陡度系数 A_s 、最小衰减 A_{min} 和反射系数 ρ ; 参考椭圆函数滤波器阶数曲线得到设计所需滤波器的阶数为 9 阶;
- 4) 编号查归一化的电容和电感值, 如表 1.

表 1 元件值

元件值	归一化	去归一化	元件值	归一化	去归一化
C_1/pF	1.261	16.7	C_8/pF	0.385	4.71
C_2/pF	0.103	1.37	C_9/pF	1.036	13.7
C_3/pF	1.746	23.1	$L_1/\mu H$	1.296	0.172
C_4/pF	0.627	8.32	$L_2/\mu H$	0.9521	0.126
C_5/pF	1.357	18.0	$L_3/\mu H$	0.8239	0.109
C_6/pF	0.840	11.1	$L_4/\mu H$	0.028	0.136
C_7/pF	1.476	19.6			

5) 用 $Z=100\Omega$ 和频率标度系数 $FSF(2\pi f_c)$ 对滤波器去归一化. 根据去归一化的原则:

$$L' = \frac{L \times Z}{FSF} \quad C' = \frac{C}{FSF \times Z}$$

得到去归一化后的元件值如表 1. 根据以上方法得到设计出的低通椭圆滤波器, 还需要能直观地看到滤波器的幅频特性, 才能真正知道设计的滤波器性能是否满足设计要求. 当前已经有很多用于电路仿真的元件, 本文采用 Multisim 2001 仿真软件^[4] 仿真, 可以得到采用表格 1 去归一化元件值的低通滤波器幅频特性, 如图 3.

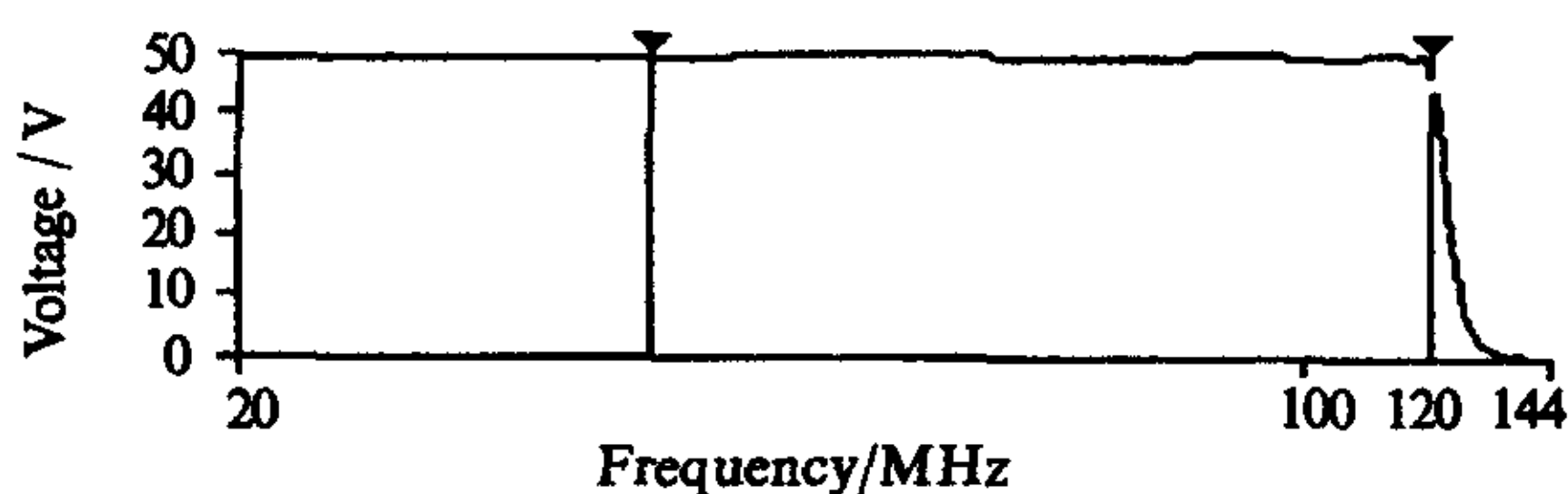


图3 理想元件值构成低通椭圆滤波器的幅频特性

表 1 中的去归一化的元件值都是理想值, 由于制作工艺, 元器件公司并不能提供这些理想元件值, 因此, 应该根据实际情况恰当的修改元件值, 使得设计出滤波器的幅频特性能更接近于理想滤波器. 图 4 是采用实际元件值构成的滤波器幅频特性.

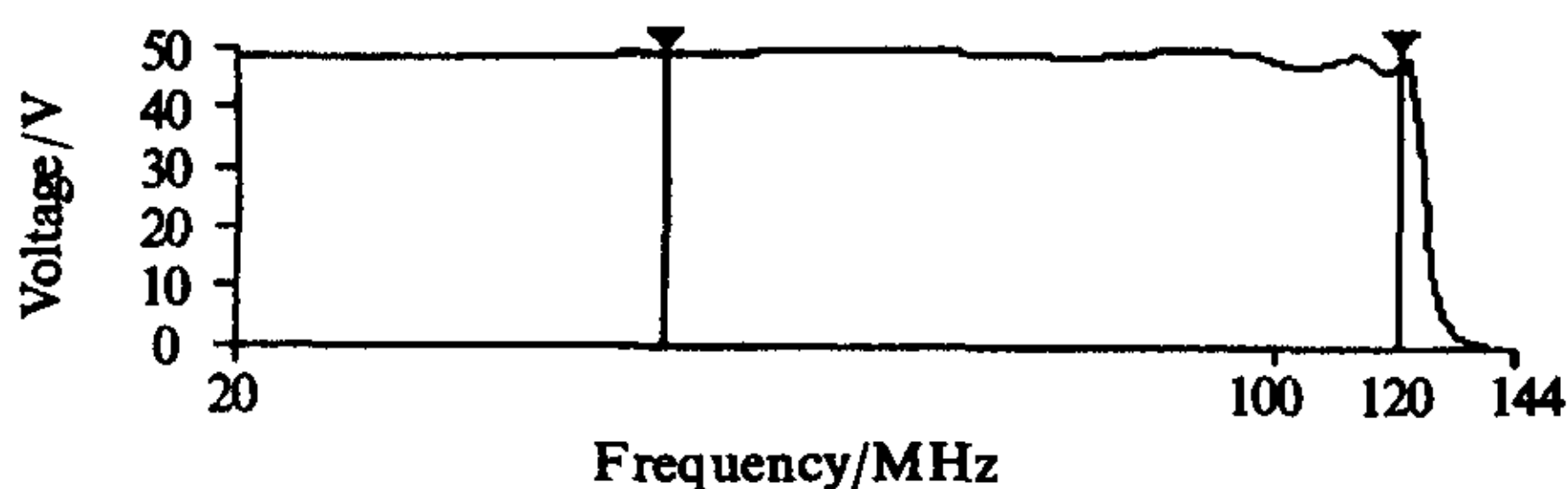


图4 实际元件值构成低通椭圆滤波器的幅频特性

2 幅频特性的补偿

从图 3 和图 4 的对比可以看出, 由于实际值与理想值之间的差异, 图 4 中后一个游标表示出 120 MHz 处的幅度比图 3 中 120 MHz 处的幅度有衰减; 元件品质因数不够大, 也会在截止频率范围内使频率响应下凹或变圆滑; 同时在一个完整的系统中, 低通滤波器的输出还应该经过放大电路, 放大电路主要由运算放大器组成, 根据运算放大器的频率响应特性, 运算放大器会对高频信号的幅度衰减, 这

些因素使得输出的高频信号的幅度会有较大的衰减. 设计低通滤波器时, 应该考虑到在频率滤波器的最后一级加上电路补偿部分. 补偿的原则是使得幅度值在高频处有一定的增大, 这样可以补偿高频信号在后面的放大电路部分中的幅度衰减. 加上补偿部分的椭圆滤波器的电路拓扑图如图 5.

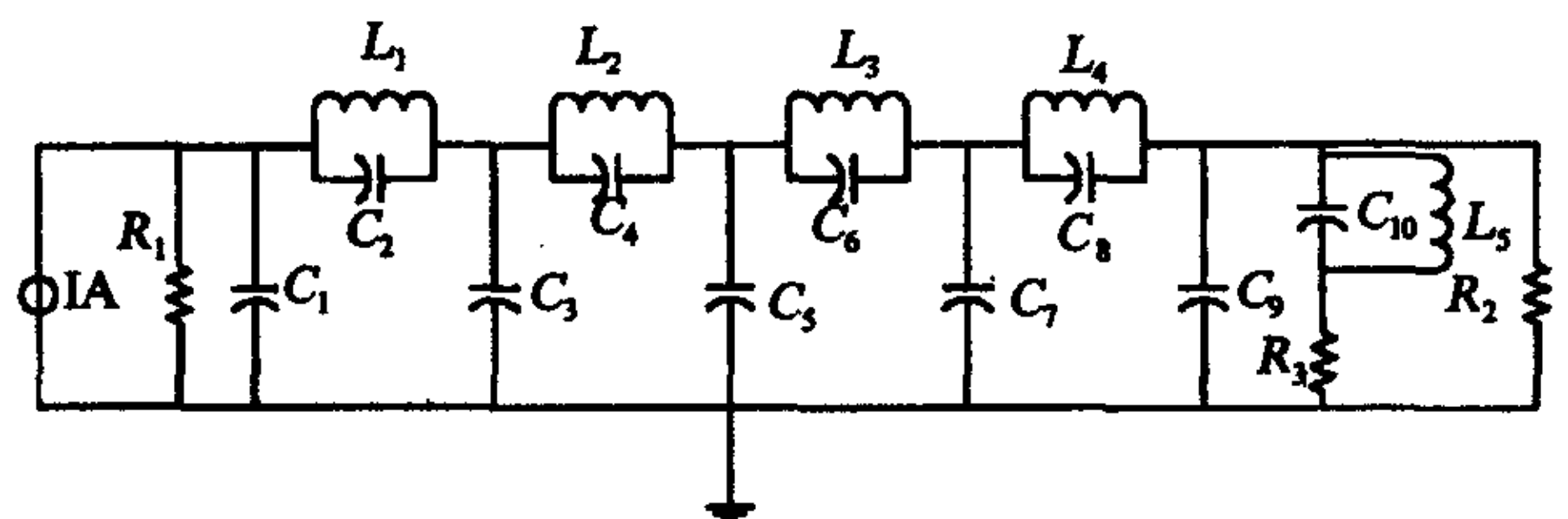


图5 椭圆滤波器的电路拓扑图

图 5 中采用的是并联非定阻型, 因为谐振电容可使抽头电感减小, 其中 R_3 为 R_2 值的 $1/2$. 下面给出计算 C_{10} 和 L_5 的具体公式:

1) 计算 $K = 10^{A_{dB}/20}$, 其中 A_{dB} 是所要求的总提升分贝数;

2) 计算 $b = f_r/f_b$ 或者 $b = f_b/f_r$, 选择大于 1 的 b , 其中 f_r 是对应于 $A_{dB}/2$ 的频率;

$$3) \text{ 计算 } L_5 = \frac{R_2(b^2 - 1)\sqrt{K}}{4\pi f_b b^2 (K - 1)}, \quad C_{10} = \frac{2}{(2\pi f_r)^2 L_2}$$

利用 Multisim 2001 适当的修改元件值, 就可以得到较理想的值, 仿真后的幅频特性图如图 6.

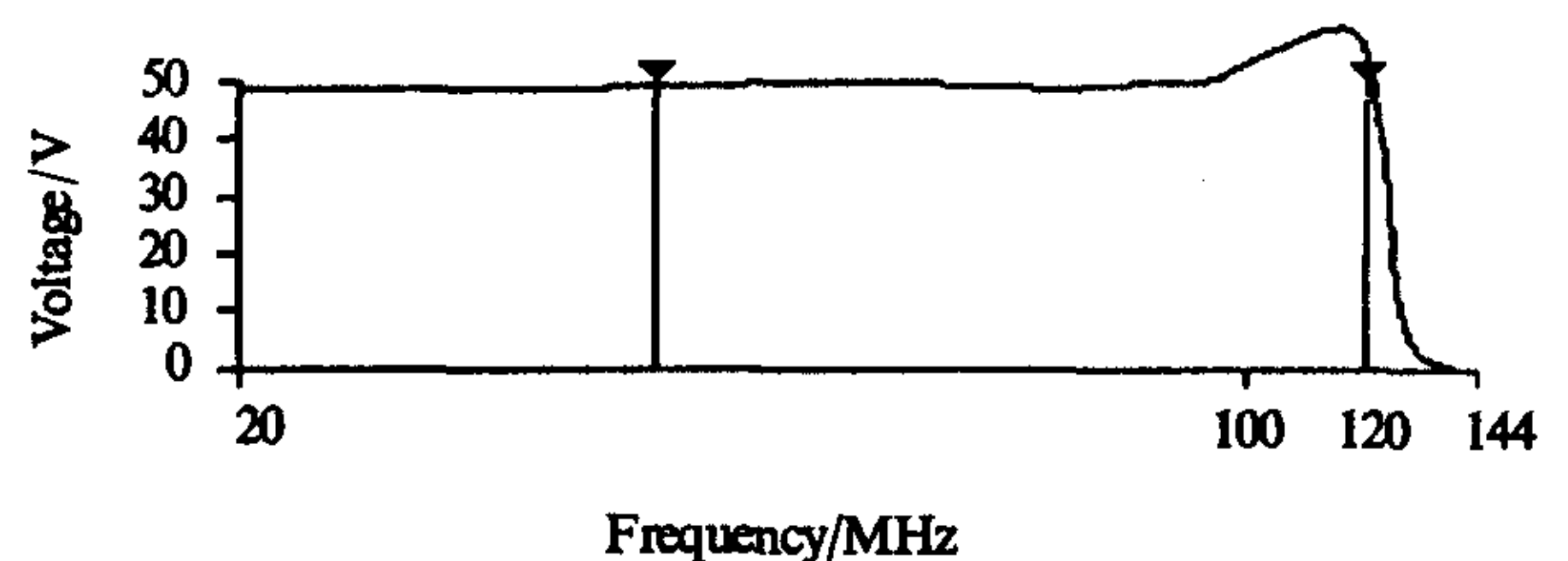


图6 加有补偿低通椭圆滤波器的幅频特性

3 结论

本文设计的低通椭圆滤波器的阶数为 9 阶, 截止频率为 120 MHz, 其通带波纹小于 0.25 dB, 具有良好的幅频特性和快速的衰减速率. 在 144 MHz 处衰减为 70 dB, 对高频信号的滤波作用明显, 输出信号特性好. 利用本文的方法可设计适合各个频段波形的低通椭圆滤波器.

[1] 潘炳松, 许明, 潘锦. DDS 芯片 AD9852 及其应用[J]. 电子技术, 2002, (4): 46-48.

[2] (美)阿瑟 B 威廉斯, 喻春轩译. 电子滤波器设计手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 1986.

[3] 熊俊俏, 卢容德. 模拟椭圆低通滤波器的设计与仿真[J]. 华北航天工业学院学报, 2001, 8(11): 66-67.

[4] 郑步生, 吴渭. Multisim 2001 电路设计及仿真入门与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.