

文章编号: 2095-4980(2016)03-0396-05

耳蜗式多路耦合器的小型化设计

周劲波, 郭庆功

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 耳蜗式多路耦合器在现代通信系统中有着广泛的应用前景。为了进一步减小耳蜗式多路耦合器的尺寸, 采用集总参数与分布参数相结合的半集总参数元件, 针对电路中的低阻抗线进行了有效的小型化设计。设计了一款工作于 200 MHz~1 000 MHz 的恒相对带宽为 18% 的 10 通道耳蜗式多路耦合器。仿真和测试结果表明, 这种小型化方法使耳蜗式多路耦合器的尺寸缩减为 137 mm×116 mm。

关键词: 耳蜗式多路耦合器; 小型化; 半集总参数元件; 低阻抗线

中图分类号: TN713^{+.5}

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201603.0396

Miniaturization design of cochlear-based channelizer

ZHOU Jinbo, GUO Qinggong

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: Cochlear-based channelizer has a wide range of applications in modern communication system. Using the quasi-lumped element, an effective miniaturization design is proposed for the low impedance line in circuit, which is aimed at reducing the size of cochlear-based channelizer further. A 10 channels cochlear-based channelizer with 18% constant fractional bandwidth is designed, which works at 200 MHz–1 000 MHz. The simulation and test results indicate this miniaturization method makes the size of cochlear-based channelizer to be reduced to 137 mm×116 mm.

Key words: cochlear-based channelizer; miniaturization; quasi-lumped element; low impedance line

多路耦合器作为现代通信系统的重要组成部分, 被广泛应用于天线复用技术中。在通信设备较多的场合, 往往会出现通信设备间的相互干扰, 严重影响通信质量。多路耦合器可以使多个收发信机共用一个天线, 避免多天线所带来的电磁干扰, 有效改善电磁兼容环境, 提高通信质量^[1-2]。

随着现代通信技术的不断发展, 不仅希望多路耦合器有更低的插入损耗, 更高的通道隔离度, 还希望其结构更加紧凑^[3]。耳蜗式多路耦合器因其简单紧凑的结构和易于集成的特点很好地解决了这些难题。早在 2008 年, Galbraith, Christopher J 便对耳蜗式多路耦合器进行了开创性研究^[4]; 文献[5]介绍了一款 20 MHz~90 MHz 的 26 通道耳蜗式多路耦合器; 文献[6]不仅将耳蜗式多路耦合器应用到了 UWB 系统, 而且通过多层集成电路实现了高度集成。文献[7]最先在国内对耳蜗式多路耦合器开展了相关研究, 仿真实现了一个用于 UHF 频段的 16 通道耳蜗式多路耦合器。如今, 设备的小型化已然成为亟需解决的问题, 特别是那些工作频率较低的设备。文献[6]虽然对耳蜗式多路耦合器的小型化进行了探索, 但其多层集成的结构势必会增加设计难度和加工成本。小型化方案中, 往往首先想到的是提高介质基板的介电常数。高介电常数虽然可以实现设备的小型化, 但会对实际的加工和焊接造成困难。缺陷地、交叉耦合结构虽然是小型化的重点研究方向^[8-9], 但这些结构对于耳蜗式多路耦合器来说都过于复杂, 势必会引入诸多不确定因素。

针对这些问题, 本文采用半集总参数的设计方法, 通过精确控制电路中等效低阻抗线的尺寸来达到小型化的目的。相较于文献^[4], 结构面积缩减了 30%。

收稿日期: 2015-12-14; 修回日期: 2016-01-29

基金项目: 973 计划资助项目(2013CB328902)

1 工作原理

哺乳动物的耳蜗主要负责将声音信号转换为生物电流，并经由听觉神经传递到大脑^[10]。耳蜗的频率选择特性表现为特定频率的声波在其内部结构的特定区域产生共振。其内部结构可以看作是在一个基底膜上覆盖的一系列平行排列的可以和特定频率共振的组织膜^[4]。耳蜗在电学中的建模方程为^[11]：

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} + \frac{L_m(x)C(x)}{1+j\omega R(x)C(x)-\omega^2L_2(x)C(x)}\omega^2V(x)=0 \quad (1)$$

式中： V 是沿线电压； L_m 、 C 、 $1/R$ 和 $1/\omega L_2$ 分别是单位长度的串联电感、并联电容、并联电导和并联电纳。变量 x 定义为沿线位置的归一化值，即 $x=0$ 表示离电路输入端最近的通道所处位置； $x=1$ 表示离电路输入端最远的通道所处位置。根据式(1)，可以得出耳蜗式多路耦合器的电路模型如图 1 所示，其主体结构主要由耦合主路和若干个通道滤波器两部分组成。其中，耦合主路由一组串联电感构成；各通道滤波器则选择输入端呈串联谐振特性的滤波器结构^[7]。

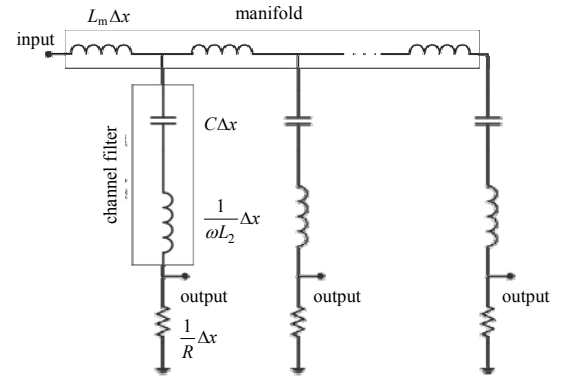


Fig.1 Circuit model of cochlear-based channelizer
图 1 耳蜗式多路耦合器的电路模型

2 结构设计

2.1 耦合主路设计

定义 n 为通道序号，且 $1 \leq n \leq N$ 。当 $n=1$ 时，该通道工作频率最低，当 $n=N$ 时，该通道工作频率最高。结合上面对 x 的定义，有：

$$x=1-n/N, 1 \leq n \leq N \quad (2)$$

对于恒相对带宽的耳蜗式多路耦合器，各元件值有以下指数关系^[11]：

$$L_2(x)C(x) = A_1 e^{\alpha x} \quad (3)$$

$$R(x)C(x) = A_2 e^{0.5\alpha x} \quad (4)$$

$$L_m(x)C(x) = A_3 e^{\alpha x} \quad (5)$$

式中 α 、 A_1 、 A_2 和 A_3 由多路耦合器的最大和最小通道中心频率、通道相对带宽和每个通道中心频率处的相位共同决定。根据式(4)、式(5)，有：

$$L_m(x) = R \frac{A_3}{A_2} e^{\frac{1}{2}\alpha x} = L_0 e^{\alpha x} \quad (6)$$

$$L_0 = R \frac{A_3}{A_2}, a = \frac{1}{2}\alpha \quad (7)$$

将式(2)代入式(6)有：

$$L_m(n) = L_0 e^{a(1-n/N)}, 1 \leq n \leq N \quad (8)$$

通过式(8)即可确定耦合主路的串联电感值。根据经验总结， $L_m(n)$ 的取值应满足其电抗在最低频通道的中心频率处为 $3 \Omega \sim 8 \Omega$ ，在最高频通道的中心频率处为 $10 \Omega \sim 20 \Omega$ ； α 的取值应满足 $0.3 \sim 1.0$ ^[12]。在实际设计过程中需要对其反复迭代优化以达到最好的结果。

2.2 通道滤波器设计

根据耳蜗式多路耦合器的工作特性，假设由公共端进入多路耦合器的频率成分有 $f_1, f_2, \dots, f_n$ ，这些频率成分在沿耦合主路经过通道 n 时，不仅期望与通道 n 对应的频率 f_n 能与通道 n 谐振，顺利进入通道 n ，而且还期望通道 n 对其他频率成分呈开路状态。这就要求通道滤波器的输入端有良好的串联谐振特性，如图 2 所示。

由于管状滤波器具有相对“宽阻”和“高 Q”特点，同时还具有结构紧凑，良好的输入端串联谐振特性，非常适合作为耳蜗式多路耦合器的通道滤波器^[13]。端接电感的管状滤波器由谐振回路和 J 型变换器构成。其中，

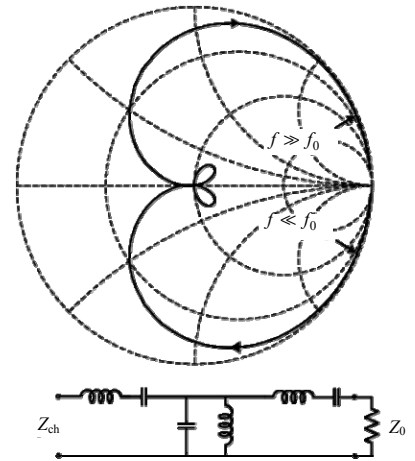


Fig.2 Required input impedance characteristic and the corresponding filter prototype
图 2 期望的端口阻抗特性和对应的滤波器原型

位于滤波器中间部分的谐振回路为串联电感和并联电容组成的 π 型谐振回路, 位于两侧的则是由串联电感和并联电容组成的 Γ 型谐振回路^[3], 如图 3 所示。

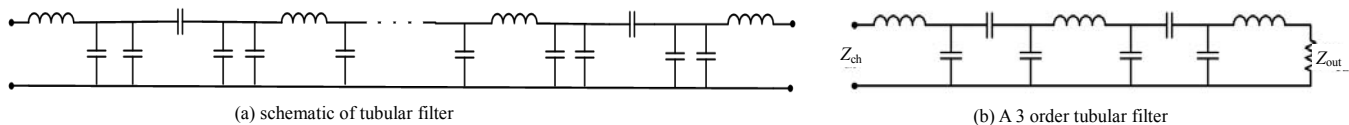


Fig.3 Tubular filter
图 3 管状滤波器

管状滤波器的端口阻抗不对称, 通常选择其输入阻抗 Z_{ch} 为 $5\ \Omega \sim 20\ \Omega$, 以确保整个多路耦合器良好的匹配特性和可实现的元器件值^[4]。图 4 为中心频率 200 MHz, 相对带宽 18% 的三阶管状滤波器的原理图仿真模型与结果。

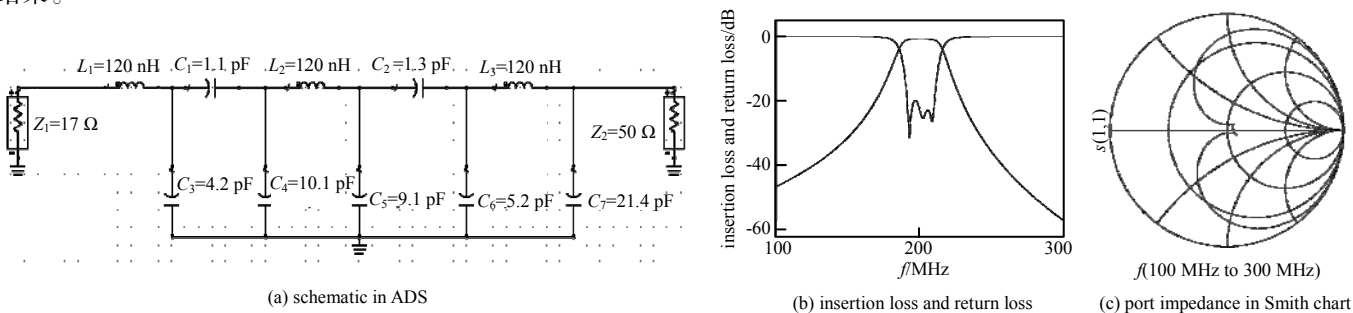


Fig.4 Simulation results of 3 order tubular filter
图 4 三阶管状滤波器仿真结果

3 小型化设计

在电路设计过程中, 如果直接采用集总参数元件, 某些元件的精确度达不到设计要求, 会导致整体性能的恶化; 如果全部采用分布参数元件, 某些元件会占用很大面积, 达不到小型化的要求。采用半集总参数对耳蜗式多路耦合器进行设计, 不仅可以精确控制元件值, 而且还方便对其进行小型化。通道滤波器中前 4 个并联电容用低阻抗抗线代替, 通过调整它们的长宽, 既精确控制了电容值, 又精确控制了低阻抗抗线的形状, 达到了小型化的目的。低阻抗抗线的长度 L 和宽度 W 可由式(9)和式(10)决定^[14]:

$$L = \frac{\lambda_g}{2\pi} \arcsin(\omega C Z_c) \quad (9)$$

式中: λ_g 为波导波长; C 为电容值; Z_c 为低阻抗抗线阻抗值。

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} [(B-1) - \ln(2B-1)] + \frac{\epsilon_r - 1}{\pi \epsilon_r} [\ln(B-1) + 0.293 - \frac{0.517}{\epsilon_r}] \quad (10)$$

式中: h 为介质板厚度; ϵ_r 为相对介电常数; B 由式(11)决定:

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad (11)$$

由式(9)和式(10)可知, 改变低阻抗抗线的阻抗值, 即可改变低阻抗抗线的长度和宽度, 从而改变低阻抗抗线的形状。若所有低阻抗抗线均采用相同的阻抗值, 则势必导致某些通道呈细长状, 整个电路会占用较大的面积; 且某些通道的低阻抗抗线过窄, 不利于优化和实际加工。在小型化的过程中, 可以采取每个通道的低阻抗抗线取不同的值, 使得每个通道的低阻抗抗线趋于方形, 减小整个电路的占用面积。表 1 为某个管状带通滤波器的等效低阻抗抗线采用不同阻抗值时的实际占用面积。

4 仿真与测试

本文中设计一款 10 通道, 200 MHz~1 000 MHz 的耳蜗式多路耦合器, 主要指标: 1) 频率范围: 200 MHz~1 000 MHz; 2) 通道相对带宽: 18%; 3) 通道中心频率处插入损耗 $\leq 2\ \text{dB}$; 4) 通道间隔离度 $\geq 20\ \text{dB}$ 。实际电路模型如图 5 所示。

表 1 低阻抗抗线的占用面积
Table1 Area of low impedance line

impedance / Ω	area / mm^2
5	338
10	321
15	311
20	298
25	291

设计过程中，应先确定通道相对带宽和整个多路耦合器的最高最低工作频率。随后，通道数和通道中心频率由式(12)和式(13)决定^[11]：

$$N \approx 1 + \frac{\ln(\frac{f_N}{f_1})}{\ln(\frac{1+\Delta/2}{1-\Delta/2})}$$

(12)

$$f_{n+1} = f_n \frac{(1+\Delta/2)}{(1-\Delta/2)}, 1 \leq n \leq N-1$$

(13)

其中， Δ 为相对带宽。对于耦合主路电感值，确保其电抗在最低频通道的中心频率处为 $3\ \Omega \sim 8\ \Omega$ ，在最高频通道的中心频率处为 $10\ \Omega \sim 20\ \Omega$ ，最后通过式(8)决定。

电路中， C_0 的引入是为了平衡耦合主路串联电感所造成的端口感性状态，实际设计中需针对具体电路进行反复调谐。电阻 R_0 用以抑制主路的自谐振。主路电感 L_m 和并联电容 C_a, C_c, C_d, C_f 由微带线实现，通道滤波器电感 L ，电容 C_b, C_e, C_g 则由分立元件实现。在实际设计过程中，应该注意先确定表贴元件的标称值，然后再对微带线进行优化。图 6 为通道 1 的三阶管状滤波器优化前后的性能对比(中心频率 $1\ \text{GHz}$)。经过大量的仿真运算与参数优化，最终得到了比较满意的仿真结果。每个通道的低阻抗线阻抗值如表 2 所示。

通道中心频率处插入损耗的对比如表 3 所示。加工实物如图 7 所示，尺寸为 $137\ \text{mm} \times 116\ \text{mm}$ ，与文献[4]相比，尺寸减小了 30% 左右，具有明显的小型化效果。图 8(a)为各通道的插入损耗。其中，仿真结果各通道插入损耗均小于 $2\ \text{dB}$ ，测试结果比仿真结果有所恶化，高频通道处出现了频段衔接不好，存在频率空隙现象，考虑到所有元件均由电烙铁手工焊制，造成的误差均在可接受范围内。图 8(b)为相邻通道间的隔离度。仿真结果均大于 $20\ \text{dB}$ ，测试结果中由于高频通道出现了带宽变窄的情况，隔离度的测试曲线与仿真曲线在高频通道处有一定偏差，但隔离度均大于 $20\ \text{dB}$ 。

表 2 每个通道中低阻抗线的阻抗值

Table2 Impedance of the low impedance line in each channel

channel	impedance/ Ω	channel	impedance/ Ω
1	30.0	6	17.5
2	27.5	7	15.0
3	25.5	8	12.5
4	22.5	9	11.0
5	20.0	10	10.0

表 3 仿真与测试对比——中心频率处插入损耗

Table3 Simulation and test comparison—insertion loss at center frequency

center frequency/MHz	insertion loss(simulated)/dB	insertion loss(measured)/dB
200.0	1.51	1.67
239.6	1.47	1.62
287.0	1.15	2.28
343.7	1.21	2.67
411.7	1.37	2.18
493.1	1.06	1.67
590.7	1.09	3.20
707.5	1.59	3.27
847.4	1.34	2.50
1 015.1	1.71	2.67

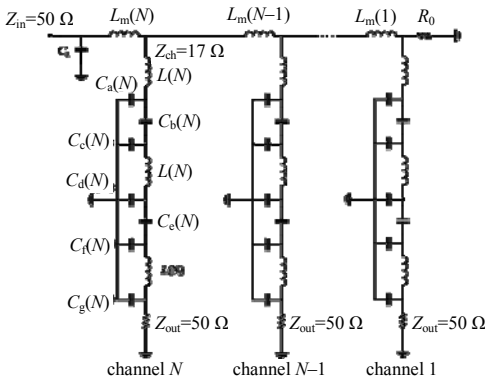


Fig.5 Actual circuit model
图 5 实际电路模型

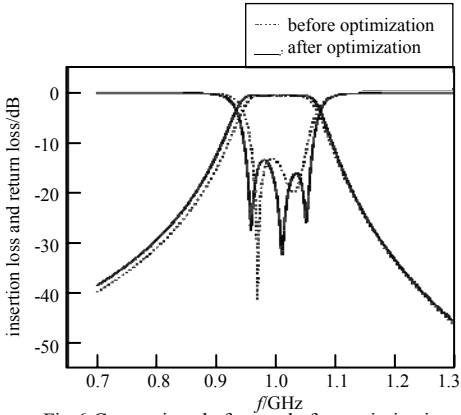


Fig.6 Comparison before and after optimization
图 6 优化前后对比

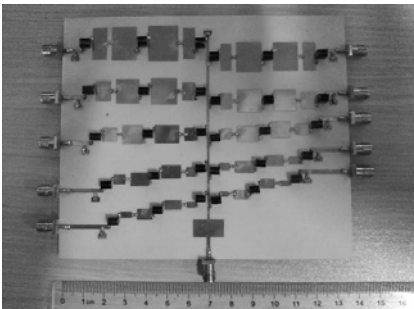


Fig.7 Photograph of a cochlear-based channelizer
图 7 耳蜗式多路耦合器实物图

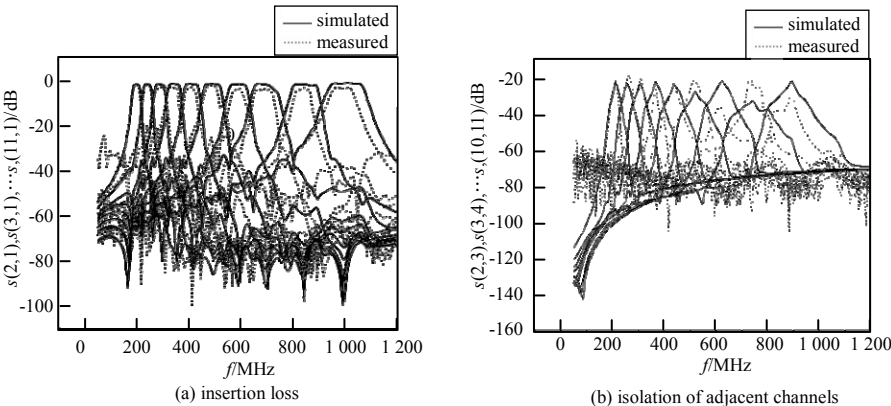


Fig.8 Simulation and test comparison
图 8 仿真与测试结果对比

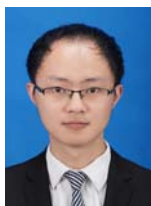
5 结论

研究耳蜗式多路耦合器的理论推导和设计步骤,并对一款 10 通道的耳蜗式多路耦合器进行小型化设计。采用半集总参数设计,通过精确控制低阻抗线的阻抗值,来达到耳蜗式多路耦合器的小型化目标。测试结果与仿真结果吻合良好。耳蜗式多路耦合器凭借其简单的结构,易于集成的特点,加之对其进一步的小型化,降低了加工成本和调试难度。在日益复杂的通信系统中,具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 苏涛. 多路耦合器及其相关理论和技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2004. (SU Tao. Study of multicoupler and related theories and technologies[D]. Xi'an, Shaanxi, China: Xidian University, 2004.)
- [2] 蒋东. 微波多路耦合器技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011. (JIANG Dong. Study on the technology of microwave circuit coupler[D]. Chengdu, Sichuan, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.)
- [3] 陈鹏. UHF 频段耳蜗式多工器的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2013. (CHEN Peng. The study of cochlear-based multiplexer[D]. Wuhan, Hubei, China: Huazhong University of Science and Technology, 2013.)
- [4] GALBRAITH Christopher J. Cochlea-inspired channelizing filters for wideband radio systems[D]. Ann Arbor, Michigan, USA: University of Michigan, 2008.
- [5] REBEIZ G M. A 20–90 MHz 26-channel cochlear-based channelizer[C]// 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT). Anaheim, California, USA: IEEE, 2010: 213–216.
- [6] GALBRAITH C, REBEIZ G M. A cochlea-based preselector for UWB applications[C]// 2007 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium. Honolulu, Hawaii, USA: IEEE, 2007: 219–222.
- [7] 陈鹏, 徐勤芬, 占腊民, 等. UHF 频段耳蜗式多路耦合器的设计与仿真[J]. 现代电子技术, 2013, 36(3): 94–97. (CHEN Peng, XU Qinfen, ZHAN Lamin, et al. Design and simulation of UHF cochlear-based channelizer[J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(3): 94–97.)
- [8] SONG K J, ZHANG F, FAN Y. Miniaturized dual-band bandpass filter with good frequency selectivity using SIR and DGS[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2014, 68(5): 384–387.
- [9] 俞忠武, 王光明, 俞志英. 基于缺陷地面结构和补偿微带线的低通滤波器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2009, 7(1): 28–31. (YU Zhongwu, WANG Guangming, YU Zhiying. A Low-Pass filter based on novel defected ground structure and compensated microstrip line[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2009, 7(1): 28–31.)
- [10] 陈伟冰, 周凌宏, 肖中举. 耳蜗基底膜振动模型的建立与应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2007, 24(3): 221–224. (CHEN Weibing, ZHOU Linghong, XIAO Zhongju. The foundation and application of basilar membrane's vibrant model[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2007, 24(3): 221–224.)
- [11] GALBRAITH C J, WHITE R D, LEI C, et al. Cochlea-based RF channelizing filters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 2008, 55(4): 969–979.
- [12] GALBRAITH C J, REBEIZ G M. Higher order cochlea-like channelizing filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(7): 1675–1683.
- [13] 龚文斌. 一种新型宽阻带管状带通滤波器的设计[J]. 电讯技术, 2011, 51(10): 99–103. (GONG Wenbin. Design of a novel wide stopband tubular bandpass filter[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(10): 99–103)
- [14] 刘学观, 郭辉萍. 微波技术与天线[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012. (LIU Xueguan, GUO Huiping. Microwave Technology and Antenna[M]. Xi'an, Shaanxi, China: Xidian University Press, 2012.)

作者简介:



周劲波(1990–), 男, 四川省雅安市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波耦合器件. email: 1009051928@qq.com.

郭庆功(1967–), 男, 新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州人, 博士, 教授, 主要研究方向为电磁兼容、微波技术应用。