



多端口网络的分析与综合

汇报人：危国锐

指导教师：夏彬

2019年07月02日



上海交通大學

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

1

背景

2

问题的提出

3

二端口网络RLCG参数的提取

4

耦合微带线闭式设计方程研究

5

总结与感想



1

背景

2

问题的提出

3

二端口网络RLCG参数的提取

4

耦合微带线闭式设计方程研究

5

总结与感想



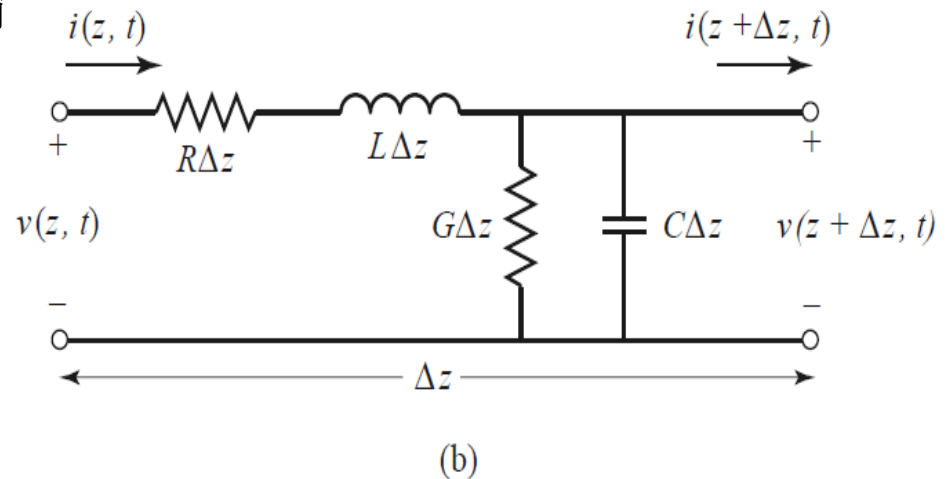
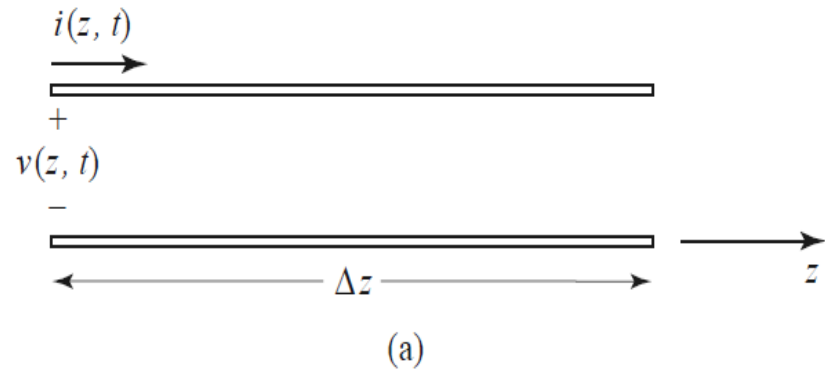
传输线的集总元件电路 (RLCG) 模型



- 一段传输线可模拟为无数段长度无穷小的集总元件电路的级联。
 - R: 单位长度的串联电阻 (Ω/m)
 - L: 单位长度的串联电感 (H/m)
 - C: 单位长度的并联电容 (F/m)
 - G: 单位长度的并联电导 (S/m)

- 由传输线的RLCG模型可导出传输线方程或称电报方程。
 - $$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I(z)$$
 - $$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V(z)$$

- 复传播常数 $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$
- 特征阻抗 $Z_0 = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)}$



微波网络分析

■ 散射矩阵 (S参数)

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_n^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ S_{N1} & \cdots & & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_n^+ \end{bmatrix}$$

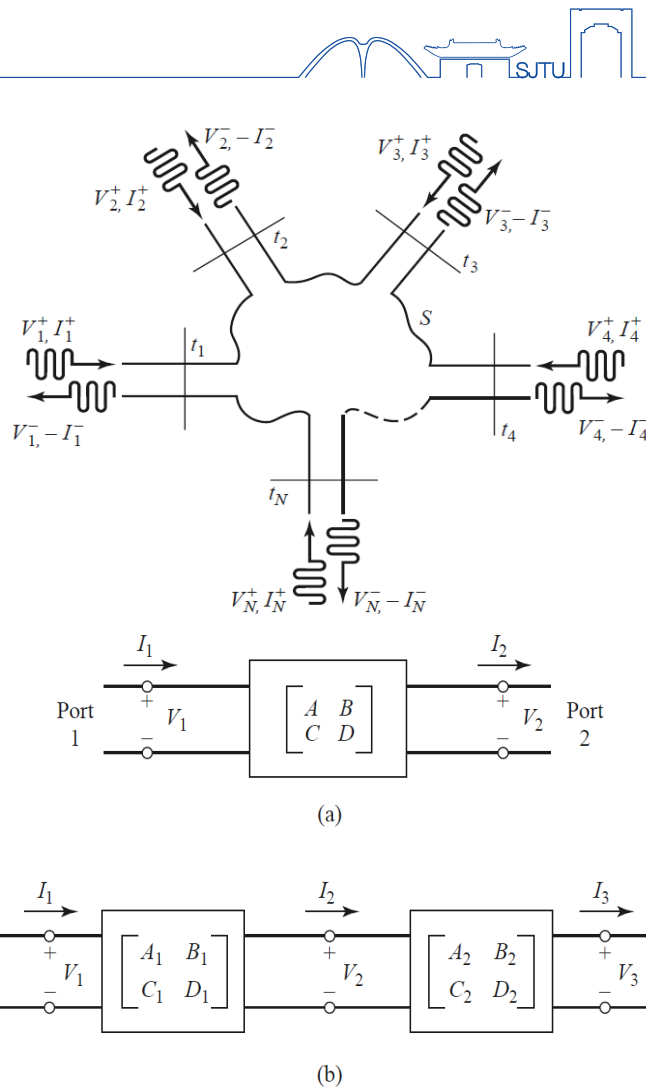
$$S_{ij} := \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0 \text{ for } k \neq j}$$

■ 传输 (ABCD) 矩阵

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

■ 相互转换

- 给定端口特征阻抗 Z_0



1

背景

2

问题的提出

3

二端口网络RLCG参数的提取

4

耦合微带线闭式设计方程研究

5

总结与感想



问题的提出



- 考察一个二端口网络，从系统分析的角度：
 - 等效传输线RLCG模型——系统（状态）参量
 - S矩阵、ABCD矩阵——输入-输出关系（端口特性）
- 给定等效RLCG参数，易分析端口特性。
- 已测得端口特性（如S参数），则如何得到等效RLCG模型？
- 推广至多端口网络，RLCG参量的形式（从数到矩阵）？
- 给定特性的网络，如何用某种物理结构（如微带线）实现？
- **多端口网络的分析与综合问题**

1

背景

2

问题的提出

3

二端口网络RLCG参数的提取

4

耦合微带线闭式设计方程研究

5

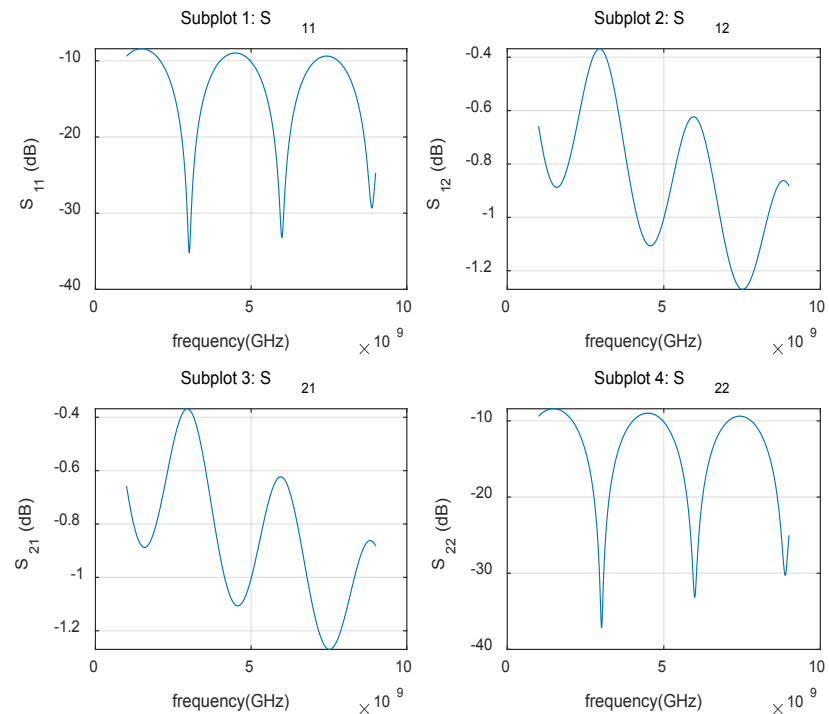
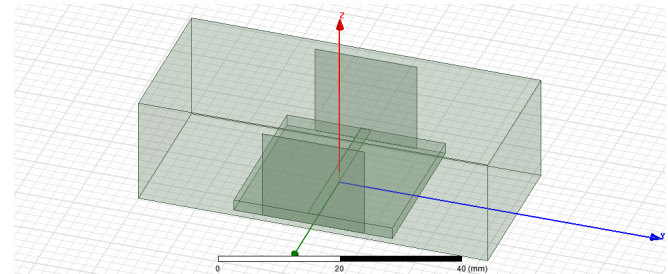
总结与感想



从二端口网络开始：S参量 \Rightarrow RLCG模型

- 微带线参数 (75 Ω , -90° @4.5GHz)
 - 介电常数4.4, 损耗角正切0.02
 - 线长27.83mm, 线宽1.78mm
 - 铜厚0.035mm, 基材厚度2mm

- HFSS仿真设置
 - 接底板: 理想导体
 - 空气腔: 辐射边界
 - 激励: 波端口 (特征阻抗50 Ω)
 - 求解类型: Network Analysis
 - 求解设置: $\Delta|S| \leq 0.0002$
 - 扫频设置: 1~9GHz, 插值
 - 仿真结果导出为.m文件



S参数⇒RLCG模型： 闭式方程



- 一段传输线的ABCD参量[4][6]:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_C \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

- 由ABCD参量求 γ, Z_C :

$$Z_C = \sqrt{B/C}$$

$$\gamma l = \arg(\operatorname{atanh}(\sqrt{BC/AD}))$$

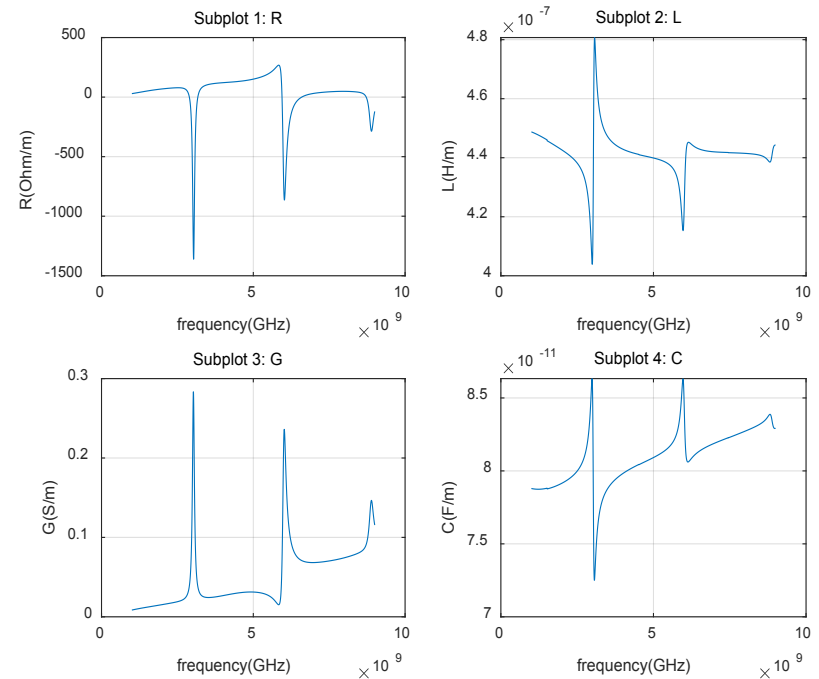
- 由 γ, Z_C 求RLCG:

$$R = \operatorname{Re}(\gamma Z_C), \quad L = \frac{\operatorname{Im}(\gamma Z_C)}{2\pi f}$$

$$G = \operatorname{Re}(\gamma/Z_C), \quad C = \frac{\operatorname{Im}(\gamma/Z_C)}{2\pi f}$$

- S参量转换到ABCD参量[2]

MATLAB计算结果:



存在“奇异”区间，原因：阻抗匹配点附近 S_{11} 较小，机器计算误差，仿真（测量）精度等。

S参数⇒RLCG模型：回归分析

- 闭式公式求解结果存在奇异区间，可通过回归模型予以修正。
- RLCG参量的频率依赖模型^{[3][5]}:
 - $R(f) = R_0 + R_s\sqrt{f}$
 - $G(f) = G_0 + G_d f$
 - $L(f) = L_0$
 - $C(f) = C_0$
- 离群值 (outliers) 判别准则:
 - 奇异区间上 $\text{Im}(Z_C)$ 异常增大
 - $\text{Im}(Z_C) > \text{tol}$
 - tol取经验值: 0.116

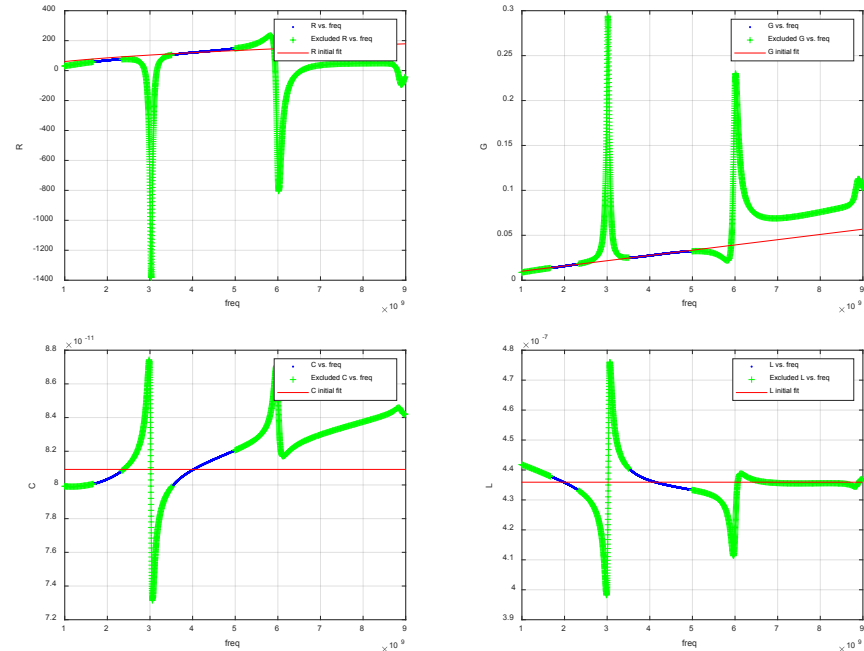


Fig. Fitted RLCG (initial fit)

拟合结果:

$$R_0 = 4.352\text{e-}14, R_s = 1.874\text{e-}03$$

$$G_0 = 3.991\text{e-}03, G_d = 5.848\text{e-}12$$

$$L_0 = 4.359\text{e-}07, C_0 = 8.092\text{e-}11.$$

S参数⇒RLCG模型：有效性验证



- 通过上述先求解闭式方程，再回归分析的方法，已获得了试验二端口网络的一个等效RLCG模型。
- 用此模型重建网络的S参数，若与仿真（实测）S参数一致性高，则验证了本模型的有效性。
- 由RLCG参数计算 S_{11} ：

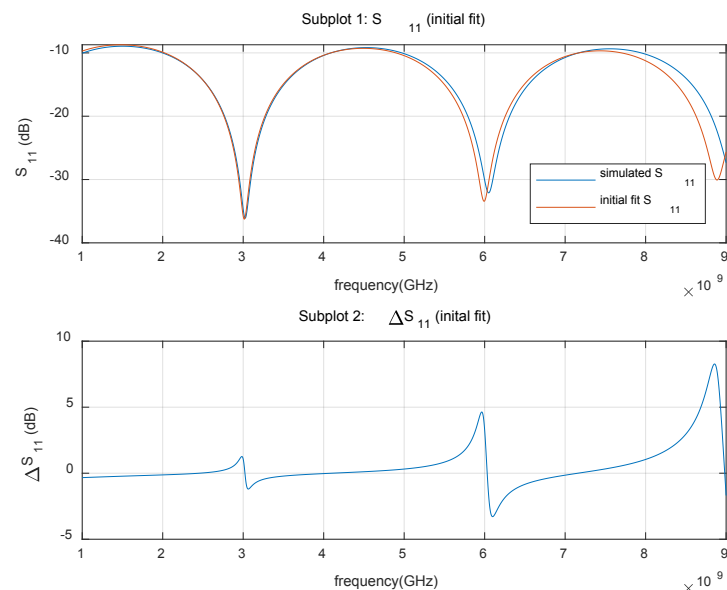
$$S_{11}(f) = \Gamma^{(1)} \Big|_{V_2^+=0} = \frac{Z_{in}(f) - Z_0}{Z_{in}(f) + Z_0}$$

$$Z_{in}(f) = Z_C \frac{Z_0 + Z_C \tanh(\gamma l)}{Z_C + Z_0 \tanh(\gamma l)}$$

$$\gamma(f) = \sqrt{(R(f) + j\omega L)(G(f) + j\omega C)}$$

$$Z_C(f) = \sqrt{(R(f) + j\omega L)/(G(f) + j\omega C)}$$

- MATLAB计算结果：



结论：较低频段一致性相当好，而重建偏差随频率升高而增大，与文献[1]记载一致。

从二端口网络开始：小结与展望



- 小结：
 - ①推导了从S参数提取RLCG参量的闭式方程。
 - ②闭式方程求解结果存在奇异区间，可能的原因是在阻抗匹配频率附近， S_{11} 参数很小，此时S参数的仿真（测量）误差和机器数值计算引入的误差不可忽略。
 - ③可通过引入RLCG参量的频率依赖模型，进行回归分析来解决奇异区间问题。经验证，该模型的有效性在频率不很高时相当好。
- 展望：
 - ①改进RLCG频率依赖模型。例如，在高频段引入文献[1]给出的传输线RLCG模型高频修正项。
 - ②研究奇异区间的产生机制，降低奇异区间的影响。
 - ③改进回归算法，研究复数域上回归分析的理论 and 算法。
 - ④将本例理论和算法推广至多端口网络。

1

背景

2

问题的提出

3

二端口网络RLCG参数的提取

4

耦合微带线闭式设计方程研究

5

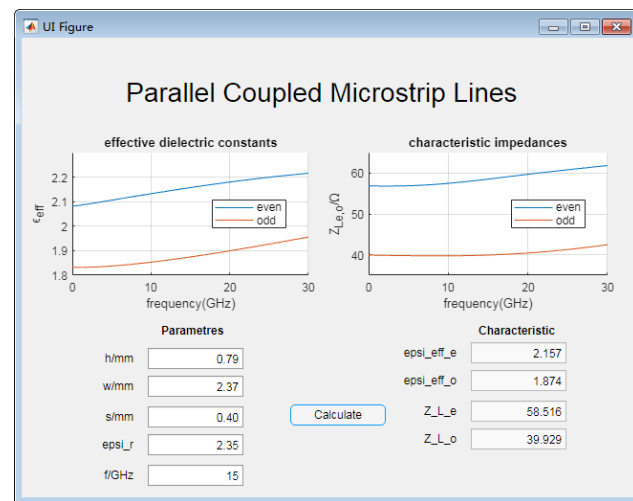
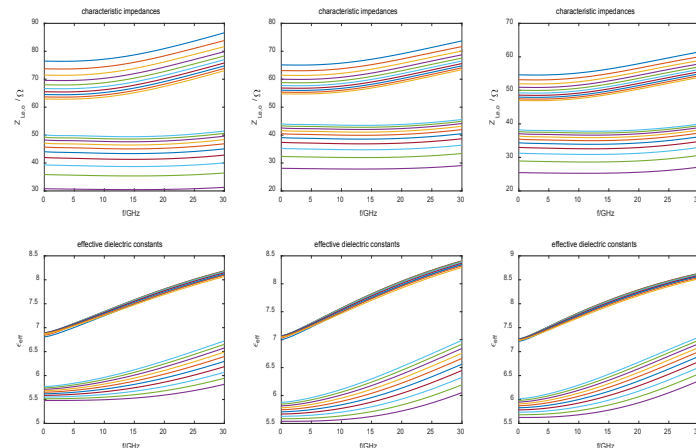
总结与感想



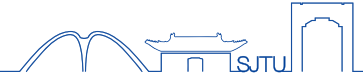
耦合微带线闭式设计方程的研究



- 前文探讨了多端口网络端口特性（如S参数）与系统参量（等效传输线RLCG模型）的相互导出。
- 若研究出给定端口特性的微波网络用传输线（如微带线）实现路径，就完成了微波网络的综合。
- 期望能构造微带线的物理参数（线长，线间距，导体厚度，基材厚度，介电常数，损耗角正切）与其电特性（特征阻抗，复传播常数）的闭式方程。
- 实现了文献[11]的耦合微带线闭式设计公式，制作了MATLAB GUI。

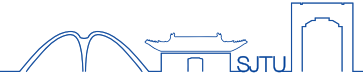


参考文献



- [1] HSPICE® User Guide: Signal Integrity Modeling and Analysis Version L-2016.06, June 2016.
- [2] Microwave Engineering(Fourth Edition). David M. Pozar. Wiley.
- [3] HFSS Help(Release 2019 R1). ANSYS, Inc.
- [4] [Transmission Line\[EB/OL\]](#).
- [5] [Analyzing Transmission Line \(RLCG\) Parameters\[EB/OL\]](#).
- [6] ABCD matrix: a unique tool for linear two-wire transmission line modelling. Pedro L. D. Peres, Carlos R. de Souza and Ivanil S. Bonatti.
- [7] Guang Chen, Lin Zhu and K. L. Melde, "Extraction of frequency dependent RLCG parameters of the packaging interconnects on low-loss substrates from frequency domain measurements," *IEEE 14th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging, 2005.*, Austin, TX, USA, 2005, pp. 25-28.
- [8] W. R. Eisenstadt and Y. Eo, "S-parameter-based IC interconnect transmission line characterization," in *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol. 15, no. 4, pp. 483-490, Aug. 1992.

参考文献



- [9] R. B. Marks and D. F. Williams, "Characteristic impedance determination using propagation constant measurement," in *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 1, no. 6, pp. 141-143, June 1991.
- [10] S. Amakawa *et al.*, "Causal Characteristic Impedance Determination Using Calibration Comparison and Propagation Constant," *2019 92nd ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG)*, Orlando, FL, USA, 2019, pp. 1-6.
- [11] M. Kirschning and R. H. Jansen, "Accurate Wide-Range Design Equations for the Frequency-Dependent Characteristic of Parallel Coupled Microstrip Lines," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 32, no. 1, pp. 83-90, Jan. 1984.
- [12] E. Hammerstad and O. Jensen, "Accurate Models for Microstrip Computer-Aided Design," *1980 IEEE MTT-S International Microwave symposium Digest*, Washington, DC, USA, 1980, pp. 407-409.
- [13] M. Kirschning and R. H. Jansen, "Accurate model for effective dielectric constant of microstrip with validity up to millimetre-wave frequencies," in *Electronics Letters*, vol. 18, no. 6, pp. 272-273, 18 March 1982.
- [14] Costa, L., & Valtonen, M. (1997). Implementation of Single and Coupled Microstrip Lines in APLAC.

1

背景

2

问题的提出

3

二端口网络RLCG参数的提取

4

耦合微带线闭式设计方程研究

5

总结与感想



总结与感想



- 研究多端口网络的分析与综合问题，就是要探究以下三类模型的相互导出关系：
 - 物理参数(L, W, H, T, ϵ_r) \Leftrightarrow 电特性(γ, Z_C) \Leftrightarrow 分布参数($RLCG$)
- 所以，分别面向上述关系的两个箭头，我在储英导师的指导下开展了以下研究：
 - ①耦合微带线闭式设计方程的研究；
 - ②从S参量提取二端口网络的等效传输线RLCG模型的理论和算法研究。
- 在开展上述研究的过程中，我的主要收获有：
 - ①加深了对传输线理论，微波网络分析和耦合线理论的理解。
 - ②掌握了HFSS, ADS, Hspice, Matlab等电磁仿真和科学计算工具的基本用法。
 - ③体验了科研的基本流程，培养了对本专业的兴趣和认同。
 - ④细节的处理：从主值相位到连续相位。
- 感谢储英导师夏彬老师给予的悉心指导，感谢电子工程系给予我补录进入储英计划的机会，感谢所有热心帮助我的优秀的同学们。

谢谢!



上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

上海交通大学