



本科毕业论文答辩

2020年6月19日



上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY





基于 S 参数的多导体传输线 $RLCG$ 提取算法

答辩人：危国锐

导师：夏彬



上海交通大學

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



1

绪论

2

多导体传输线频域分析

3

基于 S 参数的传输线参数提取

4

实例分析与讨论

5

总结与展望



1

绪论

2

多导体传输线频域分析

3

基于 S 参数的传输线参数提取

4

实例分析与讨论

5

总结与展望





研究背景

- **传输线 $RLGC$ 模型 (W-element) 的优势 [1]**
 - 线长可变：因为 $RLGC$ 是对准 TEM 传输线横截面结构的建模
 - 时域仿真效率较高
 - 便于做阻抗，损耗，串扰等信号完整性分析
- **传输线 $RLGC$ 模型的提取方法**
 - 电磁场数值求解器，如 HFSS
 - 基于测试，如从 VNA 测量得到的 S 参数中提取
- **基于测试的建模方法的优势 [2]**
 - 仿真结构同成品结构间的差异
 - 场求解器精度限制





研究目标与研究路线

▪ 研究目标

- 建立由 S 参数提取传输线 $RLGC$ 参数的方法

▪ 1. 理论准备

- 理解基本概念：多导体传输线 (MTL) 方程，传输线参数，微波网络分析
- 梳理正向过程：由传输线参数 $RLGC$ 求解 S 参数的所有细节

▪ 2. 公式推导

- 建立逆向过程 (由 S 提取 $RLGC$) 的算式和细节

▪ 3. 仿真验证

- 数据来源：HFSS, ADS, Cadence Sigrrity, Polar Si9000 等电磁仿真工具
- 算法实现：MATLAB R2020a

▪ 4. 总结与展望



1

绪论

2

多导体传输线频域分析

3

基于 S 参数的传输线参数提取

4

实例分析与讨论

5

总结与展望





频域 MTL 方程的解

- 频域 MTL 方程

$$\frac{d}{dz} \mathbf{V}(z) = -\tilde{\mathbf{Z}} \mathbf{I}(z),$$

$$\frac{d}{dz} \mathbf{I}(z) = -\tilde{\mathbf{Y}} \mathbf{V}(z)$$

其中

$$\tilde{\mathbf{Z}} = \tilde{\mathbf{R}} + j\omega \tilde{\mathbf{L}},$$

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \tilde{\mathbf{G}} + j\omega \tilde{\mathbf{C}}$$

- $\tilde{\mathbf{R}}, \tilde{\mathbf{L}}, \tilde{\mathbf{G}}, \tilde{\mathbf{C}}$ 是传输线的单位长度电阻、电感、电容、电导 (*RLGC*)
- RLGC* 参数是 MTL 方程的系数

- 对位置变量 z 求导, 得

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{V}(z) = \tilde{\mathbf{Z}} \tilde{\mathbf{Y}} \mathbf{V}(z),$$

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{I}(z) = \tilde{\mathbf{Y}} \tilde{\mathbf{Z}} \mathbf{I}(z)$$

- 对 $\tilde{\mathbf{Z}} \tilde{\mathbf{Y}}$ (和 $\tilde{\mathbf{Y}} \tilde{\mathbf{Z}}$) 相似对角化

$$\mathbf{T}_V^{-1} \tilde{\mathbf{Z}} \tilde{\mathbf{Y}} \mathbf{T}_V = \boldsymbol{\gamma}^2$$

$$\mathbf{T}_I^{-1} \tilde{\mathbf{Y}} \tilde{\mathbf{Z}} \mathbf{T}_I = \boldsymbol{\gamma}^2$$

- 可取 (因为 $\tilde{\mathbf{Z}} \tilde{\mathbf{Y}}$ 与 $\tilde{\mathbf{Y}} \tilde{\mathbf{Z}}$ 互为转置)

$$\mathbf{T}_V^T = \mathbf{T}_I^{-1}$$

$$\mathbf{T}_I^T = \mathbf{T}_V^{-1}$$

$\boldsymbol{\gamma}$ 的意义: N 个模式的复传播常数





频域 MTL 方程的解

- 定义 N 个准 TEM 传播模式的电压和电流

$$\mathbf{V}(z) = \mathbf{T}_V \mathbf{V}_m(z),$$

$$\mathbf{I}(z) = \mathbf{T}_I \mathbf{I}_m(z)$$

代入 MTL 方程可得

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{V}_m(z) = \boldsymbol{\gamma}^2 \mathbf{V}_m(z),$$

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{I}_m(z) = \boldsymbol{\gamma}^2 \mathbf{I}_m(z)$$

其中 $\boldsymbol{\gamma}^2$ 是对角阵，故上式可视为 $2N$ 个独立的常微分方程，可求出通解

- 最终求得 MTL 方程的通解

$$\mathbf{V}(z) = \mathbf{T}_V (e^{-\boldsymbol{\gamma}z} \mathbf{V}_m^+ + e^{\boldsymbol{\gamma}z} \mathbf{V}_m^-),$$

$$\mathbf{I}(z) = \mathbf{Y}_C \mathbf{T}_V (e^{-\boldsymbol{\gamma}z} \mathbf{V}_m^+ - e^{\boldsymbol{\gamma}z} \mathbf{V}_m^-)$$

将求解过程中的两个中间量定义为复传播常数 $\boldsymbol{\Gamma}$ 和特征阻抗 $\mathbf{Z}_C = \mathbf{Y}_C^{-1}$

$$\boldsymbol{\Gamma} = \sqrt{\tilde{\mathbf{Z}}\tilde{\mathbf{Y}}} := \mathbf{E}\boldsymbol{\gamma}\mathbf{E}^{-1}$$

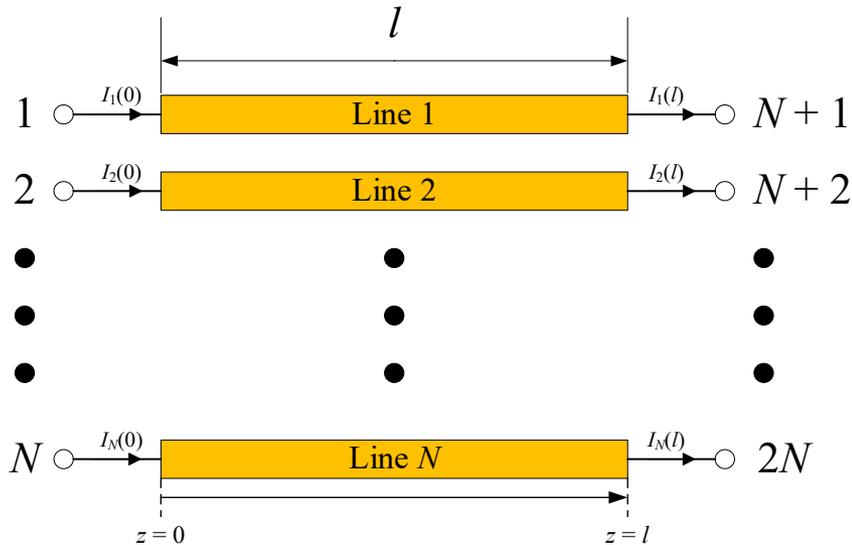
$$\mathbf{Z}_C(\omega) = \boldsymbol{\Gamma}^{-1}(\omega)\tilde{\mathbf{Z}}(\omega)$$

- $\boldsymbol{\Gamma}, \mathbf{Z}_C$ 以及通解可以写成其他等价的形式
- 通解中的 $2N$ 个待定系数 \mathbf{V}_m^\pm 可结合终端条件确定



$N + 1$ 导体传输线的 $2N$ 端口表征

- 端口编号约定



- 链 ($ABCD$) 参数定义

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}(0) \\ \mathbf{I}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(l) \\ \mathbf{I}(l) \end{bmatrix}$$

- 由 MTL 方程的通解可推出

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\Gamma l) & \sinh(\Gamma l) \mathbf{Z}_C \\ \mathbf{Z}_C^{-1} \sinh(\Gamma l) & \mathbf{Z}_C^{-1} \cosh(\Gamma l) \mathbf{Z}_C \end{bmatrix}$$

式中

$$\Gamma = \sqrt{\tilde{\mathbf{Z}}\tilde{\mathbf{Y}}} := \mathbf{E}\boldsymbol{\gamma}\mathbf{E}^{-1}$$

$$\mathbf{Z}_C = \Gamma^{-1}\tilde{\mathbf{Z}}$$

$$\cosh(\Gamma l) = \mathbf{E} \cosh(\boldsymbol{\gamma} l) \mathbf{E}^{-1},$$

$$\sinh(\Gamma l) = \mathbf{E} \sinh(\boldsymbol{\gamma} l) \mathbf{E}^{-1}$$

- 由上式可由传输线参数 ($RLGC, \Gamma, \mathbf{Z}_C$) 计算链参数, 其他网络参数 (S, Y, Z, T) 可由链参数转换得到。



1

绪论

2

多导体传输线频域分析

3

基于 S 参数的传输线参数提取

4

实例分析与讨论

5

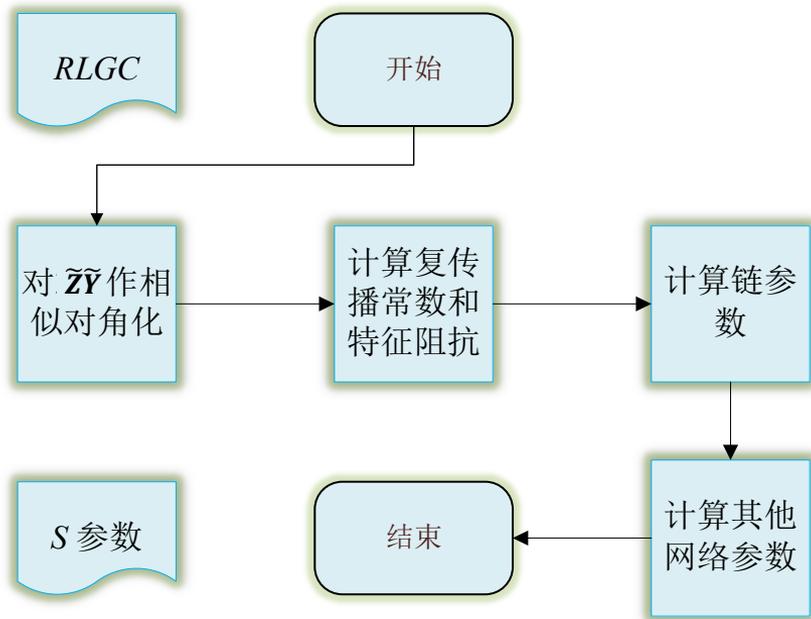
总结与展望





逆过程：由 S 参数提取传输线 $RLGC$

- 已导出正过程 ($RLGC \rightarrow S$):



由传输线 $RLGC$ 参数求解 S 参数的流程

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\Gamma l) & \sinh(\Gamma l) Z_C \\ Z_C^{-1} \sinh(\Gamma l) & Z_C^{-1} \cosh(\Gamma l) Z_C \end{bmatrix}$$

- 逆过程 ($S \rightarrow RLGC$):

1. 把 S 参数转换为链参数
2. 对 A 作对角化 (特征值分解)

$$A = E_A \Lambda_A E_A^{-1}$$

由正过程

$$A = \cosh(\Gamma l) = E \cosh(\gamma l) E^{-1}$$

可知 (定义不唯一)

$$E_A = E, \Lambda_A = \cosh(\gamma l)$$

3. 进而求出复传播常数 Γ , 特征阻抗 Z_C 和 $RLGC$:

$$\Gamma = E\gamma E^{-1}, Z_C = (\sinh \Gamma l)^{-1} B$$

$$\tilde{R} = \Re(\Gamma Z_C), \tilde{L} = \Im(\Gamma Z_C) / \omega,$$

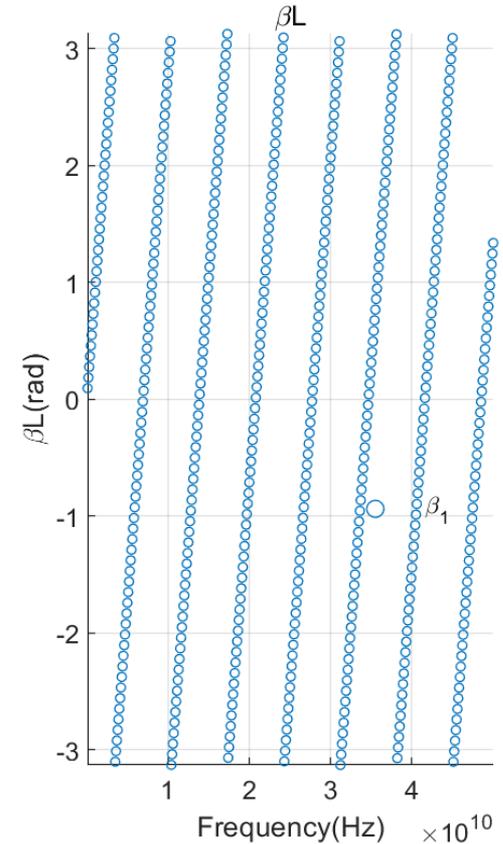
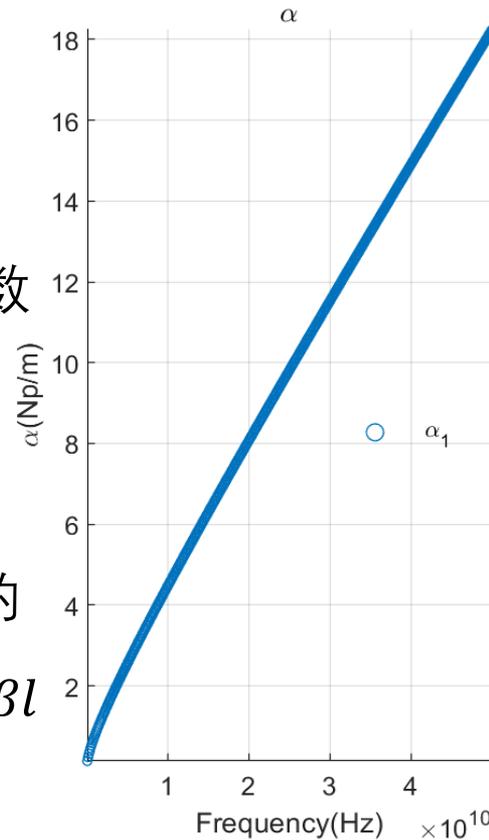
$$\tilde{G} = \Re(Z_C^{-1} \Gamma), \tilde{C} = \Im(Z_C^{-1} \Gamma) / \omega$$





相位折叠现象

- 按 $\Lambda_A = \cosh(\gamma l)$ 求出的事实上是主值 (因为 \cosh 函数具有周期 $2\pi i$)
- $$PV(\gamma(\omega)) = \frac{1}{l} \cosh^{-1} \Lambda_A(\omega)$$
- 相位常数 β 应是连续单增的
 - 每出现一个跳变点, 就在 βl 上加 2π
 - 在每个频率点 ω 处, 统计 βl 前面的不连续点个数 $n(\omega)$, 然后在原来的主值上加上 $2\pi n(\omega)$



相位折叠实例：双导体传输线

横坐标：频率 (Hz)；

左纵坐标：衰减常数 α (Np/m)

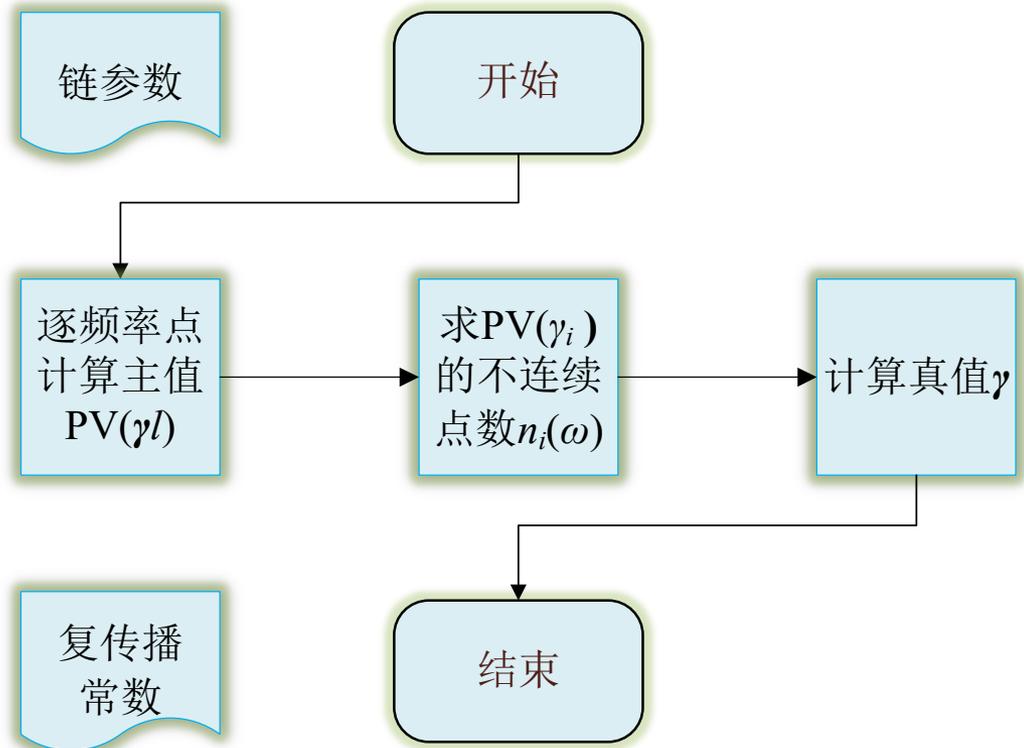
右纵坐标：相位常数 βl (rad)





基于不连续点计数的相位解折叠算法

- 按 $\Lambda_A = \cosh(\gamma l)$ 求出的事实上是主值 (因为 \cosh 函数具有周期 $2\pi i$)
$$PV(\gamma(\omega)) = \frac{1}{l} \cosh^{-1} \Lambda_A(\omega)$$
- 相位常数 β 应是连续单增的
- 每出现一个跳变点, 就在 βl 上加 2π
- 在每个频率点 ω 处, 统计 βl 前面的不连续点个数 $n(\omega)$, 然后在原来的主值上加上 $2\pi n(\omega)$



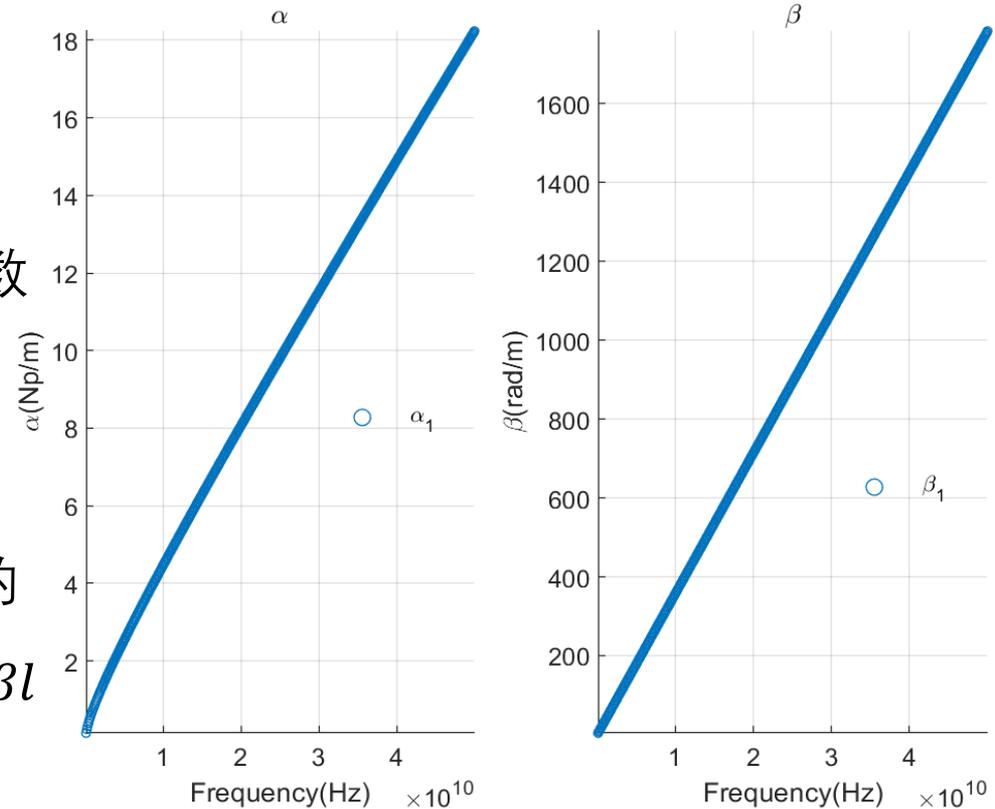
基于不连续点计数的相位解折叠算法





相位解折叠

- 按 $\Lambda_A = \cosh(\gamma l)$ 求出的事实上是主值 (因为 \cosh 函数具有周期 $2\pi i$)
$$PV(\gamma(\omega)) = \frac{1}{l} \cosh^{-1} \Lambda_A(\omega)$$
- 相位常数 β 应是连续单增的
- 每出现一个跳变点, 就在 βl 上加 2π
- 在每个频率点 ω 处, 统计 βl 前面的不连续点个数 $n(\omega)$, 然后在原来的主值上加上 $2\pi n(\omega)$



相位解折叠效果：双导体传输线
横坐标：频率 (Hz) ;
左纵坐标：衰减常数 α (Np/m)
右纵坐标：相位常数 βl (rad)





若是多导体?

- 对 A 的对角化

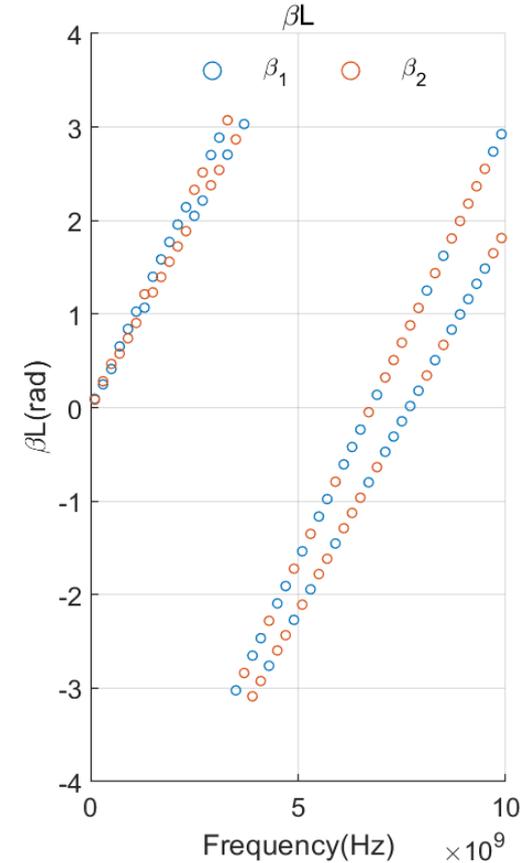
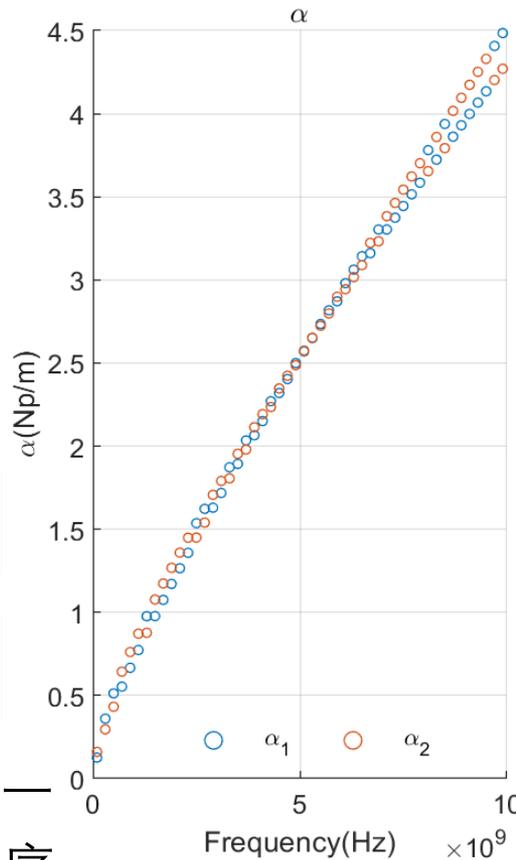
$$A = E_A \Lambda_A E_A^{-1}$$

问题：分解顺序不定

$$\Lambda_A = \begin{bmatrix} \cosh \gamma_1 l & 0 \\ 0 & \cosh \gamma_2 l \end{bmatrix}$$

$$\Lambda'_A = \begin{bmatrix} \cosh \gamma_2 l & 0 \\ 0 & \cosh \gamma_1 l \end{bmatrix}$$

- 不连续点计数总是针对同一个位置，然而特征值的排序可能任意改变，见右图



相位折叠示例：三导体传输线

横坐标：频率 (Hz)；

左纵坐标：衰减常数 α (Np/m)

右纵坐标：相位常数 βl (rad)

蓝：位置1；红：位置2





模式追踪问题

- 对 A 的对角化

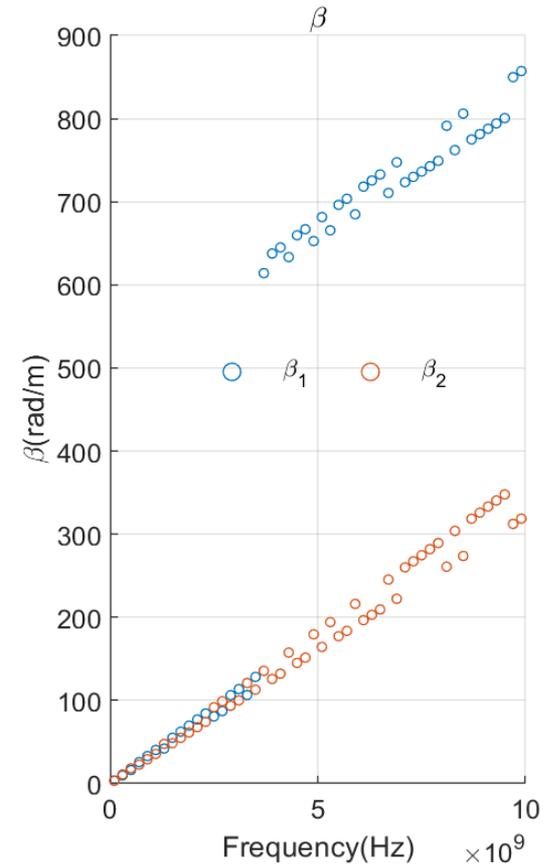
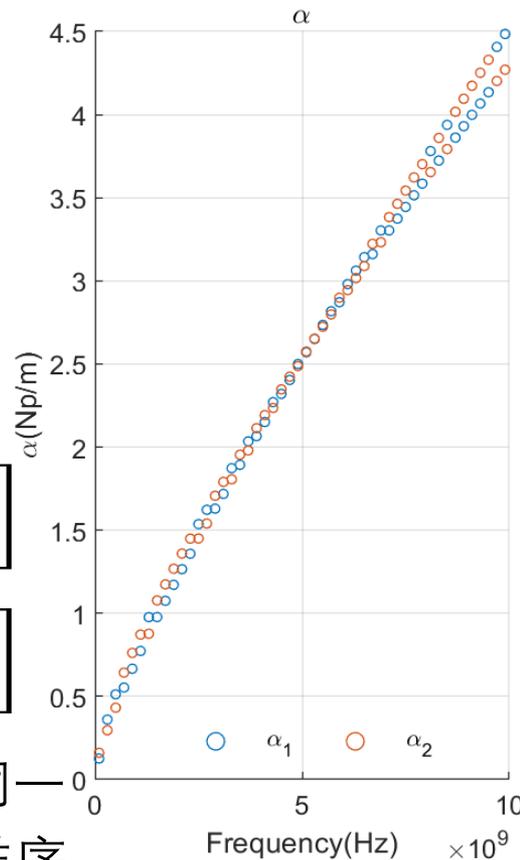
$$A = E_A \Lambda_A E_A^{-1}$$

问题：分解顺序不定

$$\Lambda_A = \begin{bmatrix} \cosh \gamma_1 l & 0 \\ 0 & \cosh \gamma_2 l \end{bmatrix}$$

$$\Lambda'_A = \begin{bmatrix} \cosh \gamma_2 l & 0 \\ 0 & \cosh \gamma_1 l \end{bmatrix}$$

- 不连续点计数总是针对同一个位置，然而特征值的排序可能任意改变
- 可能多判/早判跳变点导致解折叠失败，见右图



相位解折叠失败：三导体传输线

横坐标：频率 (Hz)；

左纵坐标：衰减常数 α (Np/m)

右纵坐标：相位常数 βl (rad)

蓝：模式1；红：模式2





如何实现模式追踪？

- 对 A 的对角化

$$A = E_A \Lambda_A E_A^{-1}$$

- 考察特征向量矩阵 $E_A = E$

$$E(\omega) = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$$

- 若特征向量已归一化，则由 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$ 线性无关，知

$$|\xi_i \cdot \xi_j| = \begin{cases} 1, & i = j, \\ \mu_{ij}, & i \neq j \end{cases}$$

- $E^H(\omega_k)E(\omega_k)$ 的主对角线元素的模都为1，而非主对角元素的模都（远）小于1

- 若 $E(\omega_k), E(\omega_{k+1})$ 顺序正确，则若频率点间隔不大， $E(\omega_{k+1})$ 与 $E(\omega_k)$ 应比较接近，从而矩阵

$$E^H(\omega_{k+1})E(\omega_k)$$

也具有类似 $E^H(\omega_k)E(\omega_k)$ 的性质

- $E^H(\omega_{k+1})E(\omega_k)$ 的主对角元素的模之和最大（接近1）
- 举例：若用 $\xi_1(\omega_{k+1})$ 同每个 $\xi_i(\omega_k)$ 做内积，发现

$$\xi_1^H(\omega_{k+1})\xi_N(\omega_k)$$

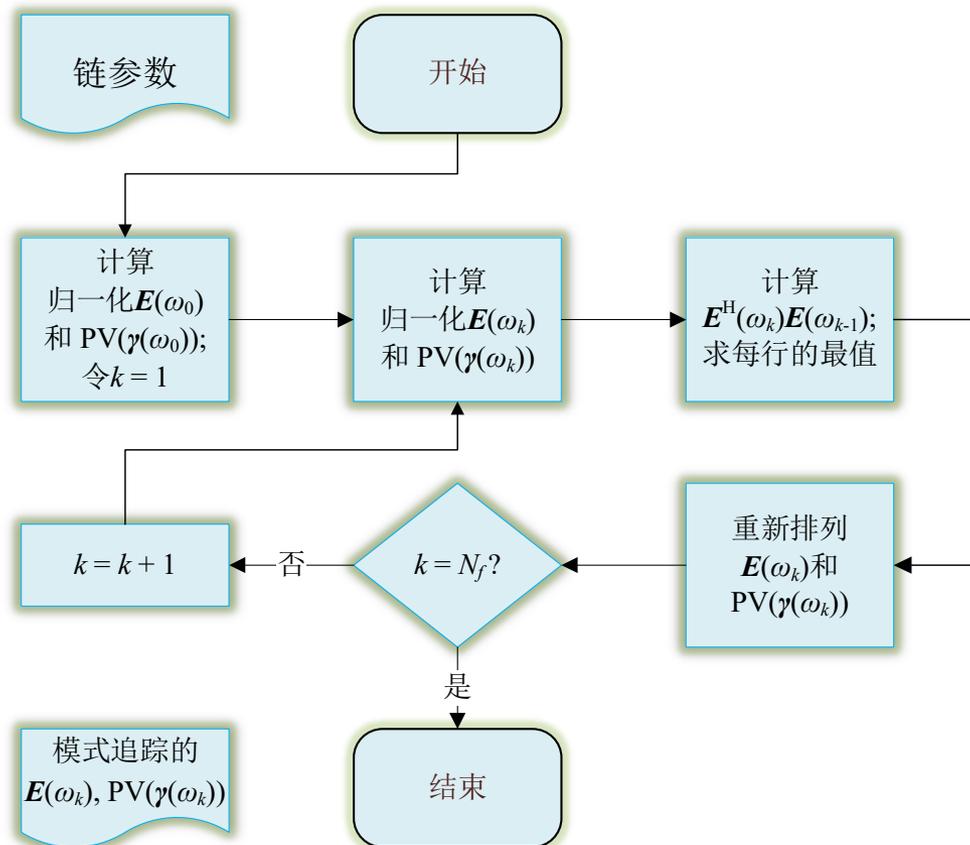
的模为最大，则 $\xi_1(\omega_{k+1})$ 应换到 $E(\omega_k)$ 的第 N 列





基于Hermitian内积的模式追踪算法

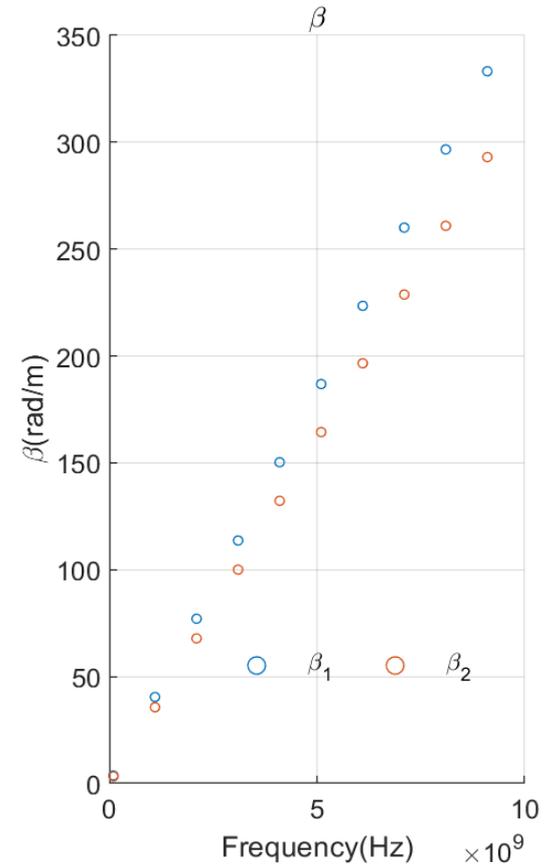
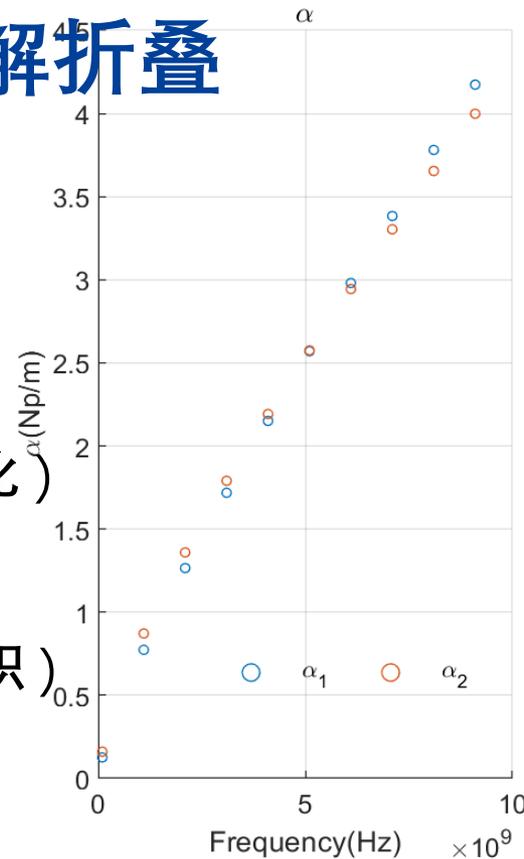
- Step-1 (算法初始化)
 - 求 $\mathbf{E}(\omega_0)$ 和 $PV(\boldsymbol{\gamma}(\omega_0))$,
 - 令 $k = 1$
- Step-2 (当前频率点初始化)
 - 求 $\mathbf{E}(\omega_k)$ 和 $PV(\boldsymbol{\gamma}(\omega_k))$
- Step-3 (计算Hermitian内积)
 - 求 $\mathbf{E}^H(\omega_k)\mathbf{E}(\omega_{k-1})$
- Step-4 (当前频率点重排)
 - 对 $\mathbf{E}(\omega_k)$ 和 $PV(\boldsymbol{\gamma}(\omega_k))$ 重排
- Step-5 (判终止条件)
 - 否则 $k = k + 1$, 转Step-2





模式追踪 + 相位解折叠

- Step-1 (算法初始化)
 - 求 $E(\omega_0)$ 和 $PV(\gamma(\omega_0))$,
 - 令 $k = 1$
- Step-2 (当前频率点初始化)
 - 求 $E(\omega_k)$ 和 $PV(\gamma(\omega_k))$
- Step-3 (计算Hermitian内积)
 - 求 $E^H(\omega_k)E(\omega_{k-1})$
- Step-4 (当前频率点重排)
 - 对 $E(\omega_k)$ 和 $PV(\gamma(\omega_k))$ 重排
- Step-5 (判终止条件)
 - 否则 $k = k + 1$, 转Step-2



相位解折叠成功：三导体传输线

横坐标：频率 (Hz) ;

左纵坐标：衰减常数 α (Np/m)

右纵坐标：相位常数 βl (rad)

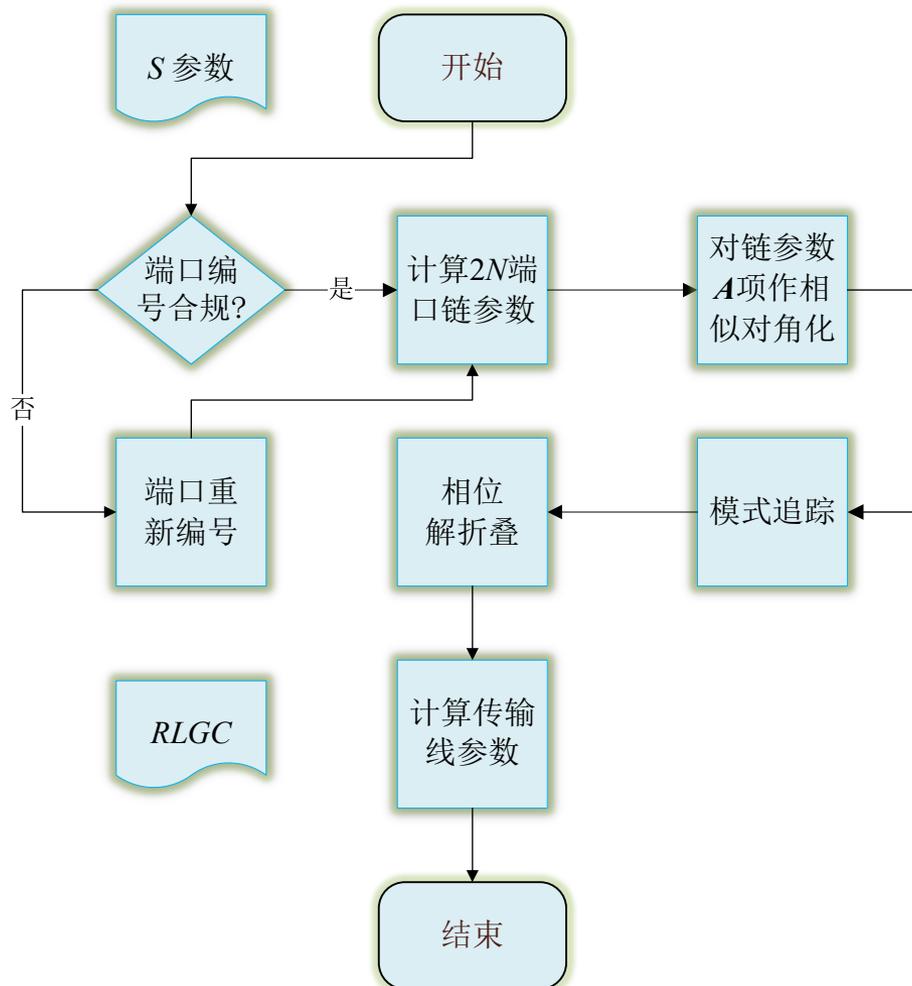
蓝：模式 1；红：模式 2





基于 S 参数的传输线参数提取算法

- Step-1 (端口编号合规化)
 - 见“端口编号约定”
- Step-2 (求链参数)
- Step-3 (初始化)
 - 求初始 E 和 $PV(\gamma)$
- Step-4 (模式追踪)
 - 重排 E 和 $PV(\gamma)$
- Step-5 (相位解折叠)
 - 由模式追踪后的 $PV(\gamma)$ 求 γ
- Step-6 (求传输线参数)
 - 包括 $\Gamma, Z_C, RLGC$



基于 S 参数的传输线参数提取算法流程图



1

绪论

2

多导体传输线频域分析

3

基于 S 参数的传输线参数提取

4

实例分析与讨论

5

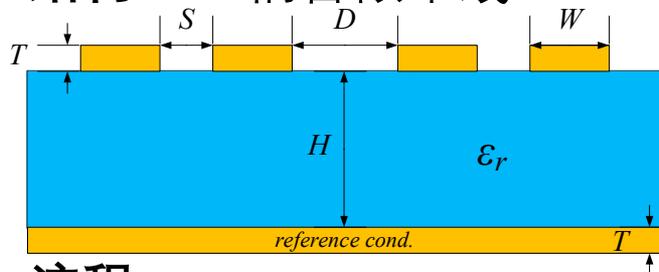
总结与展望



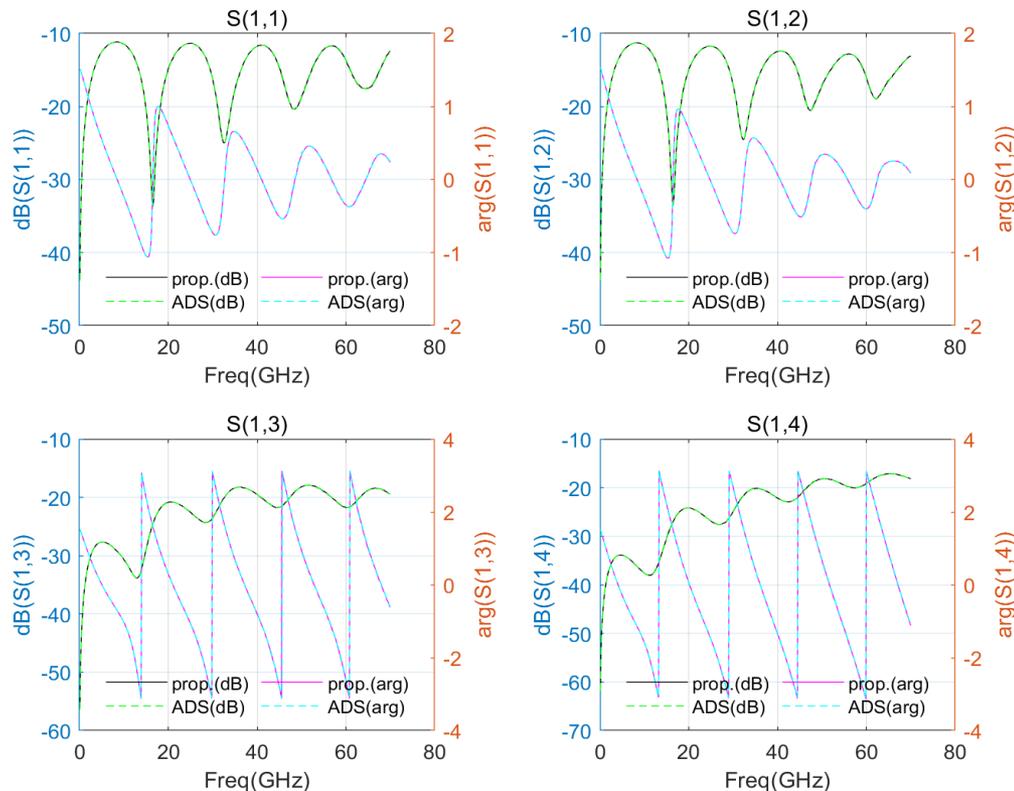
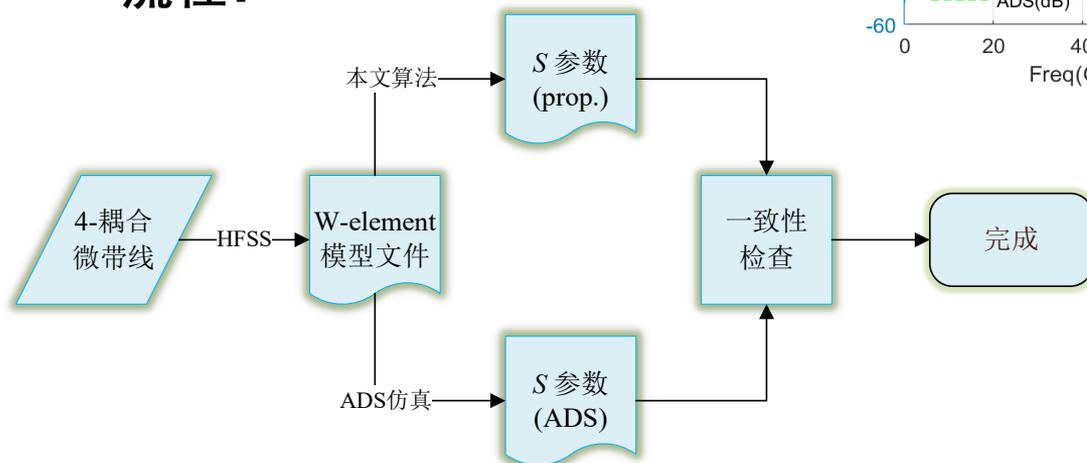


仿真实例一

- 目的：验证由 $RLGC$ 参数求解 S 参数的算法
- 结构：4-耦合微带线



流程：



S 参数对比：4-耦合微带线

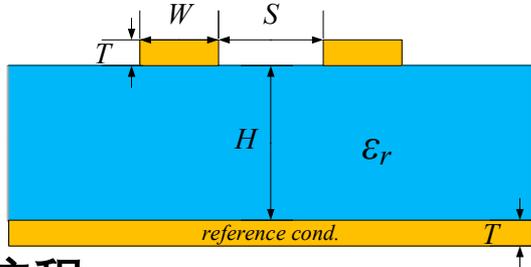
横坐标：频率 (GHz)；
 左纵坐标：幅度 (dB)；
 右纵坐标：相位 (rad)；
 实线：本文算法；
 虚线：ADS 仿真



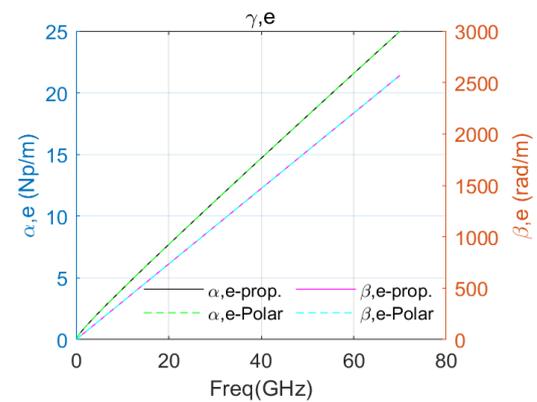
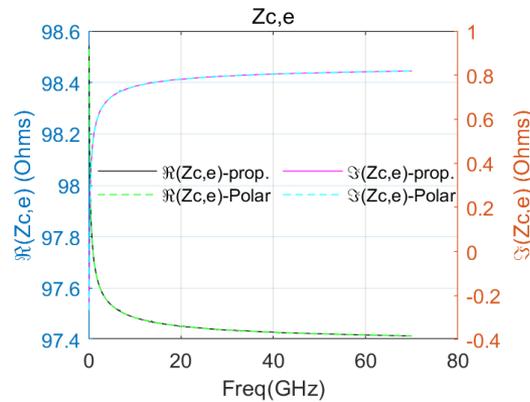
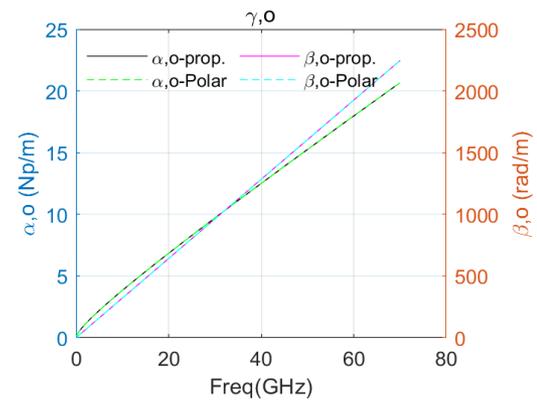
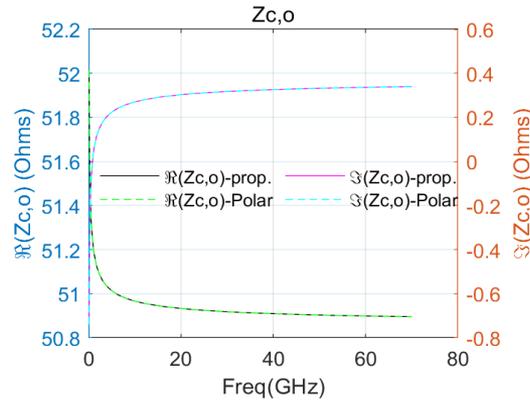
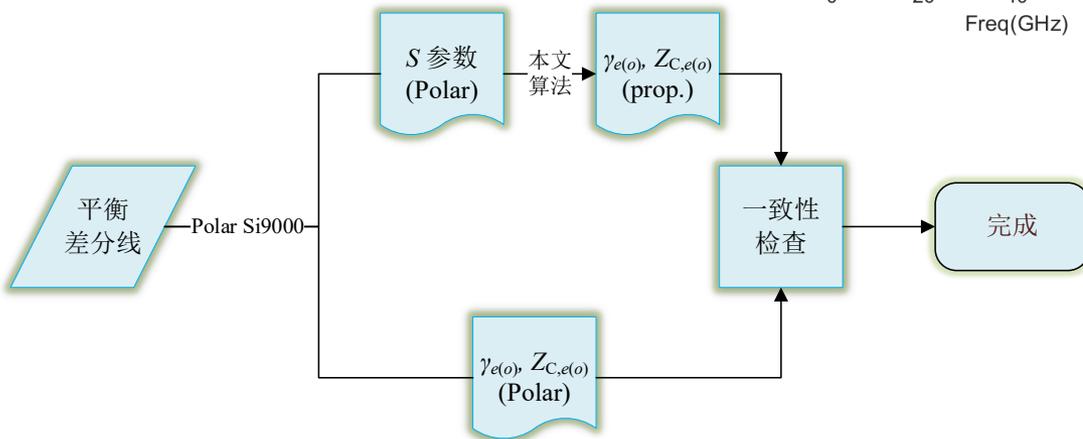


仿真实例二

- 目的：验证基于 S 参数的传输线参数提取算法
- 结构：平衡差分微带线



- 流程：



奇偶模传播常数/特征阻抗

横坐标：频率 (GHz)；

左纵坐标： $\gamma_{e(o)}$ 或 $Z_{C,e(o)}$ 的实部；

右纵坐标： $\gamma_{e(o)}$ 或 $Z_{C,e(o)}$ 的虚部；

实线：本文算法；

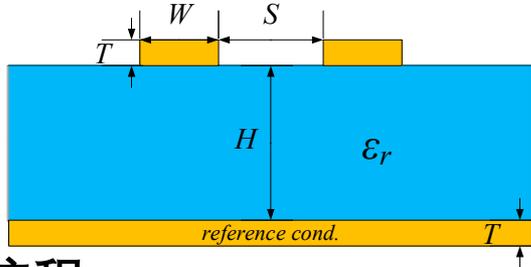
虚线：Polar Si9000；



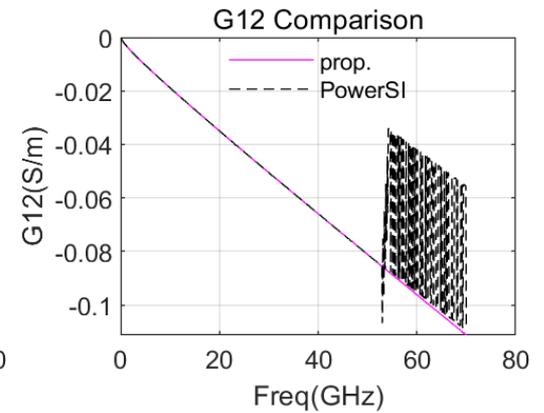
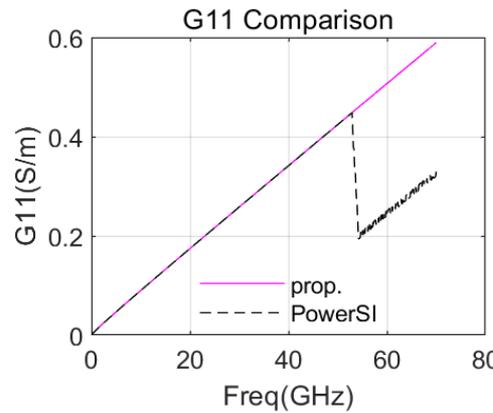
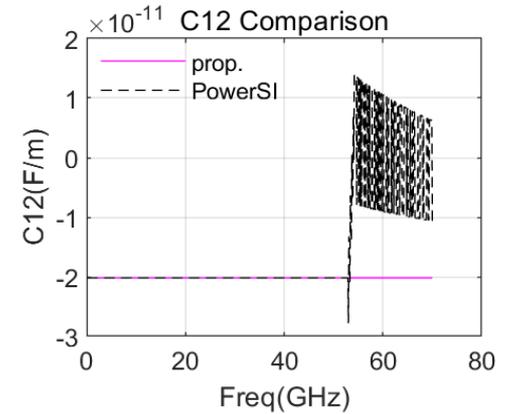
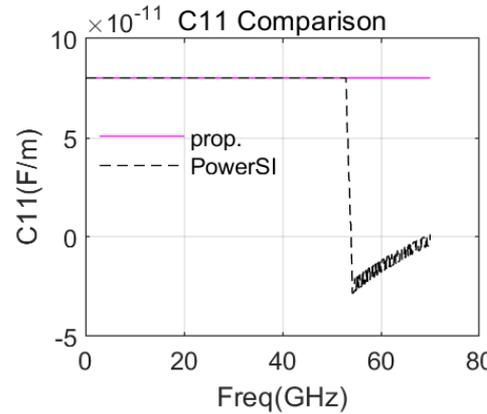
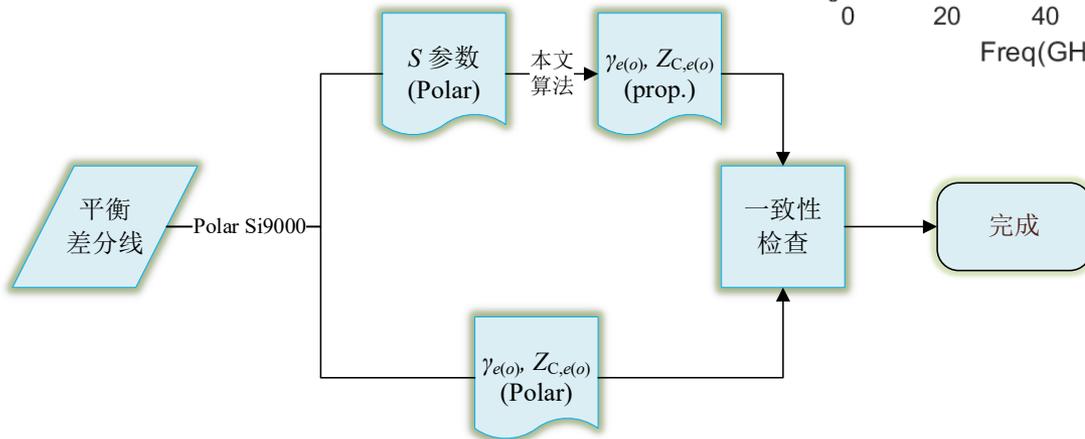


仿真实例二

- 目的：验证基于 S 参数的传输线参数提取算法
- 结构：平衡差分微带线



- 流程：



传输线 RLGC, 对比PowerSI

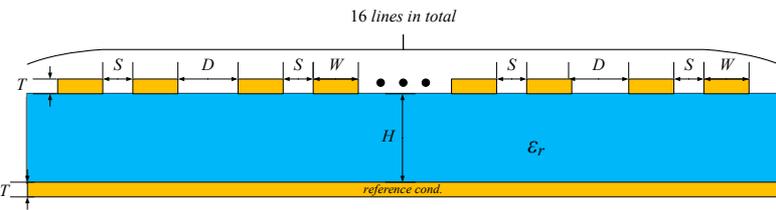
横坐标：频率 (GHz);
 纵坐标：单位长度 C 或 G
 紫实线：本文算法;
 黑虚线：Cadence Sigrity PowerSI;



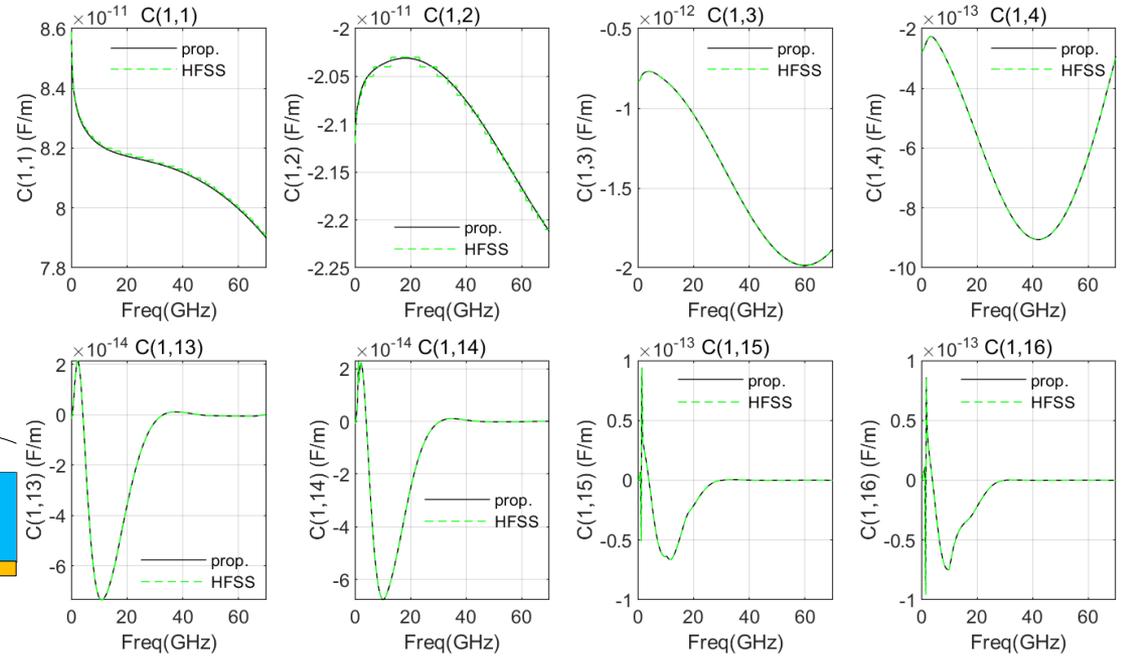
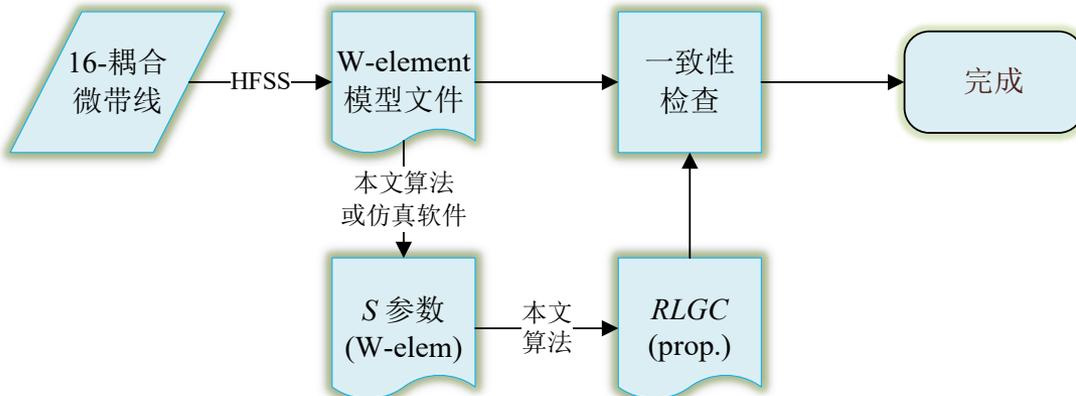


仿真实例三

- 目的：验证基于 S 参数的传输线参数提取算法
- 结构：16-耦合微带线



流程：



传输线 $RLGC$ vs. 原 W-element
 横坐标：频率 (GHz) ;
 纵坐标：单位长度 C
 实线：本文算法 ;
 虚线：W-element (HFSS) ;



1

绪论

2

多导体传输线频域分析

3

基于 S 参数的传输线参数提取

4

实例分析与讨论

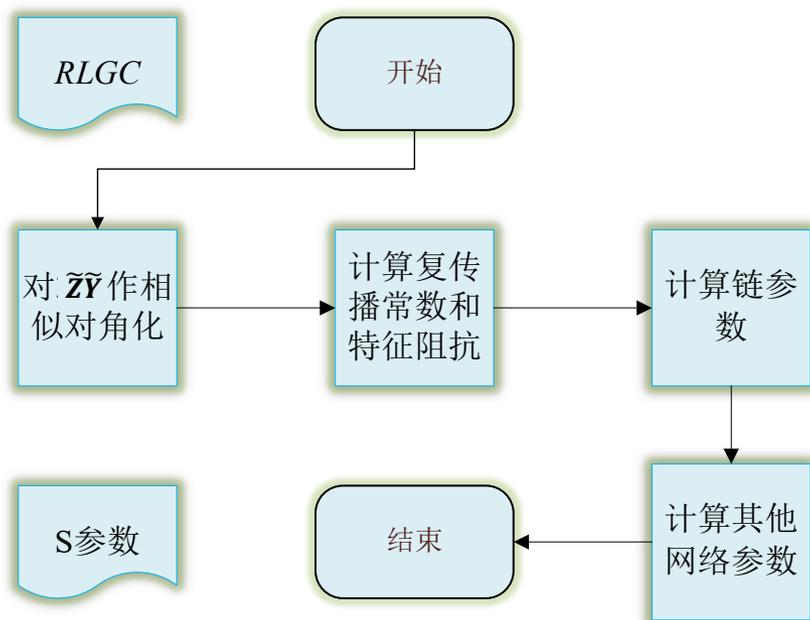
5

总结与展望

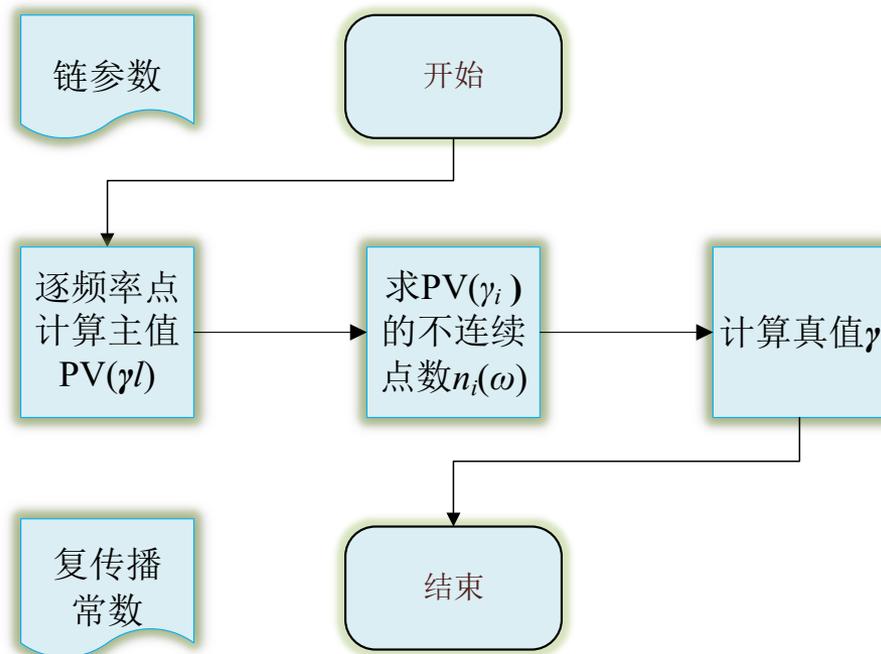




主要算法一览



由传输线参数求解网络参数

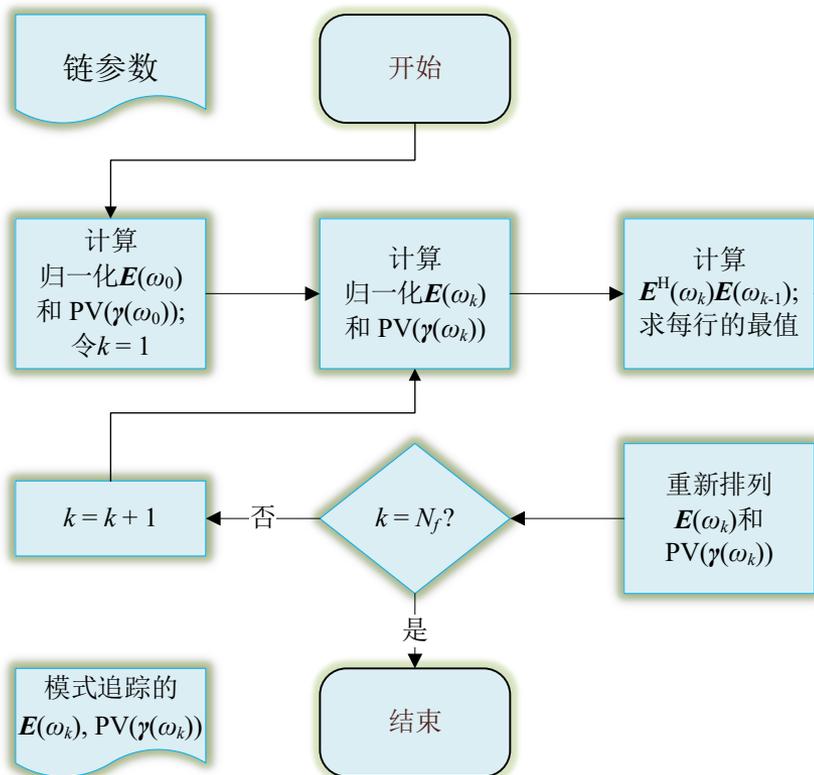


基于不连续点计数的相位解折叠算法

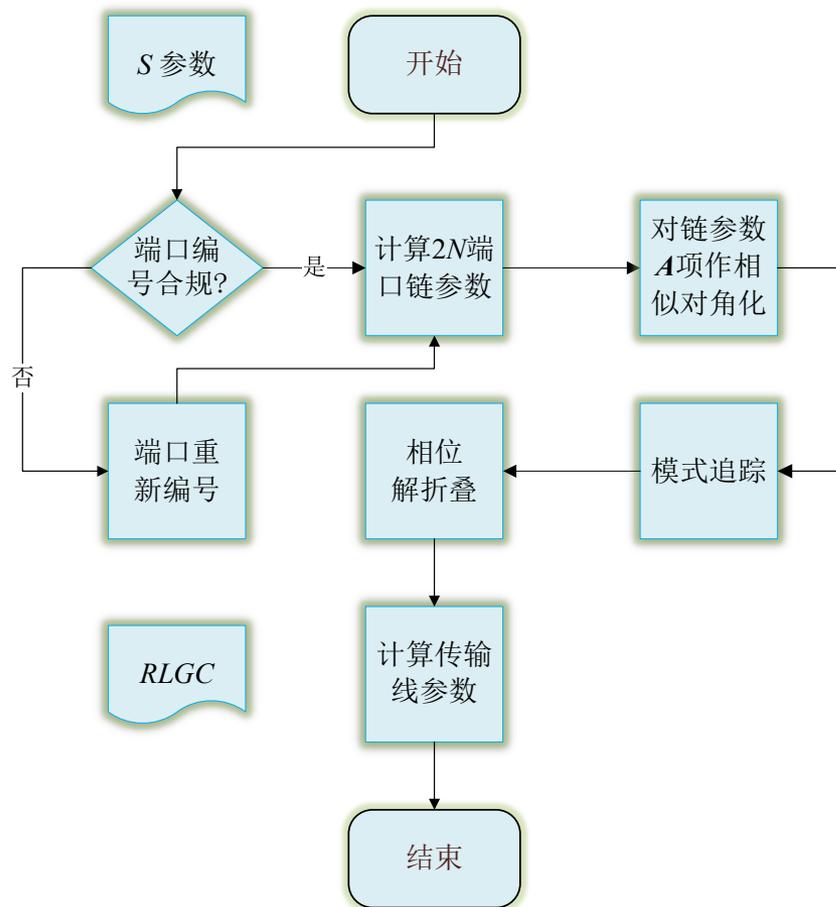




主要算法一览



基于 Hermitian 内积的模式追踪算法



基于 S 参数的传输线参数提取算法





全文工作总结

- 1. 梳理传输线理论
 - 定义传输线参数 $RLGC$, 复传播常数 Γ , 特征阻抗 Z_C
 - MTL 方程基本假设: 准 TEM (quasi-TEM) 假设
- 2. 梳理多导体传输线频域分析理论
 - 频域 MTL 方程的通解: 对系数矩阵作相似对角化
 - $N + 1$ 导体传输线的 $2N$ 端口表征: 网络参数 ~ 传输线参数
- 3. 建立基于 S 参数的传输线参数提取算法
 - 基于不连续点计数的相位解折叠算法
 - 基于 Hermitian 内积的模式追踪算法
 - 相关内容已投稿 2020 年全国微波毫米波会议并录用, 题目: 基于 S 参数的耦合传输线 $RLGC$ 参数提取算法
- 4. 仿真实验
 - 使用 HFSS, ADS, Cadence Sigrity, Polar Si9000, MATLAB 等软件



感谢老师和同学们的聆听
恳请各位老师批评指正





参考文献

- [1] CHU Y, YU J Z, QIAN Z. Robust and efficient RLGC extraction for transmission line structures with periodic three-dimensional geometries[C]//2015 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility and Signal Integrity, EMCSI 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015: 203–208. DOI:10.1109/EMCSI.2015.7107686.
- [2] BALACHANDRAN J, BREBELS S, CARCHON G, etc. Accurate broadband parameter extraction methodology for S-parameter measurements[C]//Proceedings - 9th IEEE Workshop on Signal Propagation on Interconnects, SPI 2005. . DOI:10.1109/SPI.2005.1500897.



正文目录

▪ 第一章 绪论	1	▪ 2.2 传输线方程	9
▪ 1.1 研究背景和意义	1	▪ 2.2.1 由麦克斯韦方程组导出MTL方程	9
▪ 1.1.1 基于测试的传输线建模方法	1	▪ 2.2.2 传输线的单位长度等效电路	13
▪ 1.1.2 国内外研究现状	1	▪ 2.2.3 传输线方程的应用限制	14
▪ 1.1.3 本课题的研究目的	2	▪ 2.3 传输线的单位长度参数	15
▪ 1.2 传输线理论	2	▪ 2.3.1 单位长度参数的性质	15
▪ 1.2.1 多导体传输线结构实例	2	▪ 2.3.2 单位长度参数的频率依赖模型	15
▪ 1.2.2 传输线的分析方法	3	▪ 2.3.3 单位长度参数的数值求解	15
▪ 1.3 微波网络分析	4	▪ 2.4 多导体传输线频域分析	16
▪ 1.4 本文主要工作与章节安排	6	▪ 2.4.1 频域传输线方程	16
▪ 第二章 传输线的单位长度参数和频域分析	7	▪ 2.4.2 频域传输线方程的相似变换求解法	16
▪ 2.1 传输线的类型	7	▪ 2.4.3 多导体传输线的2N端口表征	19
▪ 2.1.1 传输线的均匀与非均匀	7	▪ 2.4.4 由传输线参数求解S参数	22
▪ 2.1.2 介质的均匀与非均匀	8	▪ 2.5 本章小结	24
▪ 2.1.3 传输线的有耗与无耗	8		



正文目录

▪ 第三章 基于S参数的传输线参数提取方法	25	▪ 4.2 由传输线参数求解S参数	39
▪ 3.1 单端传输线	25	▪ 4.2.1 传输线结构设计	39
▪ 3.2 平衡差分线	26	▪ 4.2.2 实验思路和实验目的	40
▪ 3.3 一般的准TEM传输线	27	▪ 4.2.3 实验结果与分析	41
▪ 3.3.1 算法的形式推导	27	▪ 4.3 从S参数提取传输线参数	42
▪ 3.3.2 基于不连续点计数的相位解折叠算法	29	▪ 4.3.1 平衡差分微带线的奇偶模特性提取实例	42
▪ 3.3.3 基于Hermitian内积的模式追踪算法	33	▪ 4.3.2 一种16-耦合微带线的单位长度参数提取实例	45
▪ 3.3.4 由S参数提取传输线参数	37	▪ 4.4 进一步讨论	47
▪ 3.4 本章小结	38	▪ 4.4.1 误差传递	47
▪ 第四章 实例分析与讨论	39	▪ 4.4.2 S参数的前处理	49
▪ 4.1 仿真平台简介	39	▪ 4.4.3 传输线参数的后处理	50
▪ 4.1.1 Ansys HFSS	39	▪ 4.5 本章小结	50
▪ 4.1.2 PathWave ADS	39	▪ 第五章 总结与展望	51
▪ 4.1.3 Polar Si9000	39	▪ 5.1 论文工作总结	51
▪ 4.1.4 Cadence Sigrity PowerSI	39	▪ 5.2 未来研究展望	51
▪ 4.1.5 MATLAB	39		



附一：课题任务书

- 本课题主要研究单线、2线、4线、以及16线的基于 S 参数的多导体传输线 $RLCG$ 提取算法，通过理论推导、算法验证，依次解决参数提取过程中的相位折叠、双线解耦、多线解耦等问题，通过详细的理论分析和算法设计，算法精度可以对标国际主流的仿真工具和算法。
- 能熟悉和理解基于 S 参数的多导体传输线 $RLCG$ 提取的基本问题；能对单线、2线、4线、以及16线的基于 S 参数的多导体传输线 $RLCG$ 提取所遇到的相位折叠、双线解耦、多线解耦进行理论分析和算法验证；完成算法软件设计与验证；完成毕业报告的撰写。



附二：源代码与仿真工程文件

- <https://grwei.github.io/transmission-line-params-extractor/>

The screenshot shows the GitHub repository interface for 'transmission-line-params-extractor'. At the top, it displays repository statistics: 84 commits, 3 branches, 0 packages, 1 release, 1 environment, 1 contributor, and MIT license. Below this, there are buttons for 'Branch: matlab', 'New pull request', 'Create new file', 'Upload files', 'Find file', and 'Clone or download'. The main content area shows a commit history table with the following data:

Commit	Description	Time
grwei Update docs		Latest commit ef394ec 5 hours ago
data	Update docs	7 days ago
doc	Update docs	5 hours ago
.gitattributes	Add single-line data and test routine	3 months ago
.gitignore	Add Patents US8892414B1 Website	3 months ago
LICENSE	Initial commit	3 months ago
README.md	Update docs	7 days ago
check_consistence.m	Add 16-line data and test3.m	18 days ago
rlgc2s_t.m	增加正文（素材——公式），补中期文档，添加一致性检查	last month
s2rlgc_t.m	Add ADS simu data	10 days ago
test0.m	Modify simulation data	11 days ago
test1.m	Update docs	8 days ago
test1.mat	Update docs	8 days ago



附三：会议论文摘要

基于 S 参数的耦合传输线 RLGC 参数提取算法[←]

危国锐，夏彬[←]

(上海交通大学，上海，200240)[←]

weiguorui@sjtu.edu.cn[←]

摘·要··本文从传输线电报方程和奇偶模分析理论出发，导出了一种简易高效的基于 S 参数的耦合传输线 RLGC 参数提取算法。与主流算法相比，本文导出的算法避免了繁杂的矩阵运算。仿真验证结果表明，本文算法的 RLGC 参数提取效果与主流商用软件一致。[←]

关键词→ RLGC, 单位长度参数, 散射参数, 耦合传输线[←]

S-parameter-based RLGC Extraction for Coupled Transmission Lines[←]

Guorui Wei, Bin Xia[←]

(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240)[←]

Abstract:·Based on the transmission line telegraph equation and even-odd mode analysis theory, a simple and efficient S-parameter-based coupled transmission line RLGC parameter extraction algorithm is derived. Compared with mainstream algorithms, the algorithm derived in this paper avoids complicated matrix operations. Simulation results show that the extraction performance of this algorithm is comparable to mainstream commercial software.[←]

Keywords: RLGC, per-unit-length parameters, S-parameters, coupled transmission line 分节符(连续)



附四：未来研究展望

- 1. MTL 方程基本假设对算法的影响
- 2. 直流 $RLGC$ 参数和无限远频率处 LC 参数的提取算法
- 3. 模型的稳定性 (stability)、因果性 (causality) 和无源性 (passivity)
- 4. 参数提取的误差来源和传递
- 5. 传输线模型建模性能的时域-频域定量评价指标



Q & A

- **Q1: 你的工作量?**
- A1: 梳理传输线理论, 完善参数提取算法的推导, 编制程序, 仿真。
- **Q2: 你的创新点?**
- A2: 主要是模式追踪算法的改进: 只需做一次内积即可确定正确顺序。另外完善了参数提取算法的理论阐述。
- **Q3: 如何处理实测 S 参数中的噪声?**
- A3: 论文里提及, 要求在参数提取前对 S 参数作前处理, 至少保证无源、因果、稳定和互易性。更详细的处理方法需进一步研究。
- **Q4: 参数提取工作的意义?**
- A4: 实现基于测试的建模, 可以避免仿真结构同成品结构间的差异, 以及场求解器自身的精度限制。获得的模型可用于信号完整性仿真, 提供更真实的建模。
- **Q5: 同商用软件性能对比?**
- A5: 以仿真 S 参数为输入, 大体与 PowerSI 相当, 某些情况 (如: 实例二) 更优。
- **Q6: 算法的时间复杂度?**
- A6: 32端口, 频率点数700, 可在数秒内完成提取。

谢谢!

