毕业论文素材（主要公式）

# 符号定义

导体传输线的MTL方程[1]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （1） |

其中单位长度阻抗，单位长度导纳**，**分别是单位长度电阻、电感、电导、电容。

# 主要公式

## 由RLGC参数求解S参数

单位长度RLGC参数作为MTL方程的参数，当其完全确定时，MTL方程的解便完全确定，从而MTL的特性也可完全确定。给定线长为的MTL在频率处的RLGC参数和，可求出其在频率处的S参数。

### 复传播常数和特征阻抗的求解

首先对作相似对角化（应几乎处处可行，条件见[1]）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2） |

其中复对角阵的对角元素是第个特征模式的特征复传播常数，变换矩阵的第列是的第个右特征向量。定义复传播常数[2][3]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3） |

及特征阻抗[2]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4） |

### ABCD参数的计算

ABCD（*chain-parameter*）矩阵与单位长度参数的关系式一[2]，推导见[3][1]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

关系式二[1,4]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5） |

式中

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6） |

其中作用于对角阵的双曲函数的定义为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （7） |

可以证明，对于一个确定的矩阵，其的值是唯一的，与的相似对角化方式无关。

根据[3](7.127)，关系式一不正确。MATLAB复现也提示式二比式一好，故目前采用后者。文献[1,3]分别给出了式二式一的推导，建议说明它们是否一致？

由式（5）可以看出，并非任意微波网络参数都有对应的RLGC参数。例如，文献[3]指出上式有（可用[1]第7章证明），于是不满足该约束的ABCD参数不可能通过由它提取的RLGC参数准确还原。这种数学上的约束正与文献[1]所述（引前章）的MTL方程基本假设和RLGC参数的适用条件相对应。

由式（5）还可以看出一个重要的事实：给定，能唯一地得到一个ABCD矩阵；然而在特定频率处，不同的可能对应相同的ABCD矩阵。例如，若有

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （8） |

则在该频率下，与将对应到同一个ABCD矩阵。这一计算上的重要事实体现了MTL设计中的一种现象，即不同的MTL结构可能在某一特定频率上具有相同的特性。

### 由ABCD参数到S参数的变换

微波网络参数S (scattering)，Z (impedance)，Y (admittance)，ABCD (chain)之间可以相互转换[5]。先将ABCD参数变换到Z参数

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （9） |

再将Z参数变换为S参数，法一

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （10） |

法二[5]，当端口阻抗皆为相同的实数

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

上式，是端口参考阻抗（假定个端口的参考阻抗均为相同的正实数），是阶单位阵。

在MATLAB实现，上两式性能未见区别。建议说明上述两式等价。（算了吧）

### 小结

本节叙述了由MTL的RLGC参数求解S参数的方法。该算法从RLGC参数出发，逐频点依次求解MTL的复传播常数、特征阻抗、ABCD参数、Z参数，最后求出给定端口参考阻抗下的S参数。可见，给定一组RLGC参数，可唯一地求出相应的S参数。然而，可能存在不同的RLGC参数，二者在某一特定频率下具有相同的S参数。

## 由S参数求解RLGC参数

第2.1节详述了由MTL的RLGC参数求解S参数的方法。受此启发，本节将推导其逆过程：已知MTL的S参数和线长，提取其单位长度RLGC参数。

### 将S参数变换为ABCD参数

首先将S参数变换为Z参数。法一[2]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （11） |

法二[5]，当端口阻抗皆为相同的实数

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

在MATLAB实现，上两式性能未见区别。建议说明上述两式等价。

然后将Z参数变换为ABCD参数[2][5]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （12） |

### 从ABCD参数求解复传播常数和特征阻抗

由式（5）可知，若式（12）的ABCD参数是来自于满足约束（要在文前说明）的MTL，则满足相似对角化关系

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （13） |

从而，只要对作特征值分解，就可得到式（2）（3）中的变换矩阵及。然而，由于函数具有周期，由的值只能得到的一支，如主值支，这就是“相位折叠”现象。对于复数，记

复对数函数（主值）

式中正负号的选取使得的实部非负，虚部属于[6]。

值得指出的是，式（13）对的特征值分解不是唯一的：如对于同一组特征值，对应的右特征向量矩阵的每列可以乘以任意复常数；的列也可以任意调整顺序，只要的主对角线元素也相应调整顺序；若有一些相同的特征值，则这些特征值对应的特征向量的任意线性无关的线性组合可以替换中相应的列。

沿用上述记号，由可以求得的的主值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （14） |

我们的目标是要求解的真值，它与的主值相差的整数倍，即

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （15） |

其中为待定系数。式（15）中的一经确定，MTL的复传播常数就可由式（3）（13）确定。

由式（5）（6），可导出特征阻抗的计算公式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （16） |

即的值可由和ABCD矩阵的子阵唯一地求解。，

至此，有必要对上文公式作以下说明：

（1）上述公式未体现所涉各参数的频率依赖特性

到目前为止，所有公式在不同频率点之间的计算是独立的。因此，就上述公式谈论复传播常数、特征阻抗和RLGC参数的频率依赖特性没有多大意义，除非考虑更多约束条件。例如，从式（8）（15）（16）可以看出，若仅在单个频率点处独立求解，则由ABCD参数出发，不能唯一地确定复传播常数和特征阻抗，从而也不能唯一地确定RLGC参数，故对其频率依赖性的研究也就无从谈起。又如，由于式（13）中满足相似对角化关系的不唯一，所以不加约束地研究的某特定分量对频率的依赖关系同样没有意义。

（2）的合理值应是唯一的

式（15）中的不同取值（从而不同）将导致不同的RLGC参数。从这些RLGC参数出发，按本文第2.1节建立的方法重建产生的ABCD参数是相同的（自然，S参数等其他网络参数也相同）。但并非的任意取值都是合理值。一个合理的至少应满足这样的基本约束：在相距充分小的两个频率点处，在该下求解得到的频率依赖RLGC参数、复传播常数、特征阻抗及各种网络参数的差别可任意小。所以，为了得到具有物理意义，从而适用于MTL时域和频域仿真的RLGC参数，我们必须要仔细确定的值，这对于RLGC模型的性能至关重要[7]（建议不要展开）。后文将详细建立其确定方法。

基于上述两点，下文将建立基于不连续点计数的相位解折叠方法和基于Hermitian内积的模式追踪方法，最终目标是建立从S参数提取有物理意义且适用于MTL建模的频率依赖RLGC模型的完整方法。

### 基于不连续点计数的相位解折叠算法

由上节讨论可知，由式（13）中对作特征值分解得到的，只能求出的真值。为了克服相位折叠现象以还原的主值，本节将提出一种基于不连续点计数的相位解折叠算法。

可以这样解释相位折叠现象发生的原因：由复传播常数和特征阻抗计算ABCD参数的过程需要作特征值分解，导致的相位信息即式（15）中的“丢失”了，体现在计算上就是双曲函数的周期性。为了恢复相位信息，可以从本身应具有的性质入手。

考虑到（要引用些art，例如[8]。建议引更经典的，看[9]有没有？），，故有

其中要适当选值，使，采用的方法：

①首先逐频点求出；

②对于，统计上的接近的跳变次数，即为.

通过上述求出

（待续）

### 基于Hermitian内积的模式追踪方法

RLGC参数的

# 数值验证与可靠性分析

## 正向验证：S，RLGC，S’

## 反向验证：RLGC，S，RLGC’

## 参照性频域可靠性分析：S，RLGC，S’；S，PowerSI，S’’；/delta S’ ~ /delta S’’

## 可选：参照性时域可靠性分析：S -> RLGC；S -> PowerSI；S -> 直接时域方波；三者比较

## 算法时间复杂度：大规模MTL的S参数。无需考虑MTL方程约束，因仅比较时间性能。

## 频率依赖关系的物理解释，可参考[7]

# 改进方法比较

## 特殊频率参数提取：直流，无穷

## 可选：patent[4]的剩余部分，包括传播常数的符号、相位解折叠算法可靠性的先验判别法、

## 谐振问题的处理

### 定经验谐振区间判别法，除谐振区间，再用非谐振区间的首次参数作简单插值

### 取低频RLGC，再spice经验公式外推

### 取低频RLGC，再因果性外推

## 可选：修正S参数（无源／因果／互易，可用ADS），再提取RLGC

参考文献

[1] PAUL C R. Analysis of multiconductor transmission lines[M/OL]. 2nd ed 版. John Wiley & Sons, Inc., 2007[2020–02–11]. https://www.wiley.com/en-cn/Analysis+of+Multiconductor+Transmission+Lines%2C+2nd+Edition-p-9780470131541.

[2] SAMPATH M K. On addressing the practical issues in the extraction of RLGC parameters for lossy multiconductor transmission lines using S-parameter models[C]//Electrical Performance of Electronic Packaging, EPEP. . DOI:10.1109/EPEP.2008.4675929.

[3] KIM J H, OH D, KIM W. Accurate characterization of broadband multiconductor transmission lines for high-speed digital systems[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2010, 33(4): 857–867. DOI:10.1109/TADVP.2010.2050204.

[4] SUBRAMANIAN N L, MICHAEL J T. Transmission-line simulators and methods: US8892414B1[P]. 2010–02–26.

[5] REVEYRAND T. Multiport conversions between S, Z, Y, h, ABCD, and T parameters[C]//International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-Wave Circuits, INMMIC 2018 - Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. DOI:10.1109/INMMIC.2018.8430023.

[6] 佚名. sinh, cosh, tanh, asinh, acosh, atanh[EB/OL]([日期不详])[2020–04–30]. https://franz.com/support/documentation/ansicl.94/dictentr/sinhcosh.htm.

[7] BRAUNISCH H, GRABINSKI H. Time-domain simulation of large lossy interconnect systems on conducting substrates[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1998, 45(9): 909–918. DOI:10.1109/81.721257.

[8] 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.

[9] POZAR D M. Microwave Engineering, 4th Edition[M]//John Wiley &Sons, Inc. .