

射频电路辅助分析第三章笔记

电磁1802 吴叶赛 U201813405

第三章 微波线性电路分析与设计

第一节 微波线性网络的电路矩阵和 S参数矩阵分析

在各种元件中，根据使用的功能不同有：把某功率按一定比例分配 把某一功率按一定比例分配 为几路输出，或者相反地，把几路功率合成一路后再输出的**功率分配器**、**定向耦合器**；使某一给定频带的信号通过（或抑制），而抑制（或通过）其余频率信号的**滤波器**；为保证负载能从信号源获取最大的功率的**阻抗匹配器**；连接各种不同截面形状和尺寸的传输线的转换接头以及为获得信号 单方向传输的**不可逆元件**（**隔离器**、**环行器**）等。

从元件的尺寸大小同工作波长可相比拟，或者说，电磁波信号从元件中的一处传输到另一处的时间同信号的振荡周期可相比拟去认识。

一、研究微波元件常用两种方法，即场的方法和路的方法。

场的方法：以电、磁场强度作为基本量，以麦克斯韦方程组为基础，求解电磁场的边值问题，得出元件中各电 得出元件中各电、磁场的表达式，最终，可以用等效参量 可以用等效参量 表示端口之间的传输特性。这种分析方法在理论上是严格的，普遍适用的，但在实际应用上并不都是方便可行的，特别是对那些形状不规则的微波元件，由于边界复杂，媒质不一，数学表示及运算都是很困难。

路的方法：把微波元件用 个网络来等效 一个网络来等效，应用电路和传输线理论 应用电路和传输线理论，求得 元件各端口间信号的相互关系。虽然它得不到元件内部场的分布情况，但仍不失为研究微波元件及系统的重要方法。

二、微波网络的分析模型

这个模型是由边界封闭曲面围成的、内部结构确定的传输电 磁波能量的媒质空间和若干条同外界相连接的微波传输线所组成。媒质空间区域 V 内充填一种或多种媒质。微波传输线为无耗、均匀传输线，其类型可以相同或不同，或横截面形状相同而尺寸大小不同，可以是单模传输或是多模传输。同外界相连接处称为端口，常给以编号（1, 2, ..., n），它是一个与传输线中电磁波能量传输 方向相垂直的传输线横截面，这个横截面又称为参考面，用 T 表示。

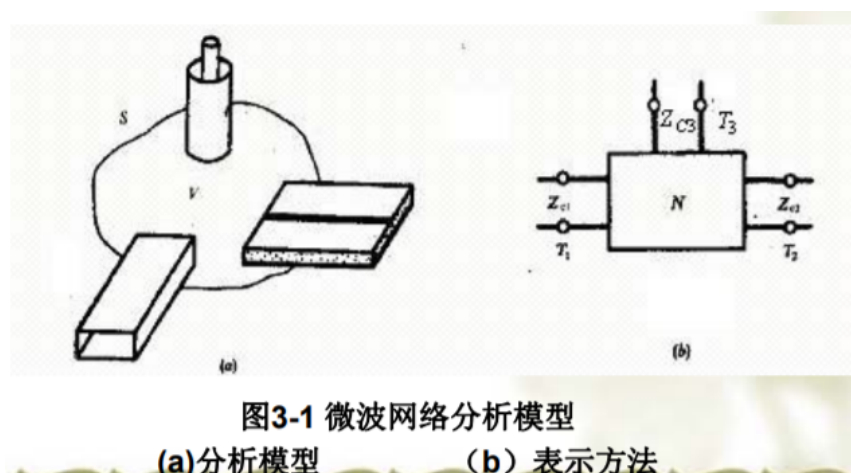


图3-1 微波网络分析模型

(a)分析模型

(b)表示方法

网络分析模型就是由端口参考面和理想导体边界面围成的媒质空间。

用一个 方框和平行双线传输线及其参考面代表，如图3-1(b)所示。这就是微波等效网络，或直接称做微波网络。若媒质空间区域内没有任何场源存在，称做无源微波网络；若充填媒质是与场强无关的线性媒质，称做线性微波网络。本章讨论无源或有源线性微波网络的分析与设计方法。

微波网络同低频网络的区别，这些区别是由微波网络本身的特点所决定的，其表现在：

(1) 一个微波元件或系统用一个微波网络表示时，必须明确规定参考面的位置。

如果选择不同的参考面位置，则网络所规定的空间区域也改变，网络参量随之改变。参考面位置可按照需要和方便选取，但应遵循两条原则：

- 1、参考面必须同均匀传输线的纵方向相垂直；
- 2、在参考面处只考虑传输模式场的存在，不考虑其它模式场的存在。通常参考面应选择在远离不均匀性的地方。

(2) 微波网络参量是在微波传输线中只存在单一传输模式下确定的。

例如对金属矩形波导，通常是指主模；对同轴线、带状线，是指TEM模，当微波传输线中存在多模传输时，按不同模式考虑为一个多端口网络，其网络参量仍按各个传输模式分别确定 TE₁₀。

(3) 微波网络元件是几何形体很不相同的各种微波结构 微波网络元件是几何形体很不相同的各种微波结构，视其储存磁能、储存电能和消耗电能的多少而决定为电感、电容和电阻性元件，它们的元件值 L、C和R随频率改变而变化。

(4) 通过微波网络端口的电磁波能量，由端口横截面上的横向电场和横向磁场唯一确定。

等效网络的端口参量，如电压波和电流波等 如电压波和电流波等，视引出传输线等效特性阻抗的选取而定，不存在单值性。事实上，在微波网络中，采用归一化参量是方便的。

单模等效TEM波传输线

等效TEM波传输线的传输功率应与原微波传输线的传输功率相等的原则，只需考虑对传输功率有贡献的横向场分量。

功率归一化条件: 根据沿z方向传输的复数功率为：

$$P = \int_S (\vec{E}_t \times \vec{H}_t^*) \cdot \hat{z} ds = VI^* \int_S (\vec{e}_t \times \vec{h}_t^*) \cdot \hat{z} ds$$

Z_c的选用具有任意性，一般按实用、方便进行，经常采用的有三种：

(1) 按某种特定方法定义和计算：

$$Z_{C1} = P^+ / |I^+|^2$$

$$Z_{C2} = \frac{|V^+|^2}{P^+}$$

$$Z_{C3} = \frac{V^+}{I^+}$$

(2) 选用特性阻抗等于波阻抗：

$$Z_c = Z_w, \quad Z_w = \frac{E_t^+}{H_t^+} = \frac{E_t^-}{H_t^-}$$

(3) 选用特性阻抗为单位 1: $Z_c=1$, 称作归一化特性阻抗。

几个重要定理

坡印廷能量定理:
$$\sum_{i=1}^n V_i I_i^* = P + j2\omega(W_m - W_e)$$

它表示通过网络各个端口流入网络内的复功率, 其实部(净有功功率)为网络的消耗功率, 而虚部(净无功功率)为网络内电磁能量的变化率。

互易定理:
$$\sum_{i=1}^n (V_{i1} I_{i2} - V_{i2} I_{i1}) = 0$$

无耗单端口网络的电抗定理:

$$\frac{dX}{d\omega} = \frac{2}{|I|^2} (W_e + W_m) \geq 0 \quad \frac{dB}{d\omega} = \frac{2}{|V|^2} (W_e + W_m) \geq 0$$

无耗单端网络的输入电抗函数或输入电纳函数的斜率总是正的 无耗单端口网络的输入电抗函数或输入电纳函数的斜率总是正的。

而在微波匹配网络中, 往往加入限制条件, 即网络端口连接的传输线的特性阻抗应当等于影像阻抗。

当确定等效传输线的特性阻抗后, 这三组端口变量各自都能代表 □ 当确定等效传输线的特性阻抗 Z 后, 这三组端口变量各自都能代表端口传输线中的入射波和反射波的横向电、磁场, 传输相同的功率, 统称为波变量。按照网络各端口上波变量的线性关系组成线性方程组。其系数 Z_c 为波变量, 按照网络各端口上波变量的线性关系, 组成线性方程组, 其系数矩阵统称为网络波矩阵。

当采用 a 和 b 作为网络的端口变量时, 网络的各个端口连接传输线, 都已用各自传输线的特性阻抗归一化了, 该网络为归一化网络。相对于网络来说, a 是向着网络方向行进的波, 是向着网络方向行进的波, 称为入射波, 也称为内向波, b 是背离网络方向进行的波, 称为出射波, 也称为外向波, 或称为散射波。

当级联端口传输线的特性阻抗不相同, 只需把连接接头也作为一个级联于其中的二端口网络来处理就可以了。

无耗、可逆的三端口微波网络, 其三个端口不可能同时得到匹配, 即 S_{11} 、 S_{22} 和 S_{33} 不可能同时等于零。

匹配特性: 一个无耗二端口的散射矩阵, 如果一个端口是匹配的, 则另一个端口将自动匹配。这个原理称为无耗端网络阻抗匹配可逆原理。这个原理称为无耗二端口网络阻抗匹配可逆原理。

第二节 不定导纳矩阵法分析任意端口微波线性电路

不定导纳矩阵可分析任意结构的线性电路(包括多端口网络), 也是一种频域分析方法。

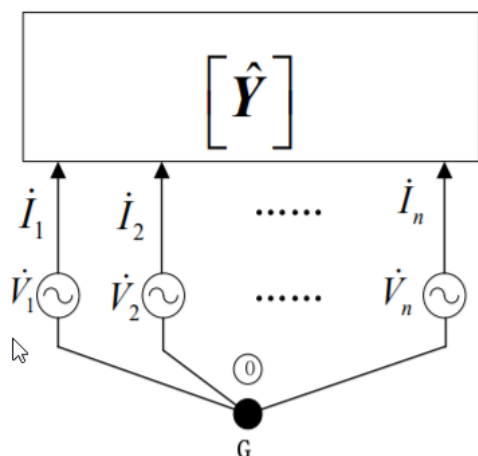


图3-16 用不定导纳矩阵表示的端口网络

当电路的节点均为端点时，具有 n 个节点的线性电路见图3-16。其中，网络的每一个端口由电路的一个外部端点与公共参考点 G 组成。参考点 G 称为浮动节点，它不与电路连接。因此，不定导纳矩阵即为以参考点为公共端的 n 端口网络的短路导纳矩阵。

对于大多数有源器件以及一些具有复杂边界条件的元件，它们的 Y 矩阵或等效电路参数不可能精确地从理论中导出。这时，一般应用测量的方法，先测出其散射参数（测试时各端口必须具有公共端点），然后把它转换成导纳参数，最后利用前述第二种方法求出其不定导纳矩阵。

具有 n 个节点（不包括参考节点）的一个微波电路的不定导纳矩阵求法：

- 首先写出电路中各个元件的 $n \times n$ 阶不定导纳矩阵；
- 然后把这些矩阵相加即得到整个电路的不定导纳矩阵 \hat{Y} 。

利用不定导纳矩阵分析微波电路的方法总结：

- 第一步：首先对电路各节点依次编号，并将1号节点作为公共节点（参考节点）；
- 第二步：分别求出各个元件在电路中的不定导纳矩阵 \hat{Y}_j ；
- 第三步：将所有元件的不定导纳矩阵相加得到整个电路的不定导纳矩阵 $\hat{Y} = \sum_{j=1}^n \hat{Y}_j$ ；
- 第四步：由不定导纳矩阵计算其逆矩阵，得到矩阵 $\hat{Z} = \hat{Y}^{-1}$ ；
- 第五步：根据电路的端接条件确定与外部信号源或负载相连接的节点，这些节点所对应的外部电流不为零；
- 第六步：从不定导纳矩阵直接写出与外部信号源或负载相连节点的电压、电流所满足的方程，并进而得到这些节点多对应的阻抗矩阵、级联矩阵；
- 第七步：根据级联矩阵，计算这些与外部信号源或负载相连接的节点之间的传输系数、输入/输出反射系数。

第三节 电路方程的建立与求解

理想的数学方法应达到以下三个目的：1，分析结果精度高；2，计算速度快；3，节省内存空间。上述目标是相互制约的，上述目标是相互制约的，必须在总体上予以兼顾或者对其中某 必须在总体上予以兼顾或者对其中某一目标有所侧重。

建立电路方程有且仅有两个基本依据：

反映电路拓扑特性的基尔霍夫电流定律（KCL）、

基尔霍夫电压定律（KVL）

反映电路中各个元件伏安特性的元件特性方程（VAR）

电路方程建立后，接下来的就是求解方程。一般来说，电路方程的解法有两类：解析法和数值法。大家此前学到的都属于解析法，例如冲激函数-卷积法、频域传递函数法（包括S参数法）。对于复杂电路，解析法往往无法使用，这时只能使用数值法。

KCL：流入电路中任一节点的电流之和为零： $AI_b = 0$

其中， A 为电路的节点-支路关联矩阵， I_b 为电路的支路电流列向量。

KVL：沿电路中任一回路的电压之和为零： $U_b = A^T U_n$

其中， A^T 为 A 的转置， U_b 和 U_n 分别表示电路的支路电压列向量和节点电位列向量。

基本节点分析法：

写出基本节点方程的步骤：

- 1，为每个独立节点和每条支路编号；
- 2，写出电路的节点-支路关联矩阵 A ；
- 3，按支路编号写出每条支路上元件的VAR方程；
- 4，按支路顺序将每条支路元件VAR方程排列起来，形成整个电路的VAR矩阵方程 $I_b = Y_b U_b + J_b$ ，从而提取支路导纳矩阵 Y_b 和支路电流源列矢量 J_b ；
- 5，根据公式 $AY_b A^T = Y$ 和 $-AJ_b = I$ ，计算得到电路导纳矩阵 Y 和电流列矢量 I ，从而得到整个电路的节点电压方程 $YU_n = I$ 。

以独立节点电压作为未知量有以下特点：

- 1，电路中任何支路的电压或电流均可方便地用节点电压表示出来；
- 2，一般来说，电路中的独立节点的数目较少（相对于支路数、回路数而言），于是电路方程的规模小，便于求解；
- 3，独立节点容易选取，而独立回路和割集的选取就要麻烦得多。电路越复杂，这个问题越突出。正因如此，节点电压方程特别适合于计算机上的方程自动建立。前面介绍的不定导纳矩阵方程可看成是节点电压方程的特例。

混合分析法（HAM）：把电路划分为“阻抗支路”、“导纳支路”、电压源支路、电流源支路，并以独立节点电压、“阻抗支路”和电压源支路中的电流为未知变量建立电路方程。详细内容参见有关参考书目。

稀疏列表法 (STF)： 对于含有 n 个独立节点、 b 个元件的电路，将每个元件作为一条支路，一个元件作为一条支路，并以所有支路电压、支路电流和独立节点电压作为未知变量，则所有元件的VAR一般可表示为： $\mathbf{DUDIS} = \mathbf{S}$ 。其中， \mathbf{D} 为系数矩阵，而 \mathbf{S} 是所有支路的独立源是所有支路的独立源（包括电压源和电流源）矢量。

第四节 微波电路的时域分析

微波电路（网络）分析主要包括直流工作点分析、瞬态分析、交流小信号和大信号稳态分析等问题，其中直流分析和瞬态分析属于时域分析问题，而交流稳态分析则属于频域分析问题或时域/频域混合域分析问题。微波电路在小信号激励下的交流稳态分析属于单纯的频域线性分析，可以采用前述第一节或第二节的方法。

直流分析就是求电路的直流工作点，包括线性电路或非线性电路的直流工作点。这时，电路中所有电容视为开路，所有电感视为短路，电路中的非线性元件只有非线性电阻。因此，直流分析是线性直流分析是线性/非线性电路分析中最简单的情况。非线性电路分析中最简单的情况，但直流分析的结果不仅对电路的直流特性设计有指导意义，而且还是非线性电路瞬态分析、交流小信号分析和灵敏度分析的基础。

（一）直流分析的数值方法

在进行直流分析时，不考虑电路中储能元件的作用，只考虑线性和非线性电阻、电压源、电流源的影响，因此这时描述电路特性的方程可以用前述第三节所介绍的方法建立如下形式的非线性代数方程组：

$$\vec{G}(\vec{x}) = \mathbf{0} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} G_1(x_1, x_2, \dots, x_N) = 0 \\ G_2(x_1, x_2, \dots, x_N) = 0 \\ \vdots \\ G_N(x_1, x_2, \dots, x_N) = 0 \end{cases}$$

N-R法是求解非线性方程组的基本方法，考虑到非线性是由于构成电路的元器件的非线性所致，所以在计算机上通常是先将非线性元件线性化，得到非线性电路的所谓“线性伴随网络”，

（二）电路瞬态分析的数值方法

电路的瞬态分析就是计算网络加上激励信号时的瞬态响应、延迟时间、传输匹配等。线性电路的瞬态特性可以用线性微分方程组来描述，且当电路还是时不变的，则用常系数微分方程组表示；如果电路是非线性的，则微分方程是非线性的。因此，实际上，电路的瞬态分析问题就是建立微分方程组与求解微分方程组的问题。

拉氏变换是求解瞬态响应的一种方法，它将时域问题变换为频域问题，将微分方程的求解变换为代数方程的求解，从而使问题得以简化。但这种方法具有很大的局限性：一方面它不适用于非线性电路，另一方面激励信号波形受到限制，并且复杂电路的传输函数或拉氏反变换难于实现。因此，拉氏变换不能作为通用的瞬态分析方法。

数值积分法是求解微分方程（组）的有效方法，也是进行瞬态分析的通用方法，它既适用于线性电路，又适用于非线性电路。因此，在一般的电路分析软件中，不论是对于线性还是非线性电路的瞬态响应问题，都使用数值积分法进行求解。

数值积分的解是否足够精确，关键是看其方法的局部截断误差和 稳定性。

瞬态问题中常使用的两种数值积分法：梯形法和吉尔法

动态元件的瞬态伴随模型、电路瞬态分析的伴随模型法: 将上述各种数值积分法应用于非线性电路时，可得到对应于各个动态元件的瞬态伴随模型 元件的瞬态伴随模型，从而，就某时刻来说一，动态电路即变成电阻性电 动态电路即变成电阻性电 路，相应的微分方程就化为代数方程了。这样，将时间按步长增加，就能 求出新的离散时间点上的 求出新的离散时间点上的（电阻性）电路及其解。这就是电路瞬态分析的 是电路瞬态分析的 伴随模型法，并且动态元件的瞬态模型的形式取决于所用的数值积分算法。
(其实这就是把对应实际电路的非标准形式的微分方程组改为差分方程组并最终得到迭代方程)

第五节 微波电路噪声分析、敏感度分析、容差分析

（一）微波电路的噪声分析

微波电路的噪声分析属于小信号频域分析问题。写出微波电路的噪声等效 电路后，按照频域线性电路分析得到负载上的噪声电压/噪声电流即可。

半导体器件中的热噪声源、散弹噪声源和闪烁噪声源分别表示为：

热噪声电压源：由串联电阻 R_s 和均方根电压源 $\sqrt{v_n^2} = \sqrt{4kTBR_s}$ 表示，**是一种白噪声源。**B是需要考虑的热噪声带宽。热噪声功率为 $(\frac{\sqrt{v_n^2}}{2R_s})^2 \cdot R_s = kTB$

散弹噪声电流源：起源于半导体中载流子运动的随机性，它与电流有关，也**是一种白噪声**，可以用一个均方根噪声电流源 $\sqrt{i_{sh}^2} = \sqrt{2eI_D B}$ 和半导体结电阻 R_j 并联表示。

闪烁噪声功率源：与半导体制造工艺及表面处理情况有关。它的特点是其功率谱与频率成反比，即： $P(f) = \frac{B_x}{f}$ ， B_x 是一个常数，决定于半导体器件的工作电流及半导体性质，几乎与工作电流成正比。表示为一个有内阻的功率源。闪烁噪声只需在低频段考虑。

微波电路噪声系数及其计算：

一个微波电路，接收或发射信号质量的好坏不仅决定于信号的大小，还决定于噪声的强弱。在微波波段，噪声的主要来源是电路的内部噪声。为了描述线性系统内部噪声的影响，人们引入了噪声系数的概念。两种应用最广泛的噪声系数定义：

第一种定义：

设 P_{si}/P_{ni} 和 P_{so}/P_{no} 分别为输入端处于标准温度（290K）的线性二端口网络的输入端和输出端的信噪比，则噪声系数为

$$F = \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} = \frac{1}{G} \frac{P_{no}}{P_{ni}}$$

式中， P_{si}, P_{so} 分别表示输入端和输出端的信号资用功率； P_{ni}, P_{no} 分别表示输入端和输出端的噪声资用功率。该定义表征了网络内部噪声使信噪比变坏的程度。

第二种定义：

一个线性两端口网络，输入端接入和网络输入电阻相等的源电阻，并处于标准温度时，则网络实际输出的总噪声功率和仅由输入端电阻产生的输出噪声功率之比叫做网络的噪声系数，即

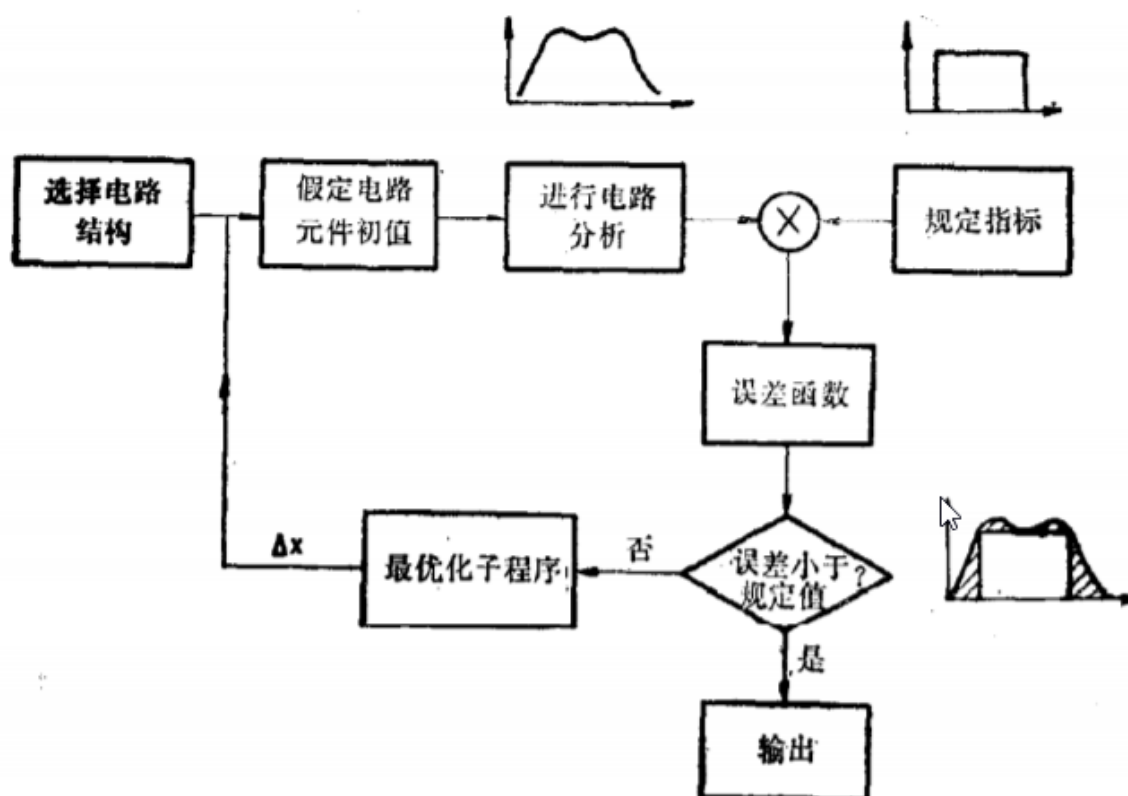
$$F = \frac{GP_{ni} + P_{n\alpha}}{GP_{ni}} = 1 + \frac{P_{n\alpha}}{GP_{ni}}$$

式中， G 是网络增益； GP_{ni} 是输入端电阻产生的输出噪声功率； $P_{n\alpha}$ 是网络内部噪声功率。

这里定义的噪声系数表征了实际网络输出的噪声功率与一个理想的无内部噪声的网络的输出噪声功率之比。

第六节 微波电路的最优化设计

所谓电路的最优化设计，是指设计一个电路，使其某些性能指标达到最好的结果或达到预定要求。例如，给定放大器的增益频响特性，要求用某种形式的电路，使它具有这种特性。若电路的元件参数为 x_1, x_2, \dots, x_n ，则电路的增益特性是 $G(\omega) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，这些参数的函数，可表示为 $G(\omega)$ 。最优化设计就是要确定这 n 个电路元件参数，使函数 $G(\omega)$ 在规定的频率区间逼近预定的频响特性 $G_d(\omega)$ 。



第七节 使用ADS进行滤波器和微带低噪声放大器设计

见个人与使用作业