



东南大学 毫米波国家重点实验室
State Key Laboratory of Millimeter Waves

综合课程设计

— 微波电路与系统

赵洪新 于志强

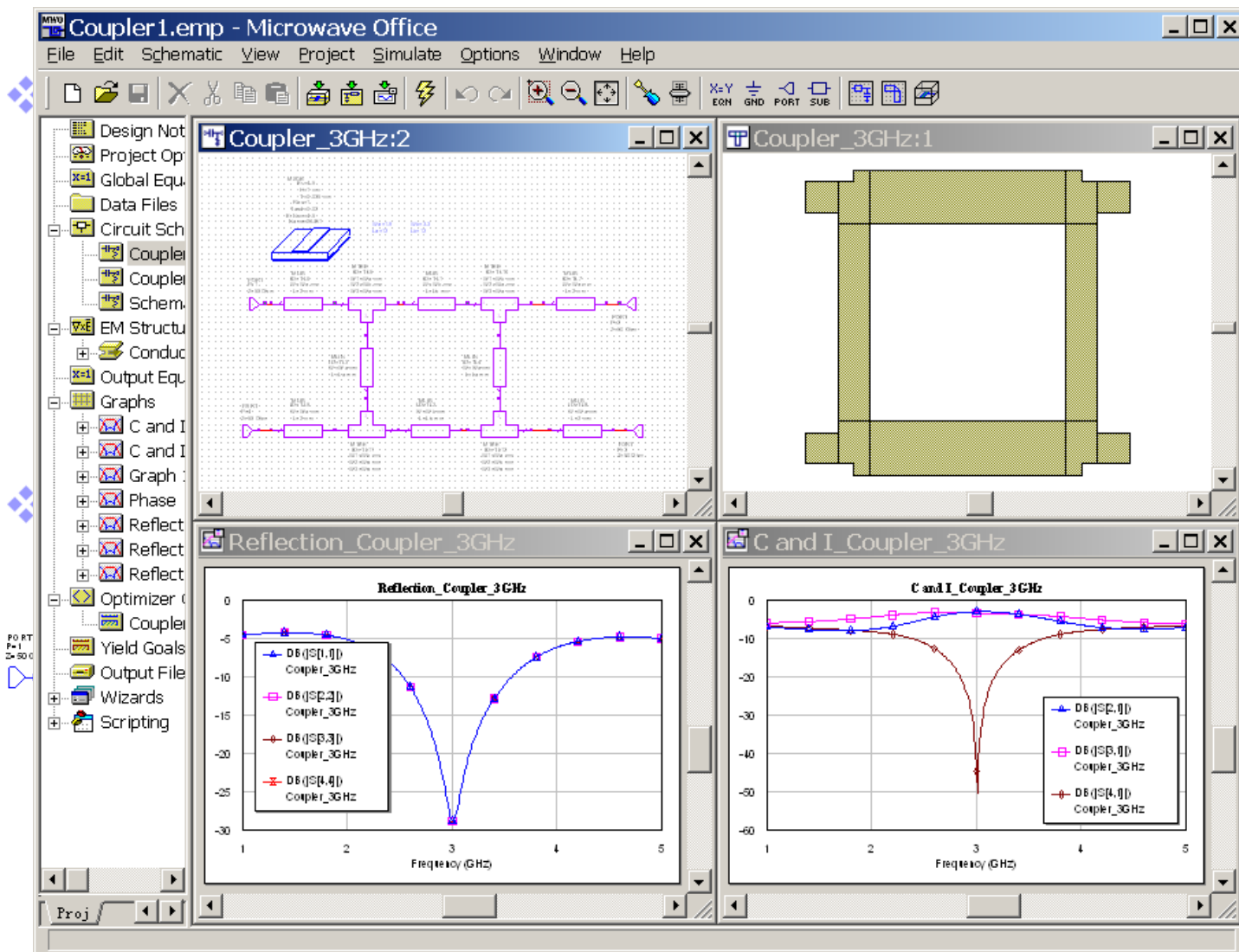
◆ Email: 101010740@seu.edu.cn
zqyu@seu.edu.cn

2022年9月6日

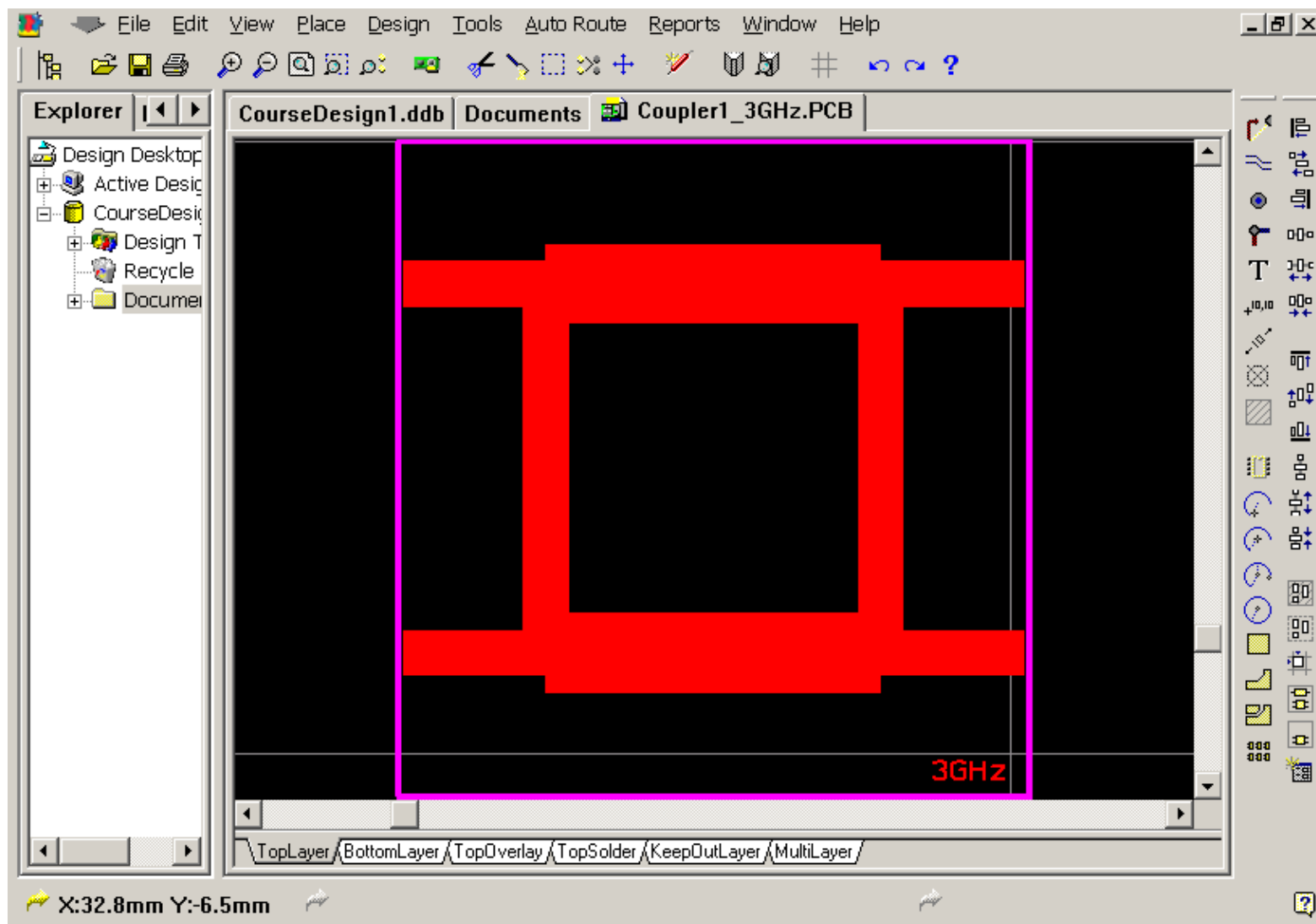


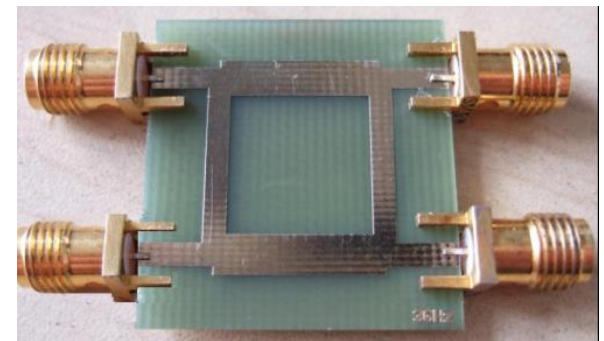
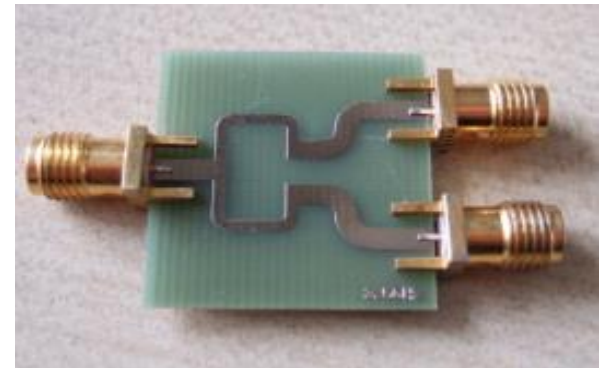
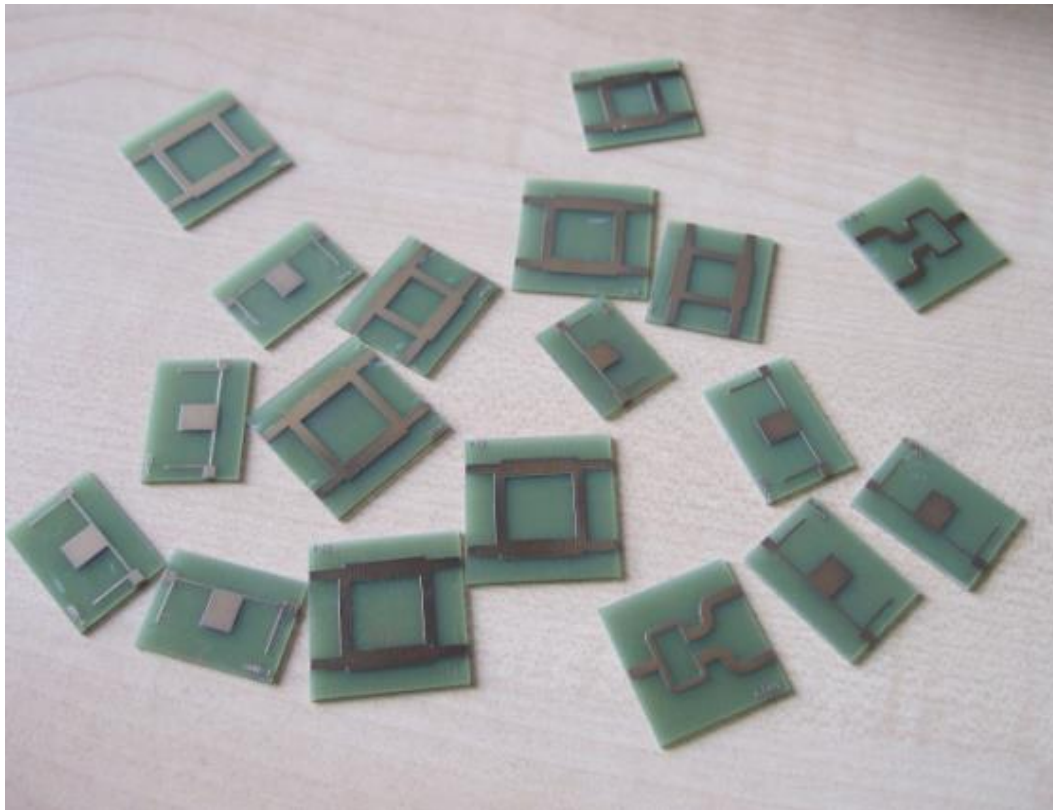
课程目的:

- 掌握传输线的基本知识;
- 掌握基本的微波网络知识;
- 掌握微波电路设计的基本原理和方法;
- 掌握EDA软件Microwave office, Protel的使用;
- 实现4~5种微波器件的设计、仿真、制版以及测试的全过程;
- 了解一个完整的微波系统的组成与其各项指标的测试。

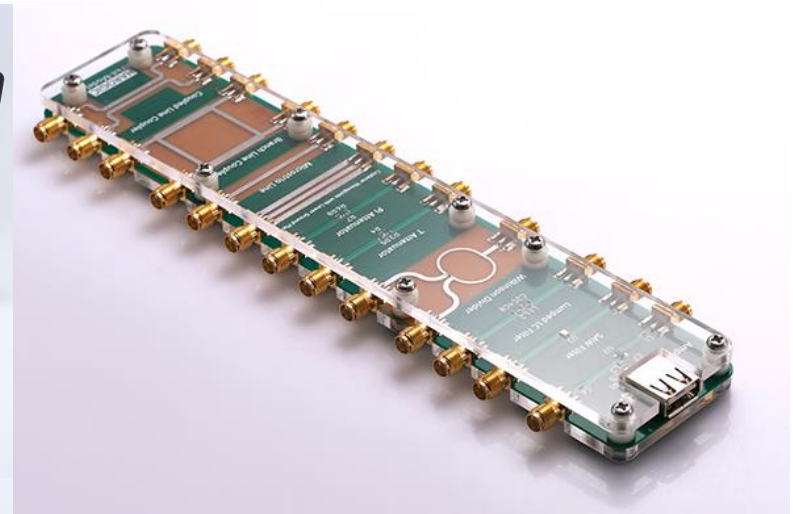
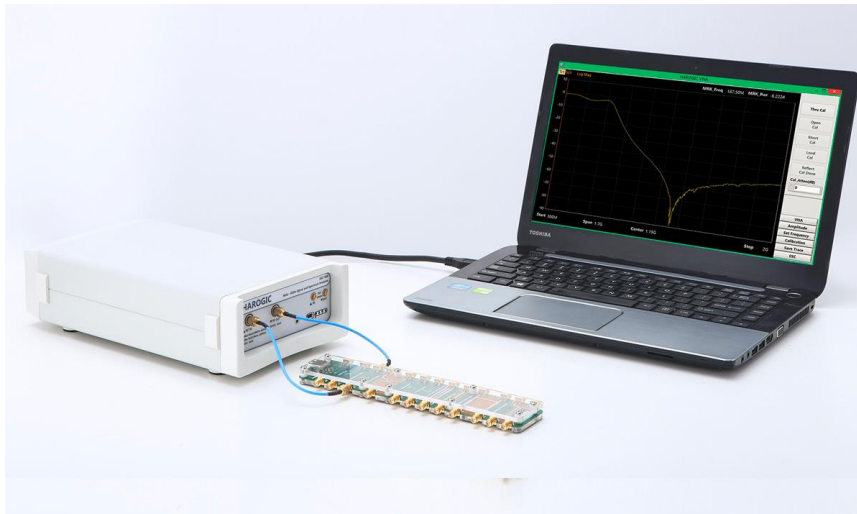


器



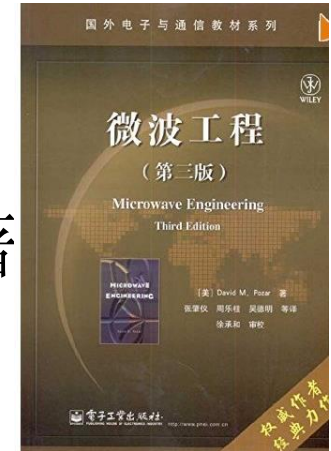


- 基于HAROGIC（海得逻辑）公司的实验平台，熟悉微波测量仪器设备的使用，如信号源、频谱分析仪、网络分析仪等。

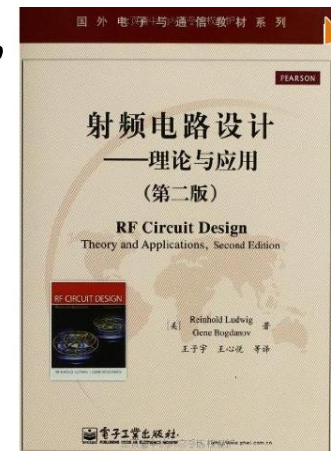


参考书目：

◆微波工程（第三版），David M. Pozar著
电子工业出版社



◆射频电路设计-理论与应用（第二版），
Reinhold Ludwig, Pavel Bretchko著，
电子工业出版社





课程安排:

- 理论课:第1, 2周

地点:教二 412 时间:周二下午6-7节

- **实验课: 第3周至第16周**

时间:周二下午6-7节

地点:图书馆东侧2楼实验中心 (实验室二)

考核方法:

平时上机成绩 (50%) + 课程设计报告 (50%)



- 一、概述
- 二、传输线理论



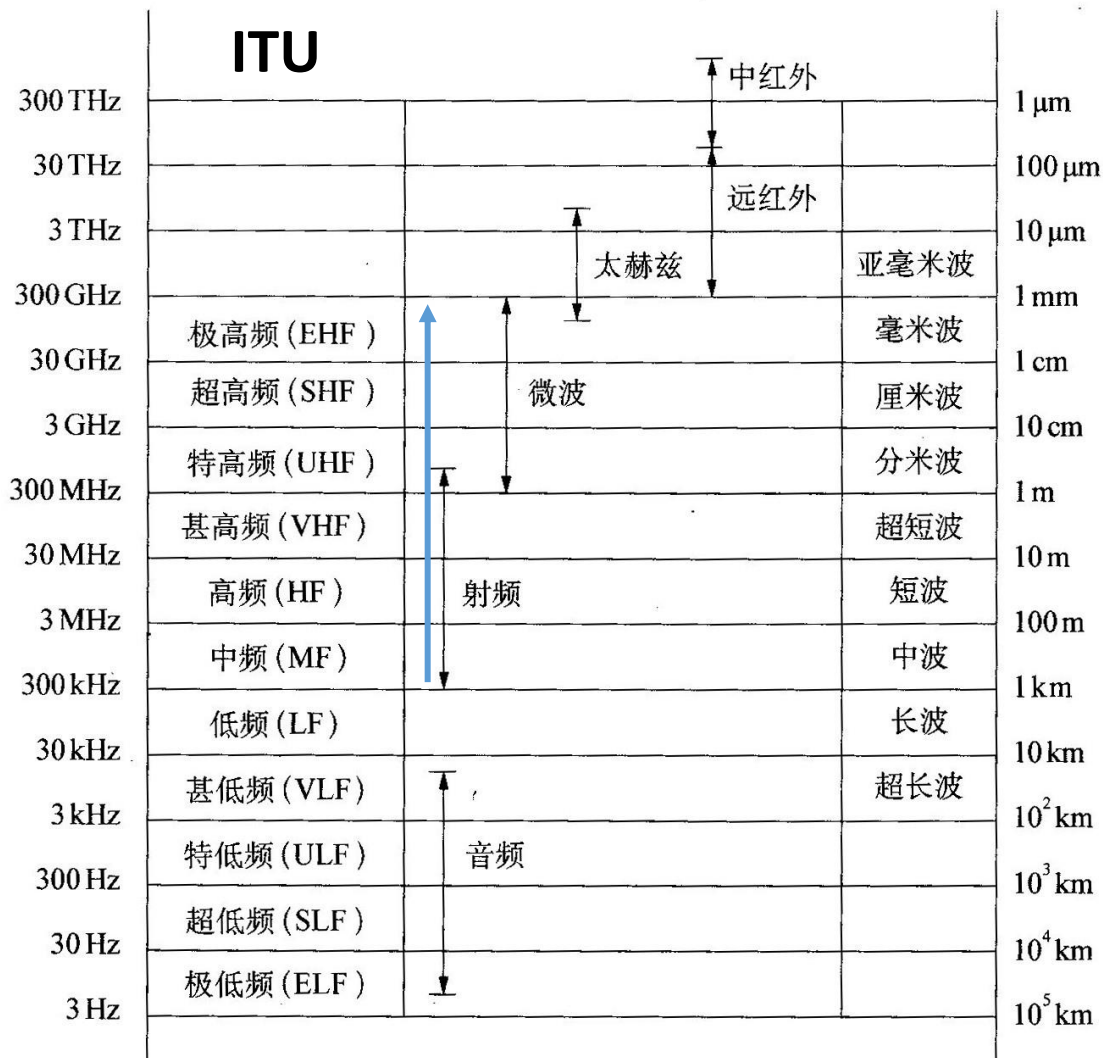
一、概 述

“微波”的定义



$$c = \lambda \cdot f$$

微波是指频率在300MHz~300GHz、对应的电波长在 $\lambda=1\text{m}$ 和 $\lambda=1\text{mm}$ 之间的电磁波。波长在毫米量级的信号，称为毫米波(30GHz~300GHz)；波长在亚毫米量级的，称为亚毫米波(300GHz~3000GHz)。



“微波”的定义



IEEE雷达频段

Band designation	Frequency range
HF	3 to 30 MHz
VHF	30 to 300 MHz
UHF	300 to 1000 MHz
L	1 to 2 GHz
S	2 to 4 GHz
C	4 to 8 GHz
X	8 to 12 GHz
Ku	12 to 18 GHz
K	18 to 27 GHz
Ka	27 to 40 GHz
V	40 to 75 GHz
W	75 to 110 GHz
mm	110 to 300 GHz ^[note 1]

波导频段

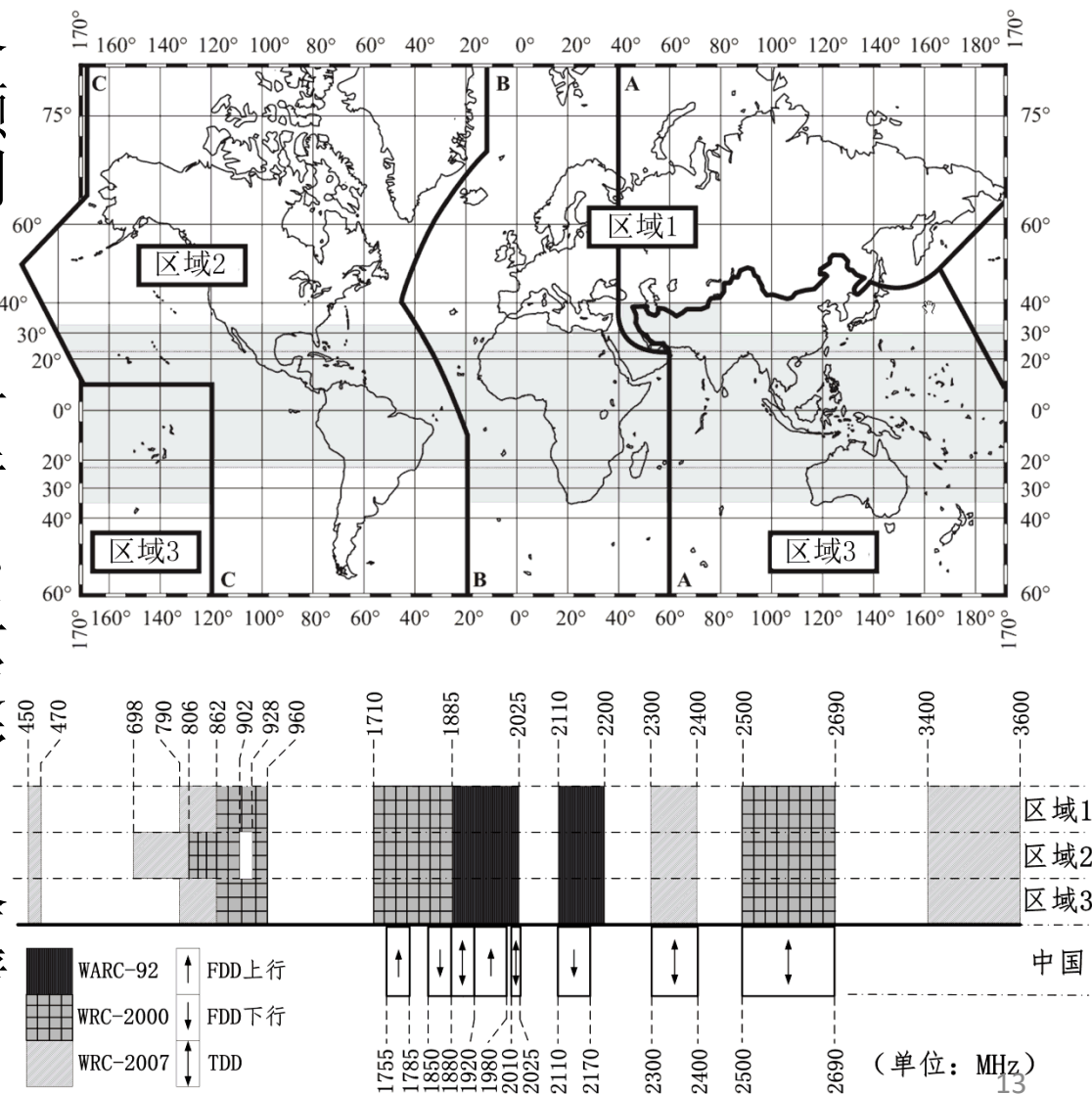
Band	Frequency range ^[8]
R band	1.70 to 2.60 GHz
D band	2.20 to 3.30 GHz
S band	2.60 to 3.95 GHz
E band	3.30 to 4.90 GHz
G band	3.95 to 5.85 GHz
F band	4.90 to 7.05 GHz
C band	5.85 to 8.20 GHz
H band	7.05 to 10.10 GHz
X band	8.2 to 12.4 GHz
Ku band	12.4 to 18.0 GHz
K band	15.0 to 26.5 GHz
Ka band	26.5 to 40.0 GHz
Q band	33 to 50 GHz
U band	40 to 60 GHz
V band	50 to 75 GHz
W band	75 to 110 GHz
F band	90 to 140 GHz
D band	110 to 170 GHz
Y band	325 to 500 GHz



为了防止无线电设备间的干扰，需要对频谱资源进行合理的划分和管理(3THz以下)。

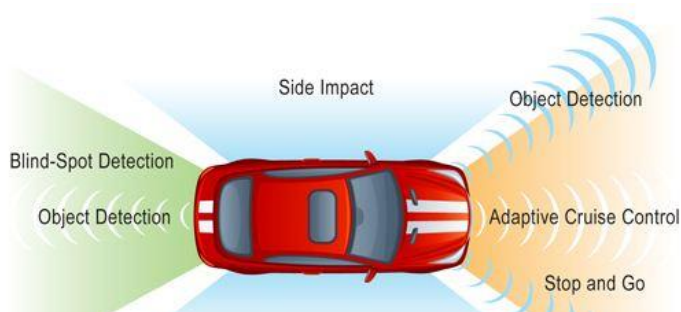
国际电信联盟（ITU）负责在全球范围内对无线电频谱资源进行分配与管理。各成员国在ITU规定的基础上结合本国的情况制定自己的无线电频谱管理规范。

每次世界无线电大会（WRC）都会对频谱管理规范进行修订。



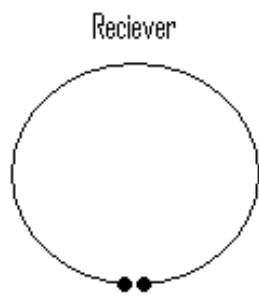
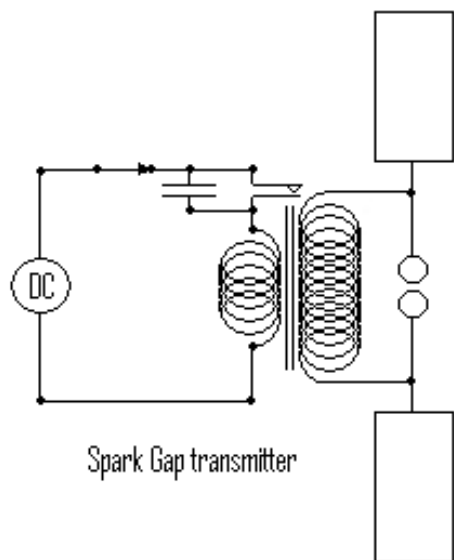
“微波”的应用

东南大学 毫米波国家重点实验室
State Key Laboratory of Millimeter Waves

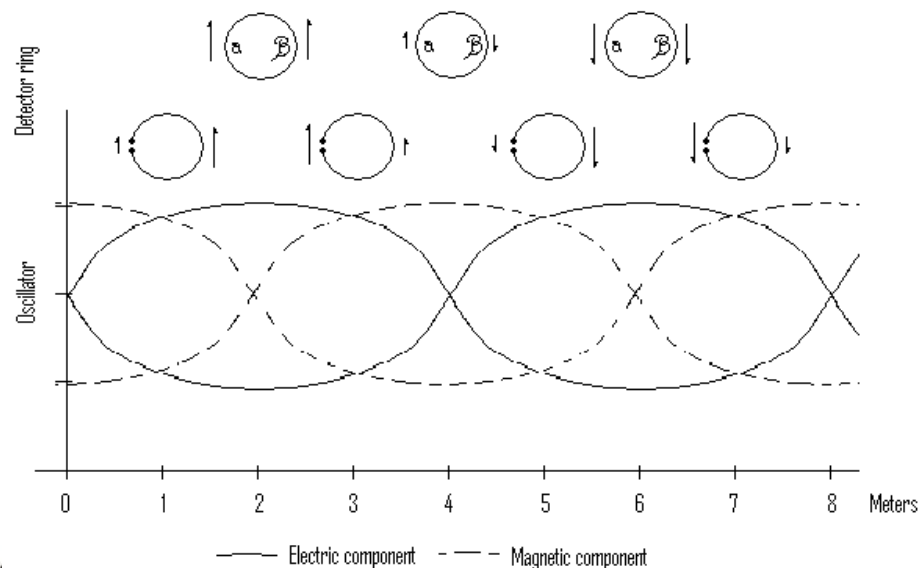


- 微波电路、系统广泛地应用于各种商业和军事领域。主要包括：通信、雷达、导航、遥感、射频识别、广播、传感器、空间探测等方面。

1864年，Maxwell在英国皇家学会宣读了题为《电磁场的动力学理论》的论文，预言了电磁波的存在。
1887年，Hertz著名的电火花实验证实了自由空间中



Transverse free space electromagnetic wave



James Clerk Maxwell

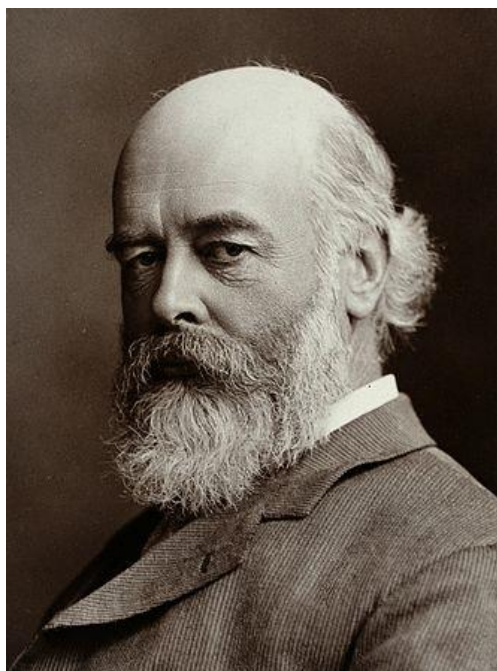
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$



Heinrich Hertz¹⁵

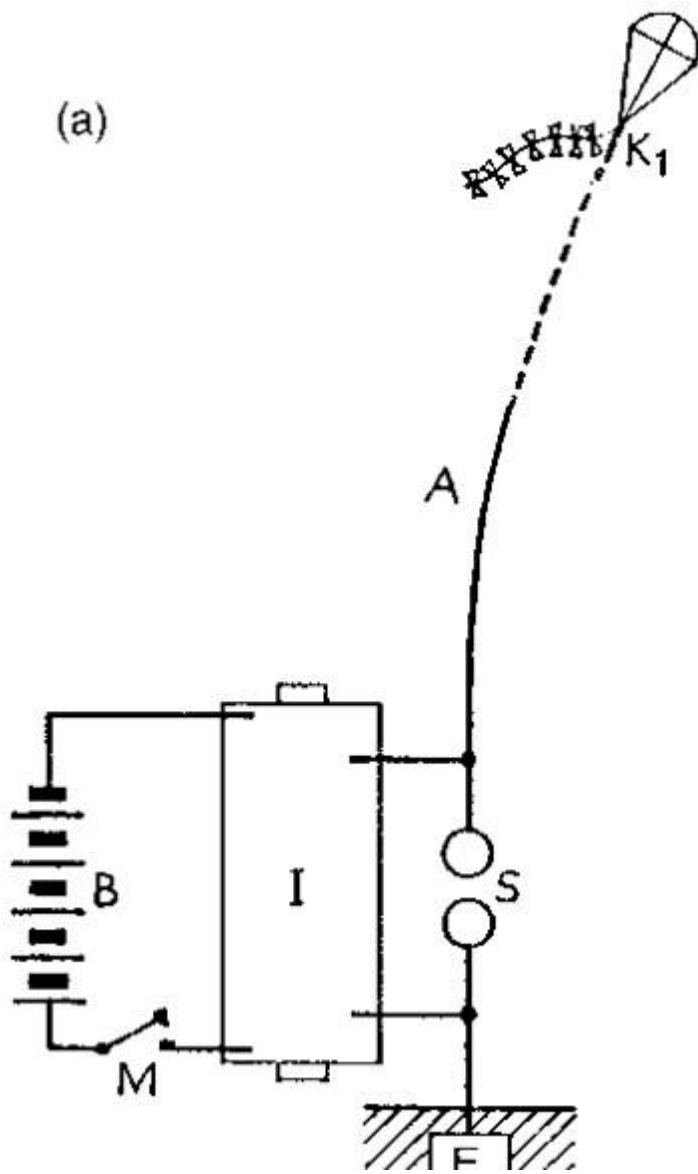


1894年，Lodge在英国皇家学会上总结、介绍了Hertz的成果，详细介绍了Coherer（粉末检波器）的制作方法。同年在牛津大学演示了世界上第一个无线电报实验。



Oliver Lodge





实验室里发现了提高无线传输距离的方法，得到了英国军方和邮政总局的极力支持，在商业上取得了巨大的成功。

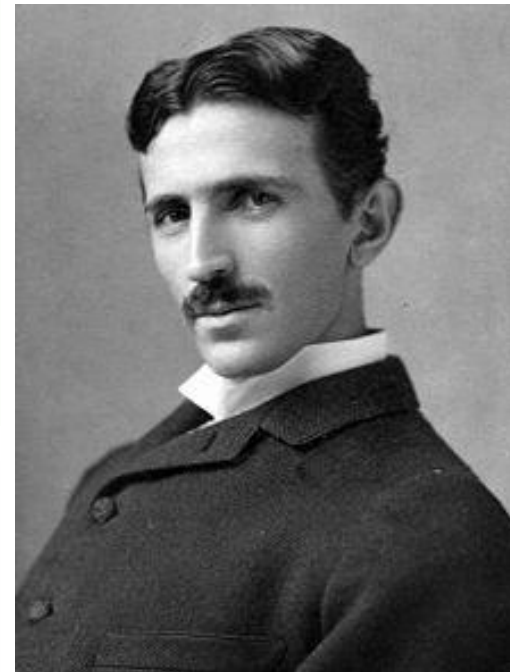


Guglielmo Marconi 17

受到Lodge论文的启发，Bose 1894年进行了60GHz毫米波频段的收发实验。Tesla也声称是他最早发明了无线收发技术，并跟Marconi和Lodge打了很长时间的专利官司。

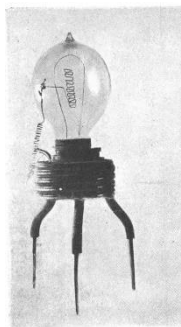
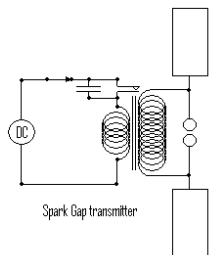


Jagadish Bose

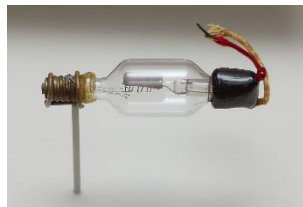


Nikola Tesla

真空二极管



真空三极管



磁控管



速调管

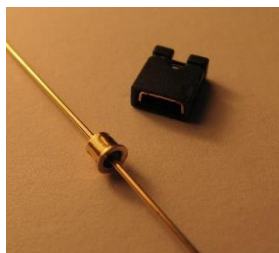


行波管



20世纪70年代前电真空器件是主要的信号产生和放大器件，现在仍有应用。80年代后固态（solid state）电路逐渐成为主流。

IMPATT二极管



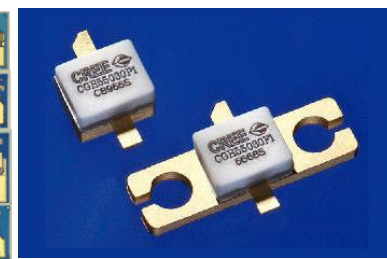
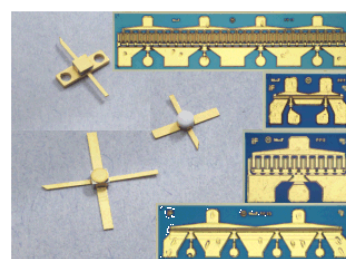
隧道二极管



Gunn二极管



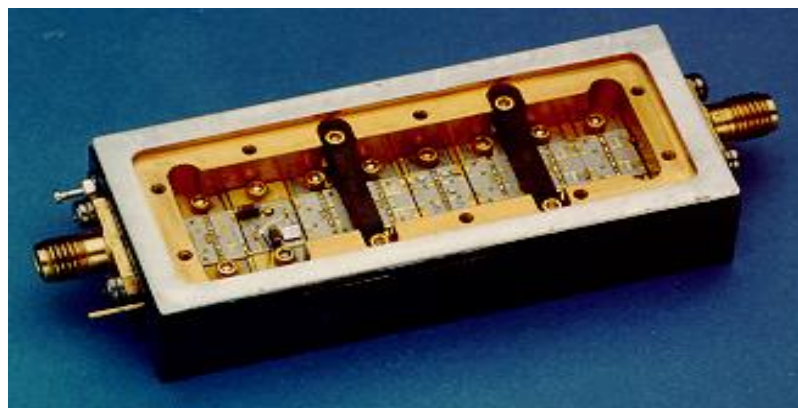
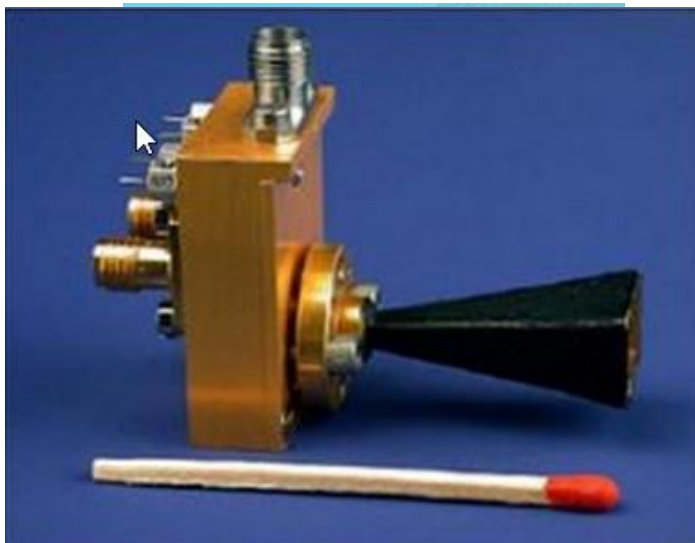
GaAs器件



SiC, SiGe, GaN器件



- 第一代形成体系的微波电路，产生于**19**世纪末，发展于**20**世纪**40**年代。主要是以波导为基础的立体电路。
- 第二代微波电路，始于**20**世纪**60**年代，以微带线、集总元件、固态电路等为基础构成平面微波混合集成电路(Microwave Integrated Circuit, MIC)。



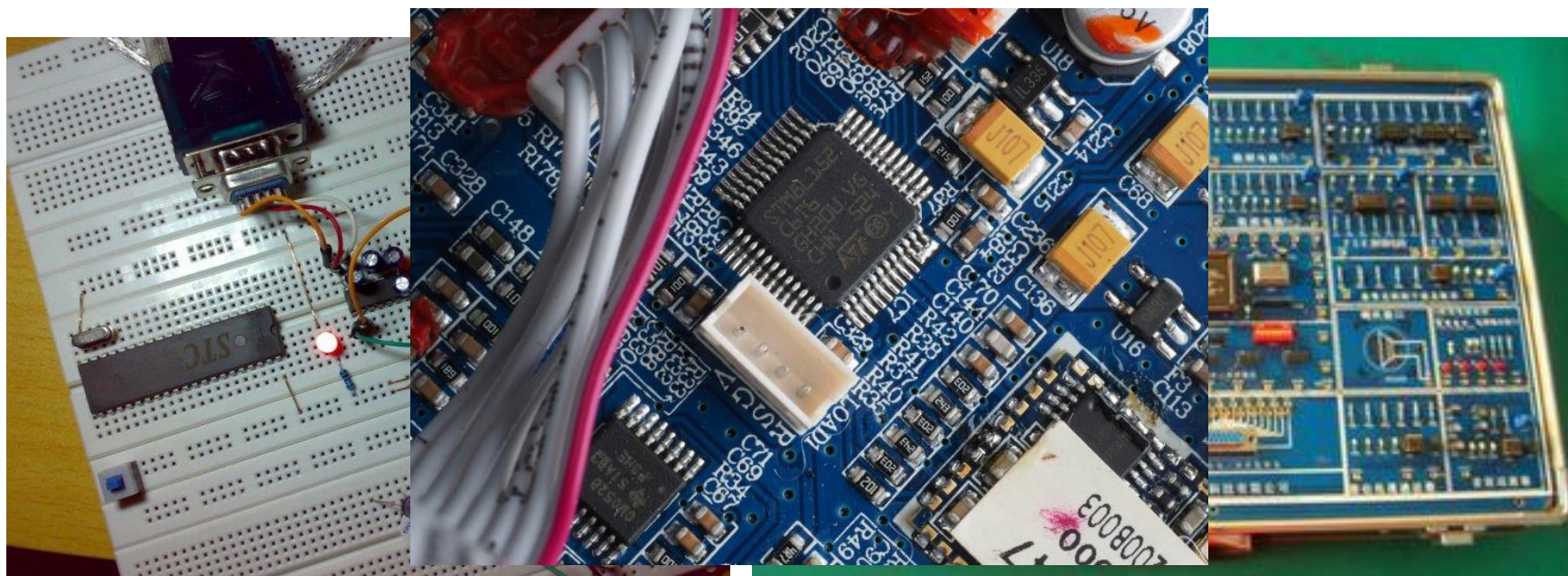


- 第三代微波电路，出现于70年代后期，基于半导体材料（如GaAs、Si等）制作有源器件、无源器件、传输结构，构成具有完整功能的微波单片集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)。
- 目前的趋势：
 - ▣ 片上系统（System on Chip, SoC）
使用半导体工艺，将数字电路、模拟电路、微机械结构、光学器件与微波收发信机集成到同一块芯片上。
 - ▣ 封装系统（System on Package, SoP）
采用多芯片组装工艺，将各种器件集成在同一个封装里。



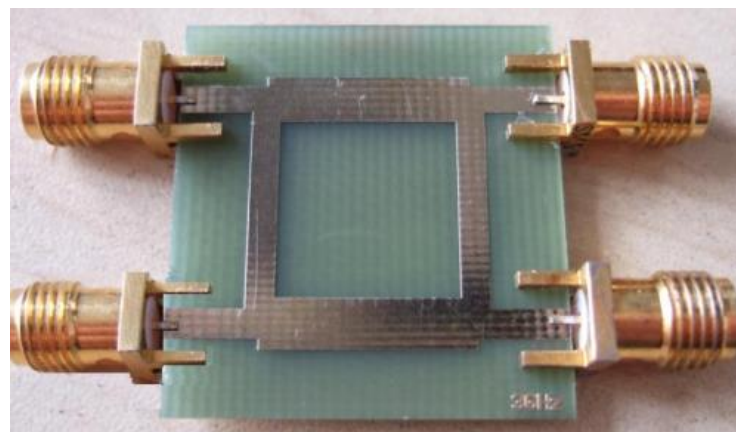
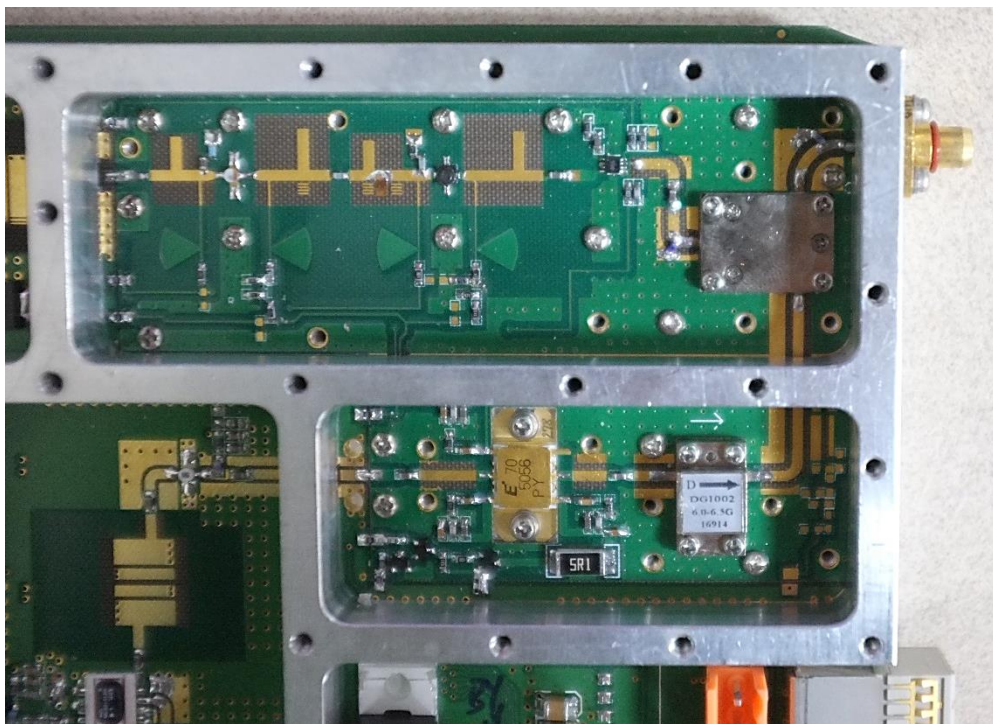
二、传输线理论

- 典型的低频数字电路



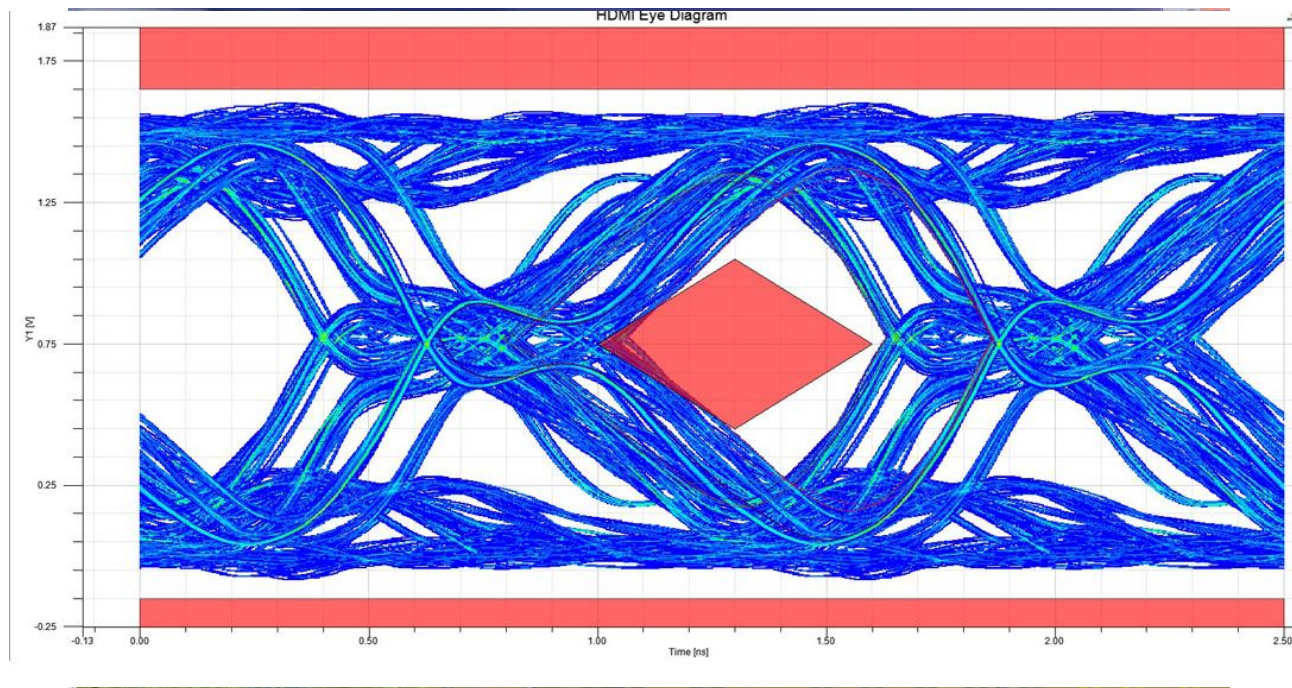
以芯片和元件为核心，电路功能由芯片和元件实现，走线起信号连接的作用。

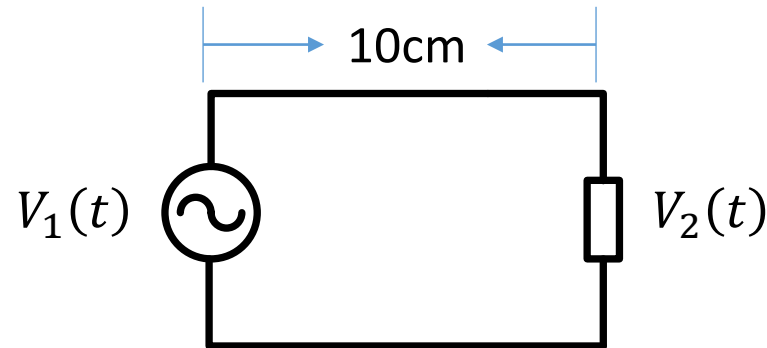
- 典型的微波平面电路



简单的金属“走线”，可以实现重要的功能，地位与芯片相当。

目前数字电路中高速串行总线的速率不断攀升，例如 SATA3.2 达到16Gbps，“走线”又变成了电路的主角之一，许多软件的唯一目的就是分析走线的信号完整性。





$$V_1(t) = V_2(t) \quad ?$$

$$f = 50\text{Hz} \quad \lambda = 6000\text{km} \quad l = 1.67 \times 10^{-8}\lambda \quad V_1(t) = V_2(t)$$

$$f = 300\text{MHz} \quad \lambda = 1\text{m} \quad l = 0.1\lambda \quad V_1(t) \approx V_2(t)$$

$$f = 750\text{MHz} \quad \lambda = 40\text{cm} \quad l = 0.25\lambda \quad V_1(t) \neq V_2(t)$$

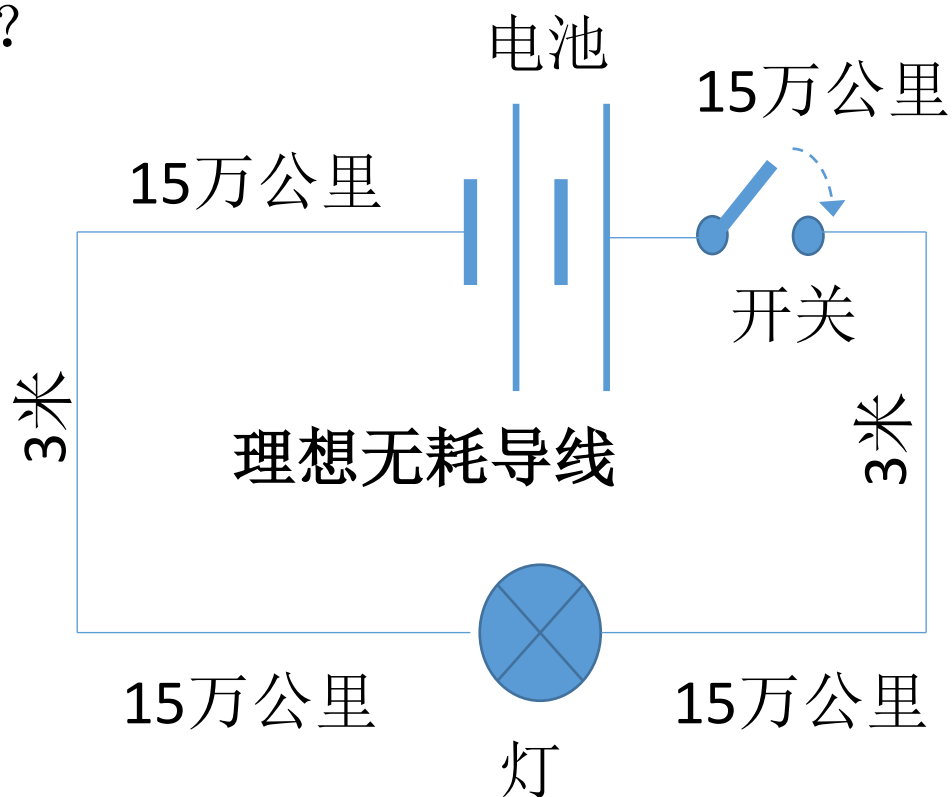
当电路尺寸 $l < 0.1\lambda$ 时，基尔霍夫定律适用，否则必须应用传输线理论。

问题

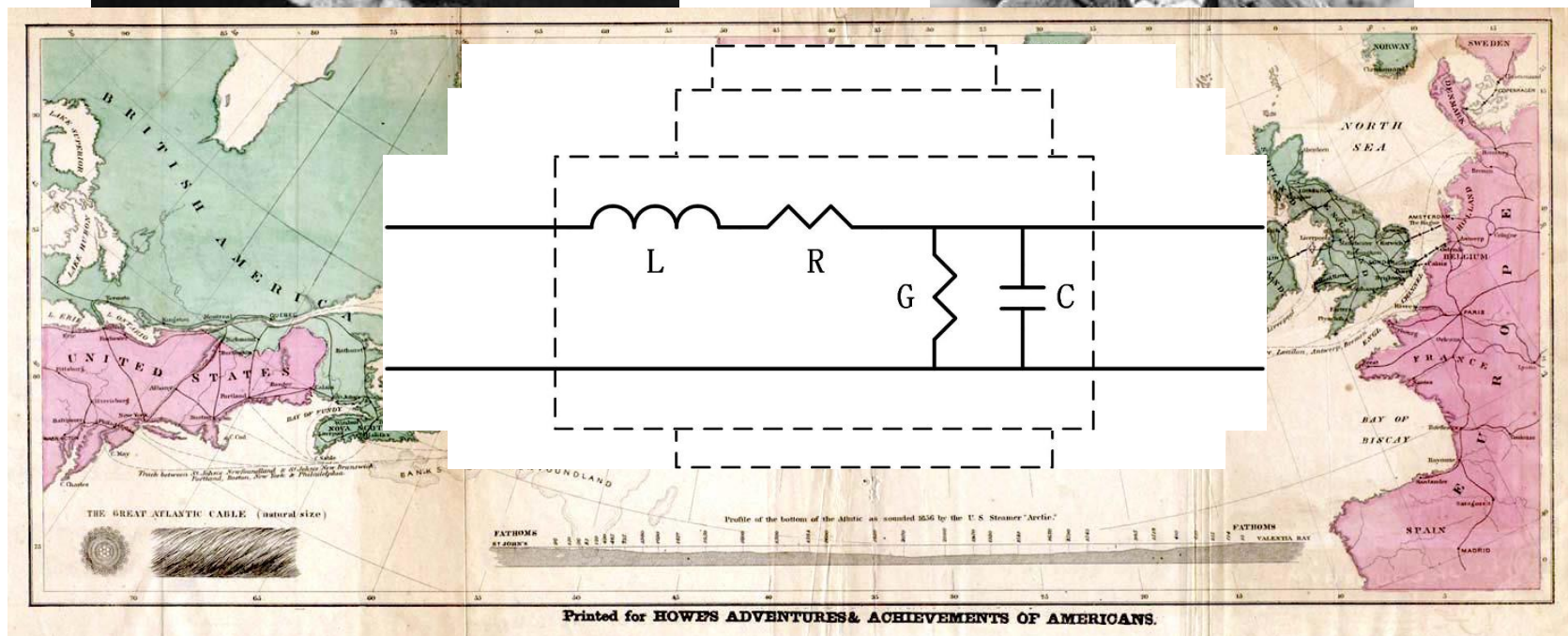
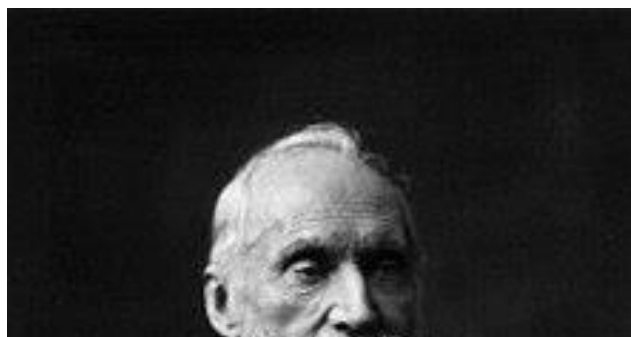


开关闭合时刻为零时刻，
则自开关闭合时刻起算，
灯在什么时刻亮起？

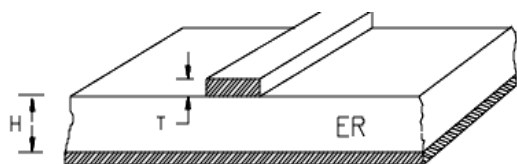
1. 约0.5秒
2. 约1.0秒
3. 约10纳秒
4. 约20纳秒



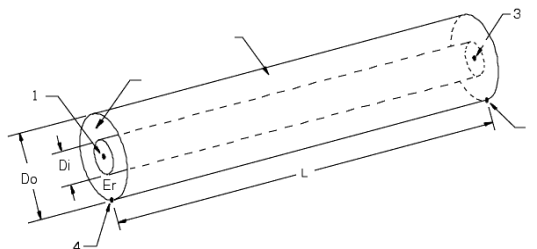
传输线理论的开拓者



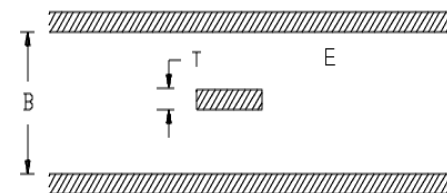
● 常见的传输线



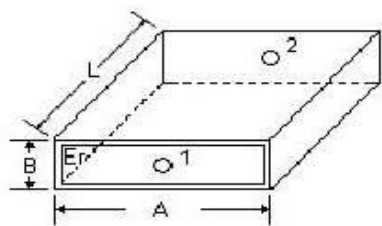
微带线



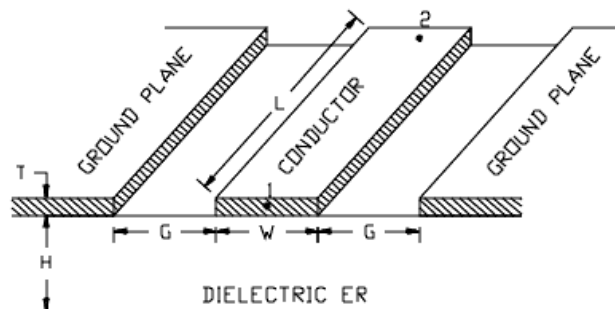
同轴线



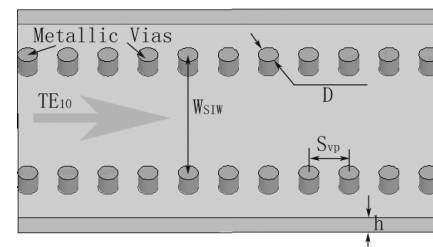
带状线



金属波导



共面波导

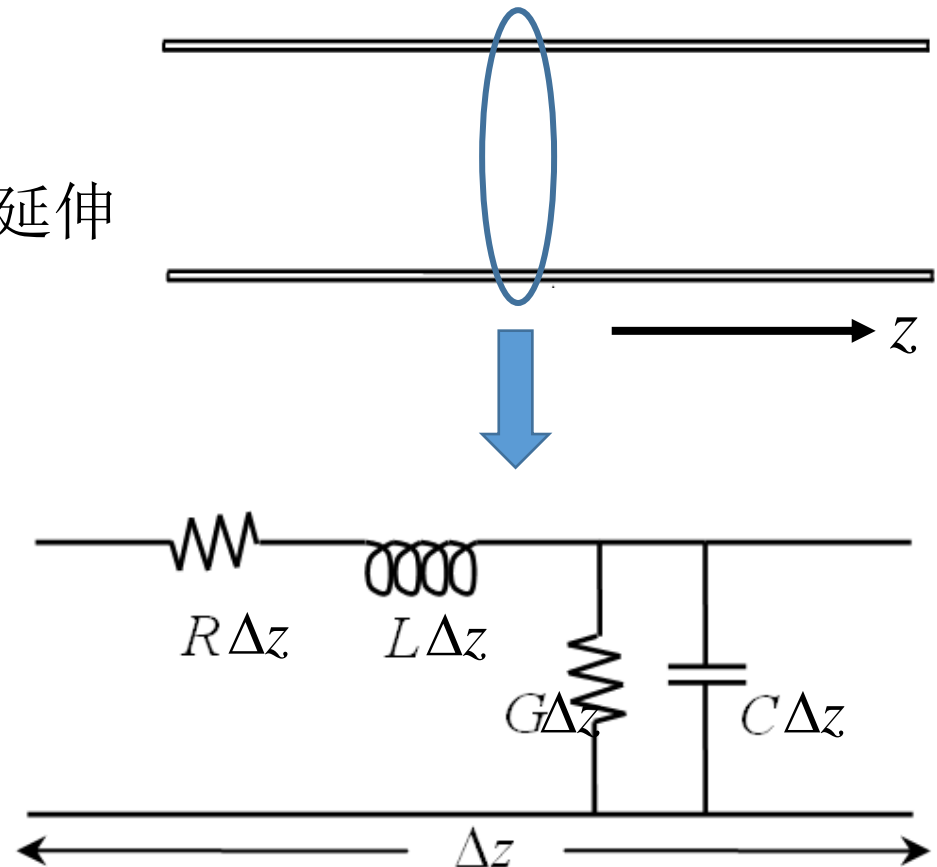


基片集成波导

● 传输线等效电路模型

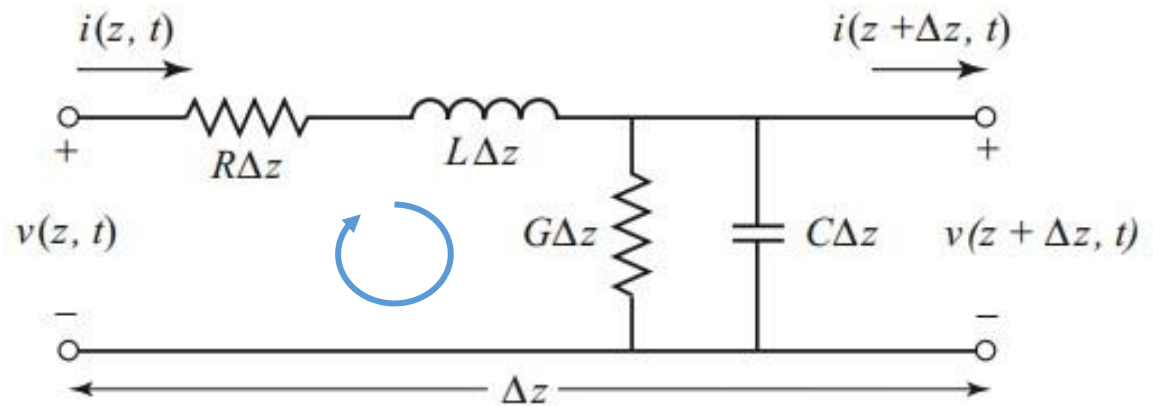
z 向均匀
 z 向无限延伸

R: 单位长度的串联电阻
L: 单位长度的自感
G: 单位长度的并联电导
C: 单位长度的并联电容



传输线电报方程

用 $v(z, t), i(z, t)$ 表示
沿 z 向传播的电压和
电流，对单元电路采用
基尔霍夫定律

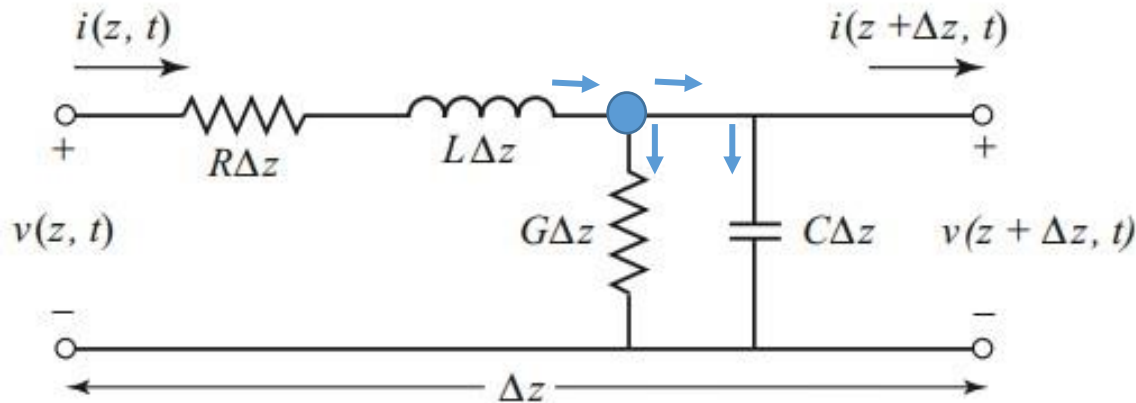


根据环路电压定律有

$$i(z, t) \cdot R\Delta z + \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \cdot L\Delta z + v(z + \Delta z, t) - v(z, t) = 0$$

$$\Rightarrow \frac{v(z + \Delta z, t) - v(z, t)}{\Delta z} = -i(z, t) \cdot R - \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \cdot L$$

$$\text{令 } \Delta z \Rightarrow 0 \Rightarrow \frac{\partial v(z, t)}{\partial z} = -i(z, t) \cdot R - \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \cdot L \quad (1)$$



根据节点电流定律有

$$i(z, t) - i(z + \Delta z, t) - v(z + \Delta z, t) \cdot G\Delta z - \frac{\partial v(z + \Delta z, t)}{\partial t} \cdot C\Delta z = 0$$

$$\Rightarrow \frac{i(z + \Delta z, t) - i(z, t)}{\Delta z} = -v(z + \Delta z, t) \cdot G - \frac{\partial v(z + \Delta z, t)}{\partial t} \cdot C$$

$$\Delta z \Rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial i(z, t)}{\partial z} = -v(z, t) \cdot G - \frac{\partial v(z, t)}{\partial t} \cdot C \quad (2)$$



传输线方程的时域形式

$$\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = -i(z,t) \cdot R - \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} \cdot L \quad (1)$$

$$\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = -v(z,t) \cdot G - \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} \cdot C \quad (2)$$

采用相量表示，即

$$v(z,t) = \text{Re}\{V(z) \cdot e^{j\omega t}\}, \quad i(z,t) = \text{Re}\{I(z) \cdot e^{j\omega t}\}$$

$V(z), I(z)$ 为相量 \longrightarrow

$$\begin{aligned} \frac{dV(z)}{dz} &= -(R + j\omega L) \cdot I(z) \\ \frac{dI(z)}{dz} &= -(G + j\omega C) \cdot V(z) \end{aligned}$$



传输线的波动方程

$$\frac{d^2 V(z)}{dz^2} - \gamma^2 V(z) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} - \gamma^2 I(z) = 0 \quad (4)$$

复传播常数 $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta$

$$V(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z}$$

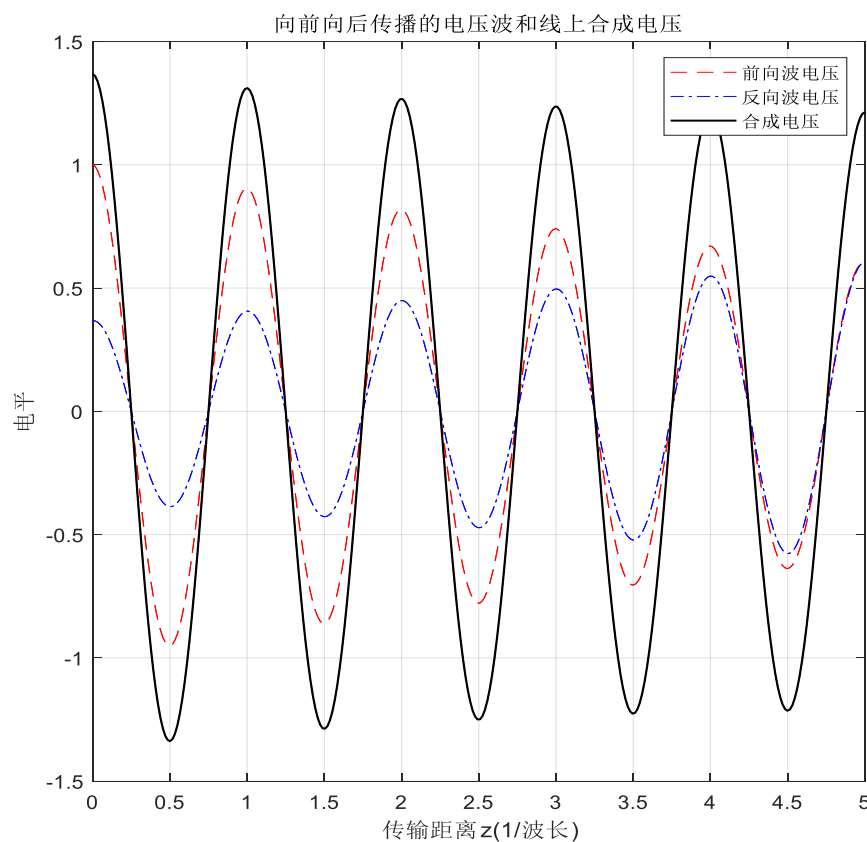
$$I(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z}$$

+Z方向传播的电压波: $V_0^+ e^{-\gamma z} = V_0^+ e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}$

其时域表达式: $v^+(z, t) = |V_0^+| \cos(\omega t - \beta z + \phi_0^+) e^{-\alpha z}$

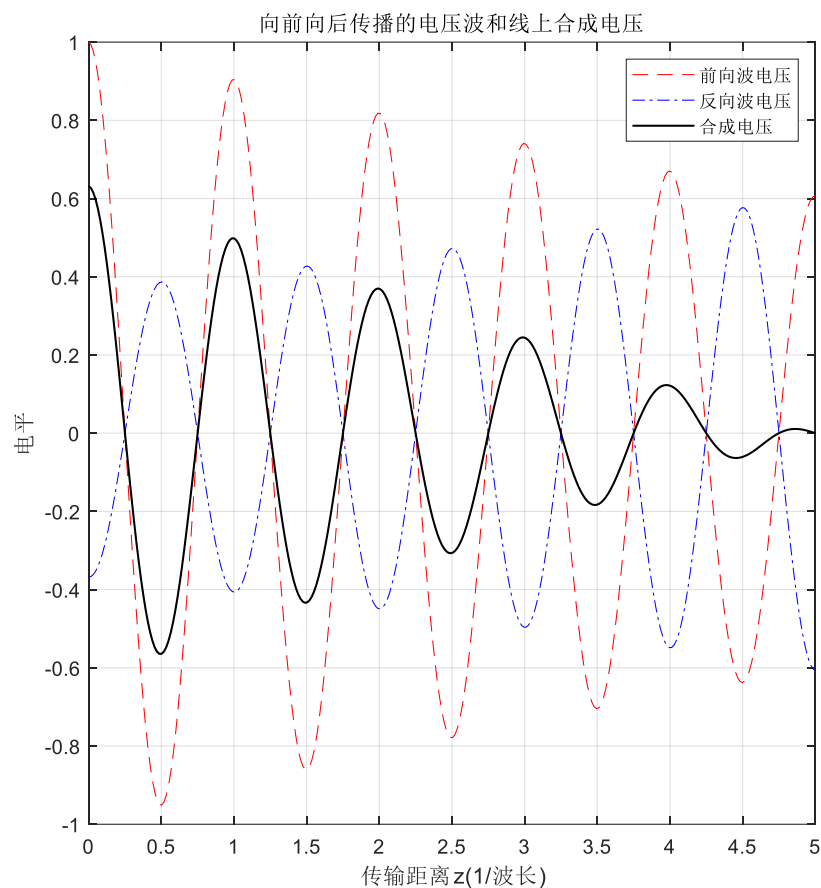


终端负载开路的传输线上的前向-反向波电压分布





终端负载短路的传输线上的前向-反向波电压分布





波的传播特性

$$v^+(z, t) = |V_0^+| \cos(\omega t - \beta z + \phi_0^+) e^{-\alpha z} \quad \text{忽略衰减项}$$

波长 在 t_0 时刻 $\omega t_0 - \beta z_2 = \omega t_0 - \beta z_1 \pm 2\pi$

$$\beta(z_1 - z_2) = \beta\lambda = \pm 2\pi$$

$$\longrightarrow \lambda = \frac{2\pi}{\beta}$$

相速 假设 $\omega t_0 - \beta z_1 = \phi$
经过 Δt 时间，等相位点移动了 Δz

$$\omega(t_0 + \Delta t) - \beta(z_1 + \Delta z) = \phi$$

$$\longrightarrow \frac{\Delta z}{\Delta t} = v_p = \frac{\omega}{\beta}$$



传输线的特征阻抗

根据 $\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I(z)$ 和 $V(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z}$

$$\rightarrow I(z) = \frac{\gamma}{R + j\omega L} (V_0^+ e^{-\gamma z} - V_0^- e^{\gamma z})$$

定义特征阻抗 $Z_0 = \frac{R + j\omega L}{\gamma} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$

又根据 $I(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z}$

$$\rightarrow \frac{V_0^+}{I_0^+} = Z_0 = \frac{V_0^-}{I_0^-} \quad I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-\gamma z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{\gamma z}$$



- 描述传输线特性的参数

复传播常数 $\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$

波长 $\lambda = 2\pi / \beta$

相速 $v_p = \omega / \beta = \lambda f$

特性阻抗 $Z_0 = \frac{R + j\omega L}{\gamma} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$



- 无耗传输线参数 $R = 0, G = 0$

传播常数 $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = j\omega\sqrt{LC} = j\beta$

波长 $\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{LC}}$

$$\beta = \omega\sqrt{LC}$$

相速 $v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

特性阻抗 $Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$

在真空中：

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = 8.85418782 \times 10^{-10} (F / m)$$

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (H / m)$$

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = 120\pi \approx 377\Omega$$



●端接负载的无耗传输线

线上总电压：

$$V(z) = V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{j\beta z}$$

线上总电流：

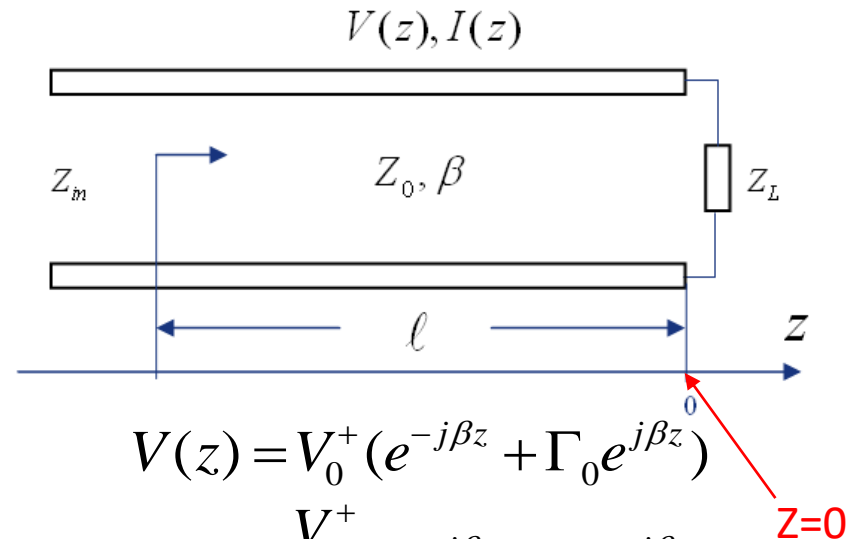
$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-j\beta z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{j\beta z}$$

设负载在 $z=0$ 处（在终端负载位置）：

$$Z_L = \frac{V(0)}{I(0)} = \frac{V_0^+ + V_0^-}{V_0^+ - V_0^-} Z_0$$

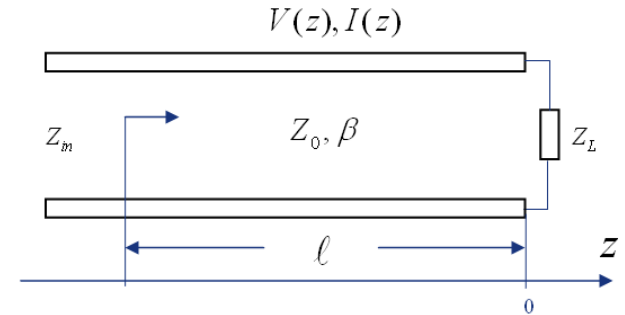
定义电压反射系数：

$$\Gamma_0 = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$



传输线上传输的功率

$$P_{av} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [V(z) I(z)^*] = \frac{1}{2} \frac{|V_0^+|^2}{Z_0} (1 - |\Gamma_0|^2)$$



入射功率: $\frac{1}{2} \frac{|V_0^+|^2}{Z_0}$

反射功率: $\frac{1}{2} \frac{|V_0^+|^2}{Z_0} |\Gamma_0|^2$

传输线 $z = -l$ 处:

无反射功率
(匹配):

$$\Gamma_0 = 0$$

$$Z_0 = Z_L$$

$$V(-l) = V_0^+ (e^{j\beta l} + \Gamma_0 e^{-j\beta l})$$

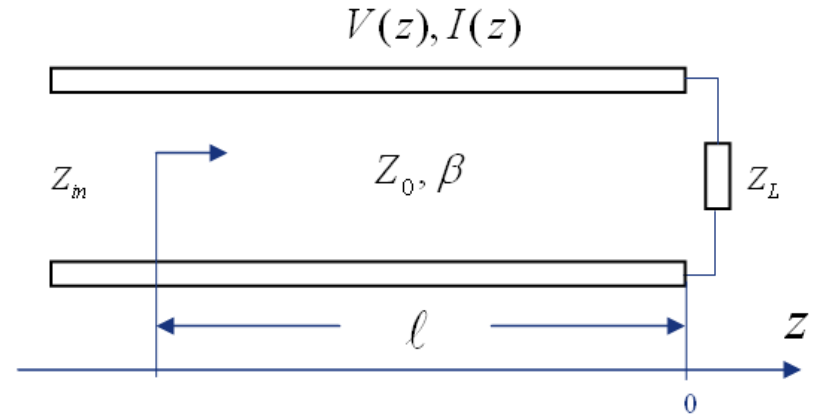
$$I(-l) = \frac{V_0^+}{Z_0} (e^{j\beta l} - \Gamma_0 e^{-j\beta l})$$



$$Z_{in} = \frac{V(-l)}{I(-l)} = \frac{1 + \Gamma_0 e^{-2j\beta l}}{1 - \Gamma_0 e^{-2j\beta l}} Z_0$$

由 $\Gamma_0 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$ 可以得到:

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l}$$



传输线阻抗方程

$\beta l \rightarrow$ 电长度

45度: 八分之一波长

90度: 四分之一波长

180度: 二分之一波长

终端短路

$$Z_{in} = jZ_0$$

终端开路

$$Z_{in} = -jZ_0$$

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2}{Z_L}$$

$$Z_{in} = \infty$$

$$Z_{in} = 0$$

$$Z_{in} = Z_L = 0$$