



Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC

高等电磁场理论

2020年秋季

物理学院 计算电磁学及其应用团队

梁锋 副教授

fengliang@uestc.edu.cn



任课教师联系方式

Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC

梁锋 副教授（主讲教师）

办公室：清水河校区4号科研楼C栋444

E-mail: fengliang@uestc.edu.cn

主页： staff.uestc.edu.cn/liangfeng

王瑀 硕士生（课程助教，作业批阅）

办公室：清水河校区4号科研楼C栋444

E-mail: wang.yu@nexuslink.cn

课程基本信息



Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC

1. 学时及教学形式：50学时课堂教学

2. 教材及参考书：

教材：Roger F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, IEEE Press, 2001.

参考书：

(1) 《高等电磁场理论》（第二版），Jian-Ming Jin著，尹家贤译，电子工业出版社，2017（英文版：Jian-Ming Jin, *Theory and Computation of Electromagnetic Fields*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2015）

(2) 杨儒贵，高等电磁理论，高等教育出版社，2008

3. 考核方式：平时成绩（课外作业**20%**，随堂测试2次共**10%**，课程设计报告**10%**）期末考试（按惯例开卷）占**60%**

教学目标



Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC

先修课程：电磁场与电磁波（或电动力学）、数学物理方程及特殊函数

教学目标：

掌握以Maxwell方程组为基础的电磁场理论及解析计算方法，熟悉典型的电磁波辐射、传播、散射问题的求解。

教学内容



Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC

教学内容:

第1章：基本电磁理论（6学时）

矢量分析、正弦电磁场及其表示、**Maxwell**方程（含本构关系、边界条件）、**Helmholtz**方程、电磁场方程基本求解方法

第2章：平面波简述（6学时）

波动方程、平面波的极化、波的本征常数、损耗介质中的平面波、平面波的反射、矩形波导概述、矩形谐振腔概述、自由空间辐射问题概述

教学内容



Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC

第3章：电磁定理和原理（10学时）

对偶原理、唯一性定理、镜像原理、等效原理、感应定理、互易定理、惠更斯原理、巴比涅原理

第4章：平面波函数（8学时）

波函数及平面波、矩形波导、矩形谐振腔、场的模式展开、矩形波导的激励、口径辐射场的求解

教学内容



Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC

第5章：柱面波函数（10学时）

波函数及柱面波、圆柱波导、径向波导、圆柱谐振腔、柱面波的源、二维源的辐射、波函数的变换、圆柱体的散射、线源辐射、圆柱体上口径辐射

第6章：球面波函数（10学时）

波函数及球面波、球形谐振腔、特殊函数正交关系、球面波的源、波函数的变换、导电球对平面波的散射、导电球对球面波的散射、导体球表面缝隙辐射



Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC

绪论



电磁场理论的发展史

Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC

第 1 阶段:

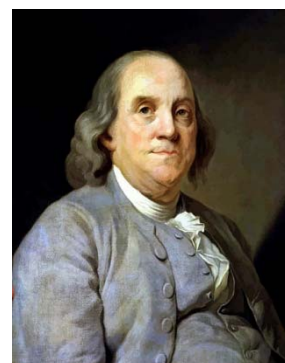
电与磁独立研究，定性地观察电现象和磁现象

早在先秦时代，我们的祖先在探寻铁矿时就发现了磁铁矿石，即磁石。这些发现很早就被记载下来了。《管子》中最早记载了这些发现：“山上有磁石者，其下有金铜”。后来，人们发现了地球磁场的存在，发明了指南针。

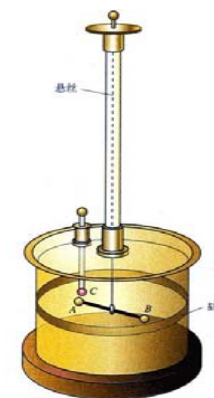


电的发现：公元前585年，古希腊人发现将琥珀与毛皮摩擦后能吸引微小羽毛。（可能是静电的最早记载）

美国人**富兰克林**1746年提出正电和负电概念；1752年揭开了雷电的秘密，提出天电（雷电）与地电（摩擦起电）是同一种电，并且发明了避雷针。

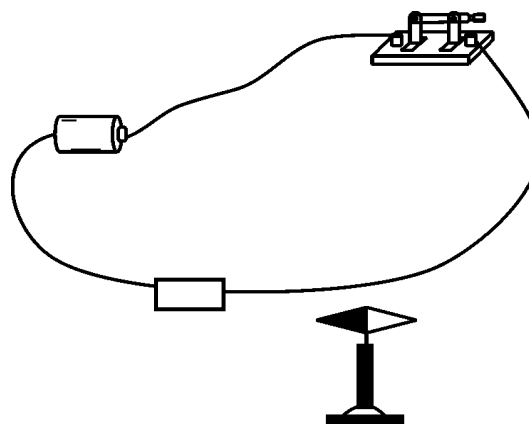


1785年法国科学家**库仑**通过实验创建了著名的库仑定律，总结出了静电荷之间作用力大小的计算公式——库仑定律。



第2阶段：电生磁，磁生电，电磁并存。

1820年丹麦人**奥斯特**发现了电流的磁效应。





1820年法国科学家**安培**解决了电流磁效应的定量计算问题——建立了安培定律。



1821-1831年间英国科学家**法拉第**创建了电磁感应定律，揭示了时变的磁可以产生电；提出了电力线、磁力线的概念，认为电磁力是通过力线传递的，为场的概念的建立奠定了直接的基础。



电磁作用力的物理解释——场思想的建立

Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC

法拉第的力线思想为电磁作用力提供了符合实验的物理解释。

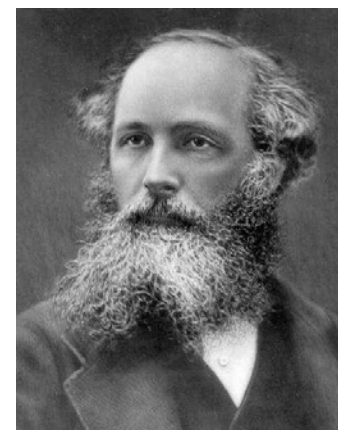
早前的库仑定律是实验定律，没有解决电荷间作用力的物理本质问题。对之有两种不同的物理解释：

- (1) 电荷之间是直接的超距瞬间作用（类似万有引力）；
- (2) 电荷的相互作用是通过近距作用（某种物质）来传递的。

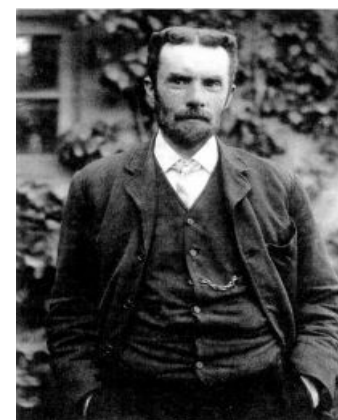
后来经过更多的实践检验，通过场（特殊物质）来传递相互作用的思想被更多人接受。电荷—电场—电荷



1865年，英国科学家麦克斯韦提出了位移电流的假设，认为时变电场可以产生时变磁场。自此，发现了电与磁的对偶性。还以严格的数学方程描述了电磁场与波遵循的统一规律，这就是著名的麦克斯韦方程组（最初含20个标量方程，1885年由**Heaviside**精简为四个矢量方程）。该方程揭示了时变电场可以产生时变磁场，同时又表明时变磁场可以产生时变电场，因此麦克斯韦预言电磁波的存在。



J. C. Maxwell



O. Heaviside

第3阶段：电磁波的广泛应用

1887年德国物理学家赫兹开展实验证明了电磁波的存在。



在此基础上，意大利的马可尼于19世纪末发明了基于电磁波的无线通讯技术。

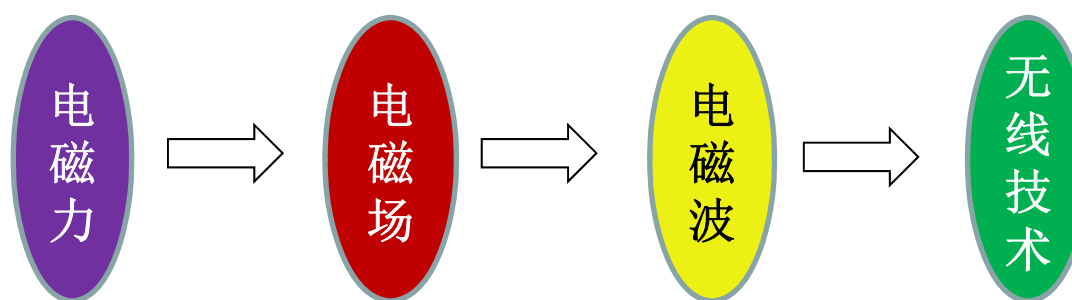


当今的无线通信、无线输能等新型无线技术应用都是基于电磁波作为载体传输信息的。





磁的发现、摩擦起电的发现、库仑定律的提出反映了人们对磁和电的认识其实是**从力的作用开始**的。磁和电看不见、摸不着，但力的作用却可以感知、可以测量。之后，**提出了力线和电磁场的概念**（假设），发现了**能传播的时变电磁场**（即电磁波），诞生了各种基于电磁波的应用。





电磁波典型应用系统

Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC

电磁波应用：无线通信系统（电磁波辐射、传播）

天线（电磁波辐射）

电磁波传播

天线（电磁波接收）

波导/传输线（电磁波传播）

波导/传输线（电磁波传播）

Tx

发射机

Rx

接收机

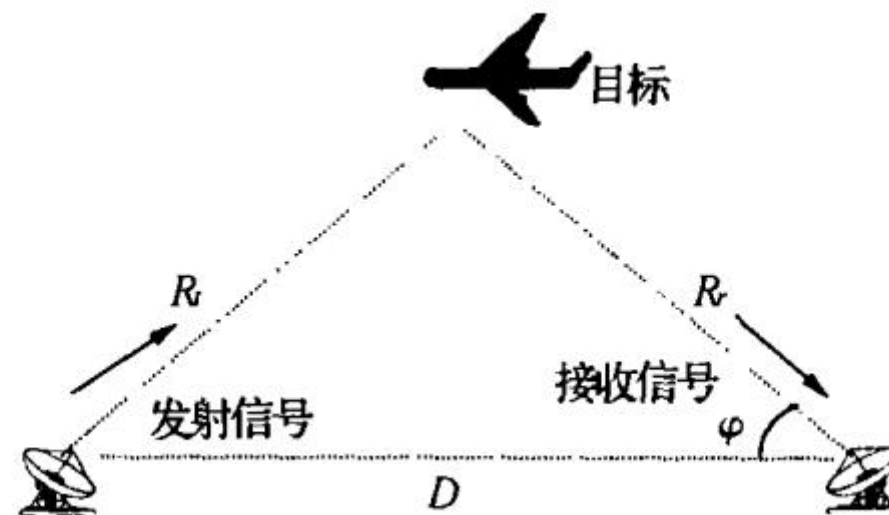
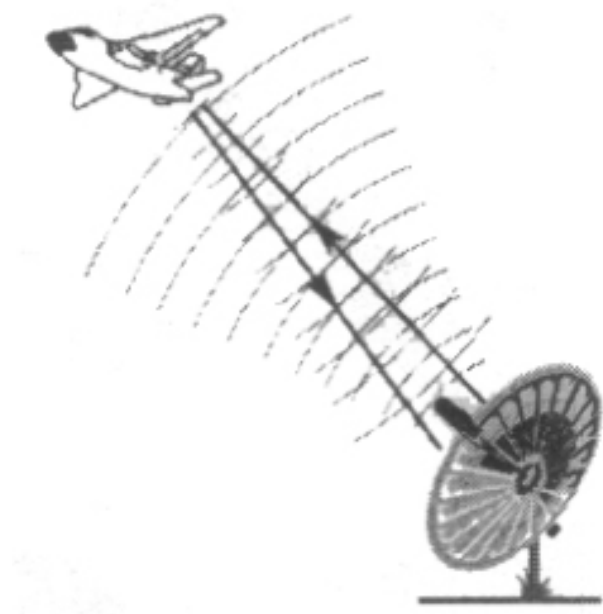
信号调制：基带->中频->高频

信号解调：高频->基带信号

电磁波典型应用系统

Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC

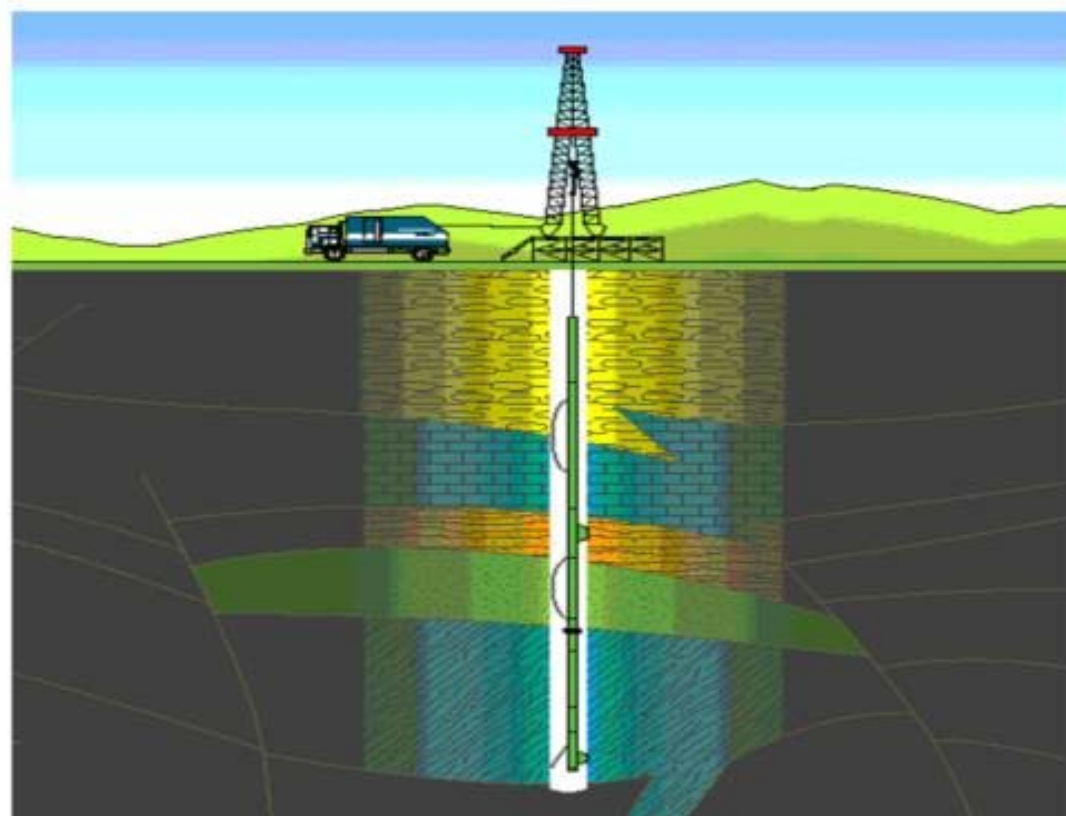
电磁波应用：雷达/成像系统（电磁波散射/逆散射）



核磁共振成像 (MRI)



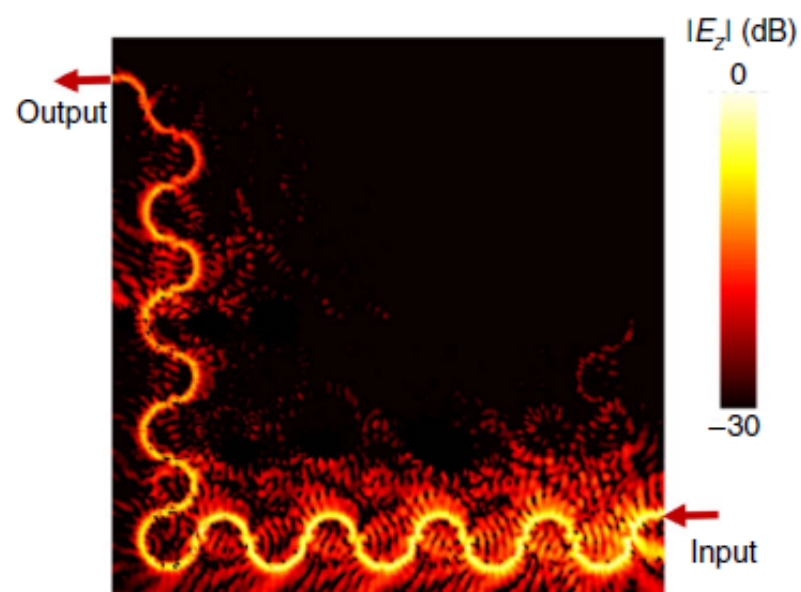
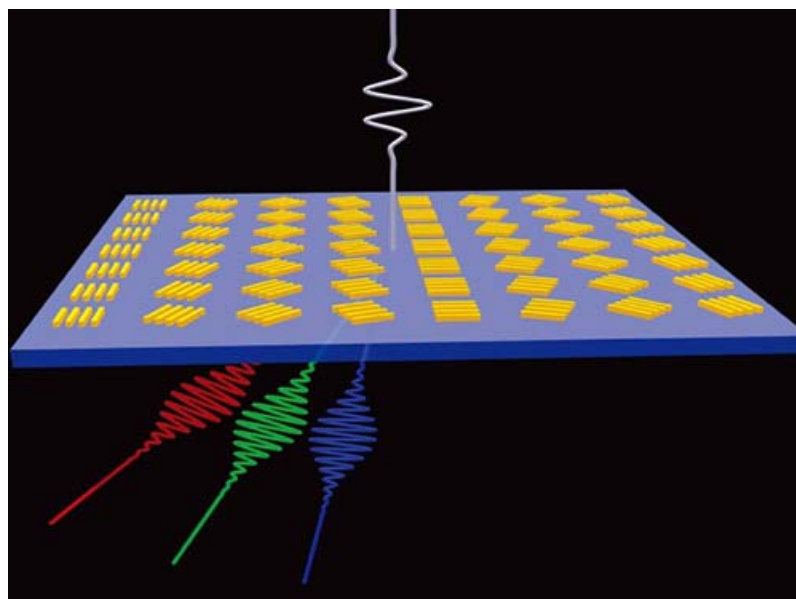
电磁测井



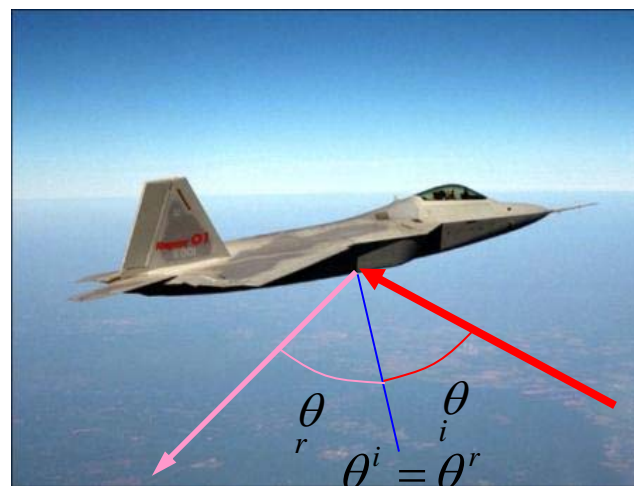
太赫兹波成像



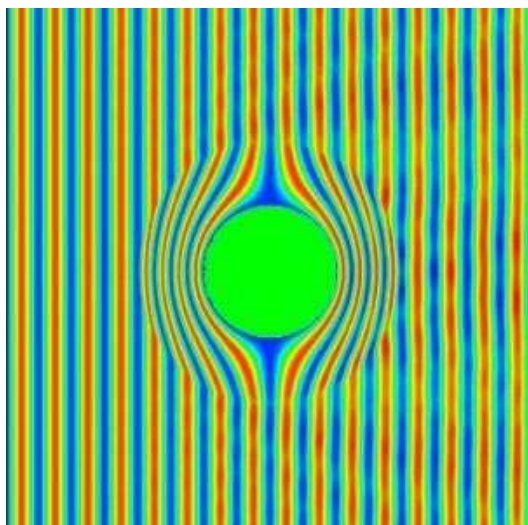
电磁波传播方向的调控



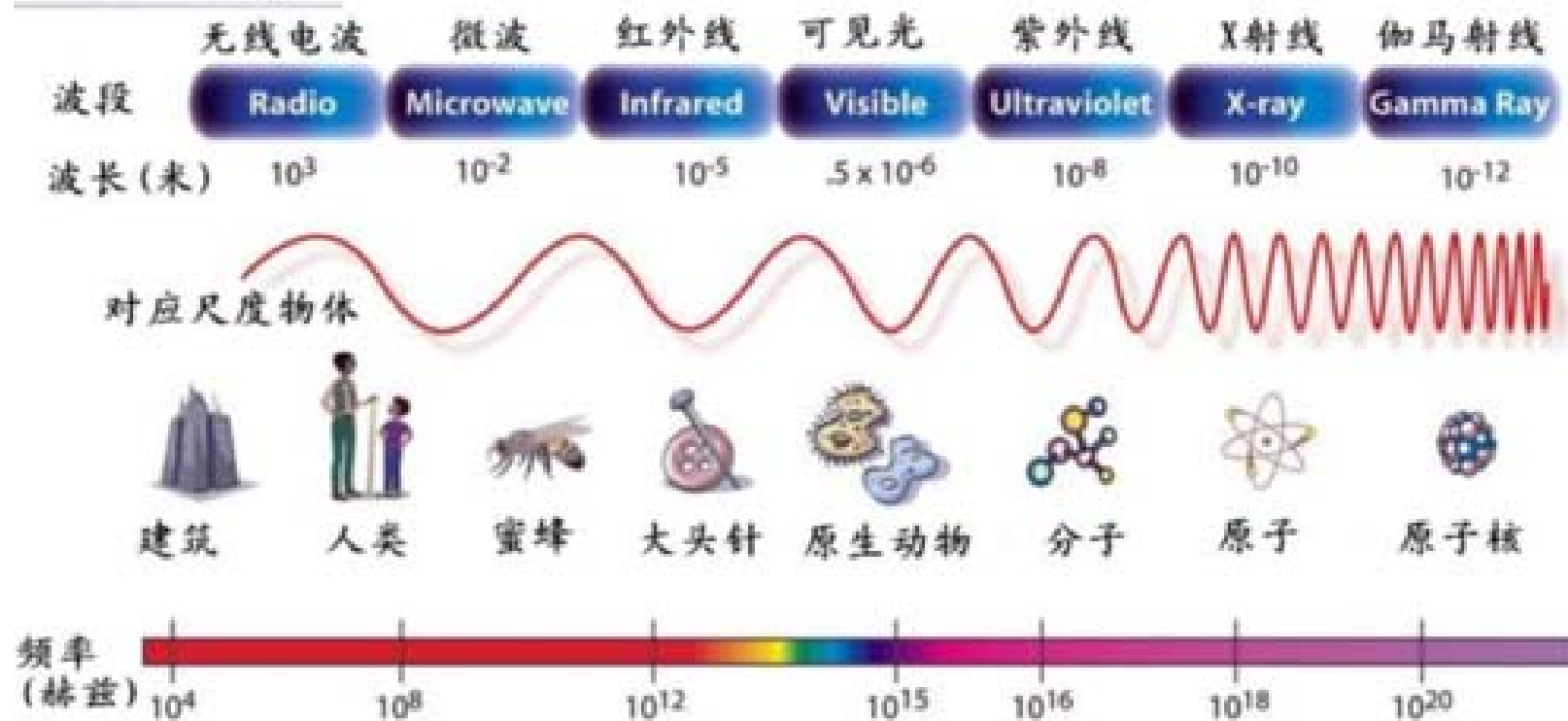
飞行器隐身



隐身衣

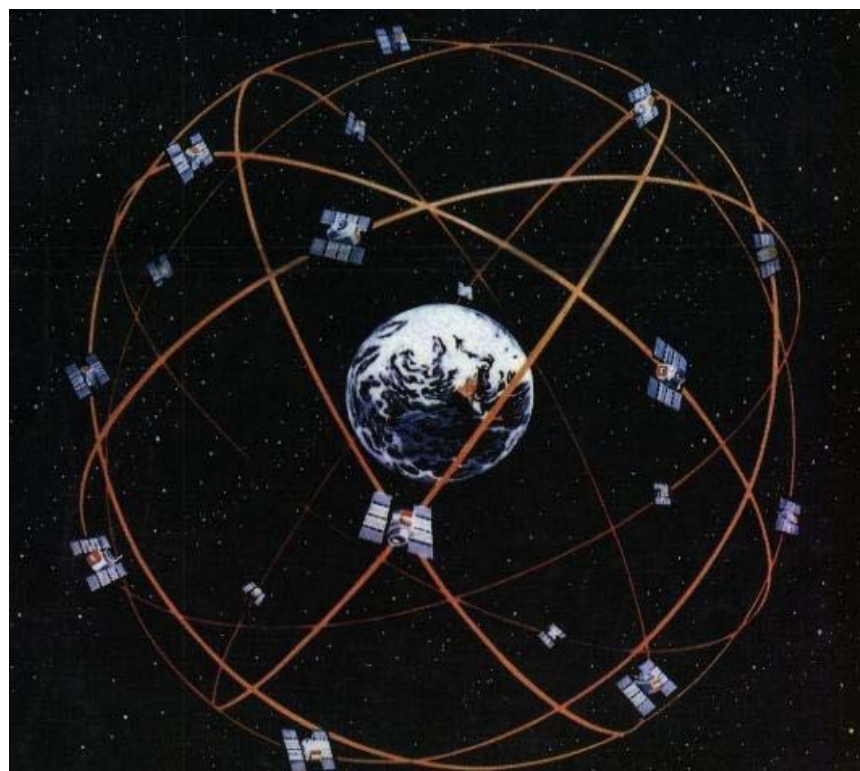


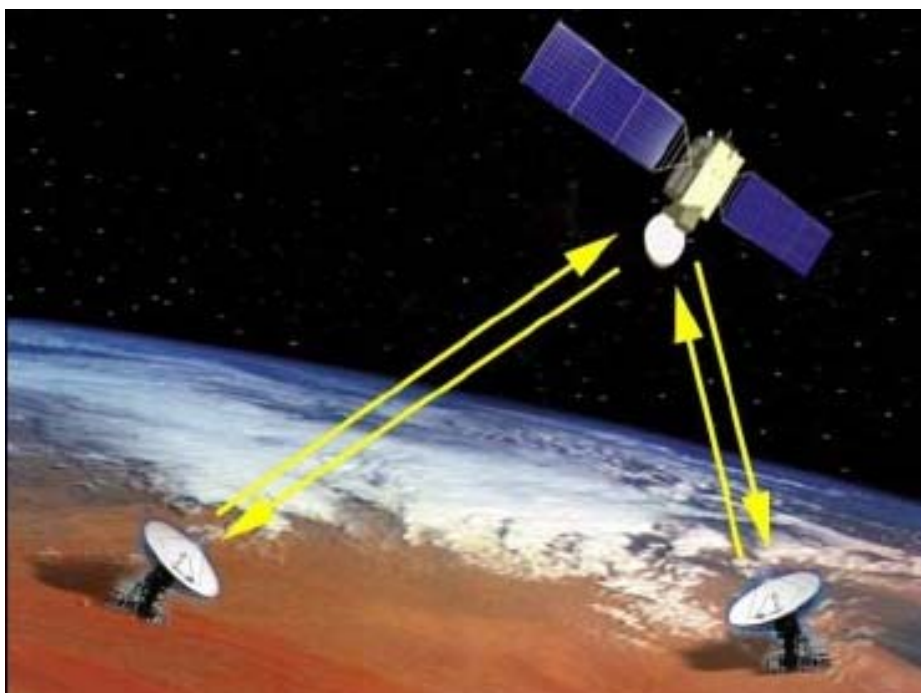
电磁波谱





全球定位系统（GPS）/ 我国北斗导航系统



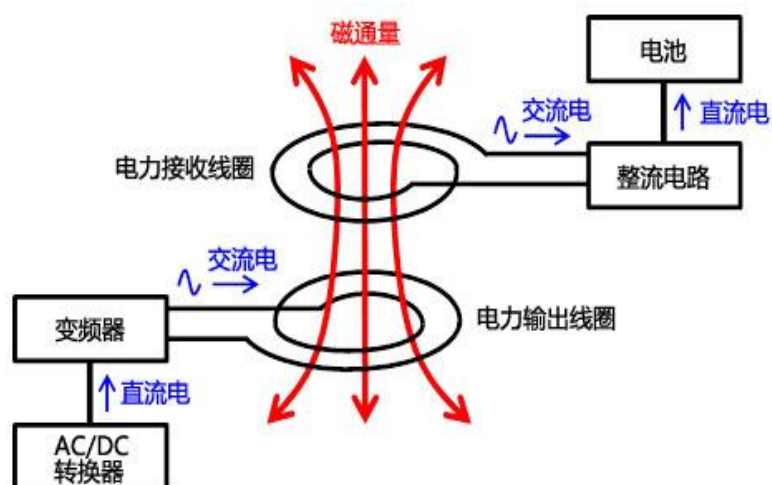


卫星通信系统

卫星电话



无线输能/充电





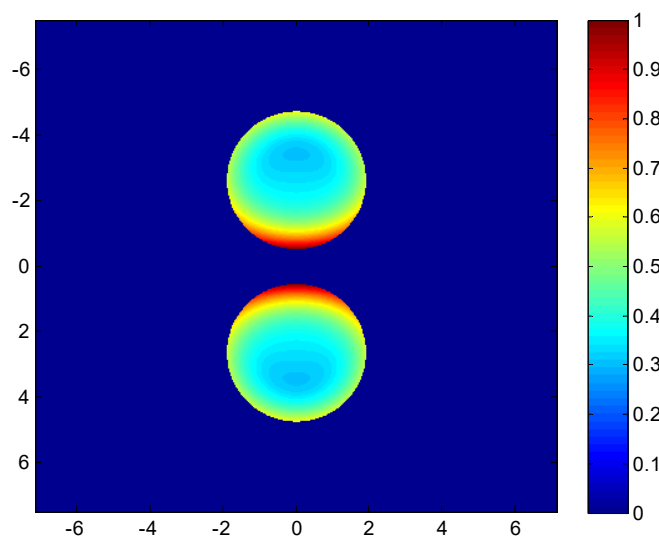
如何学好本课程？

- ◆ 课后多看书，多思考，多练习；
- ◆ 注重物理意义理解，兼顾数学公式推导；
- ◆ 借助计算机，通过编程或电磁仿真软件，验证电磁场和电磁波的物理特性

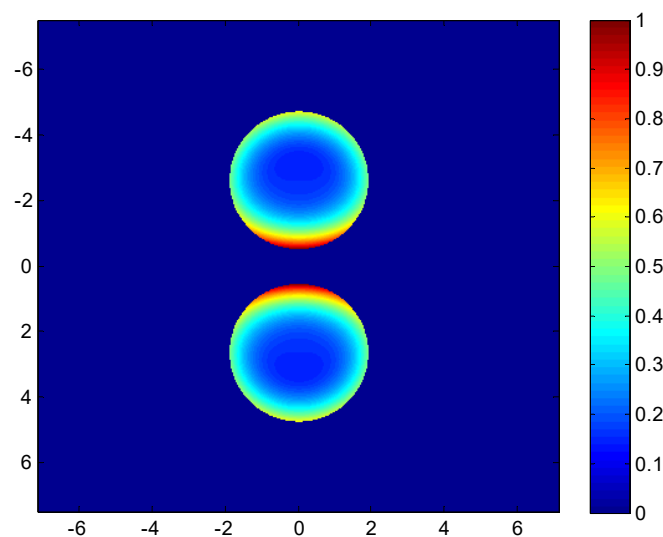


趋肤效应+邻近效应（反向电流）

Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC



$f = 5$ GHz

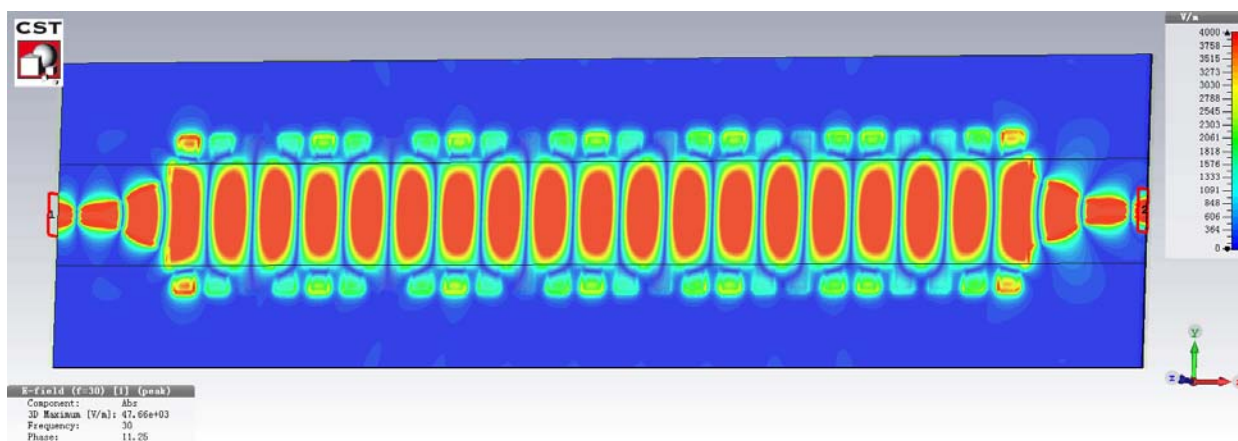
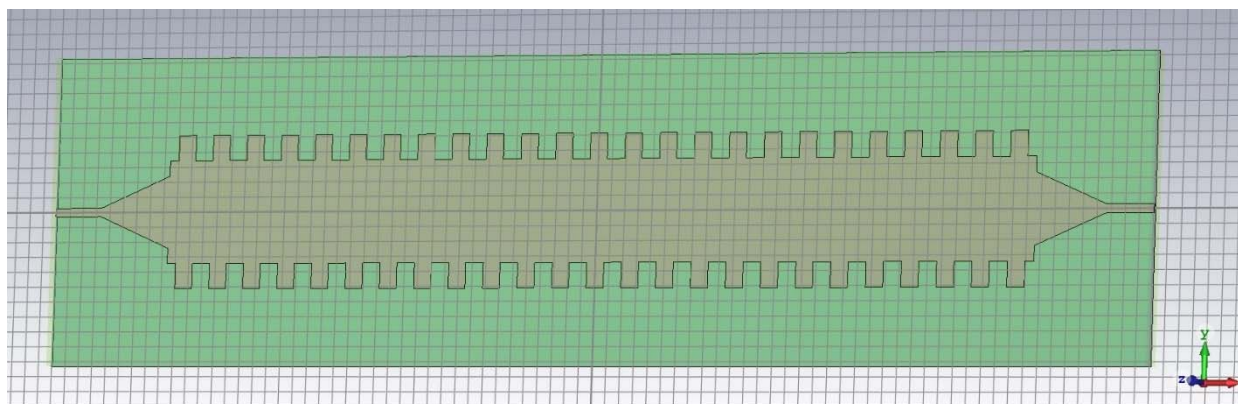


$f = 10$ GHz



梳状基片集成波导

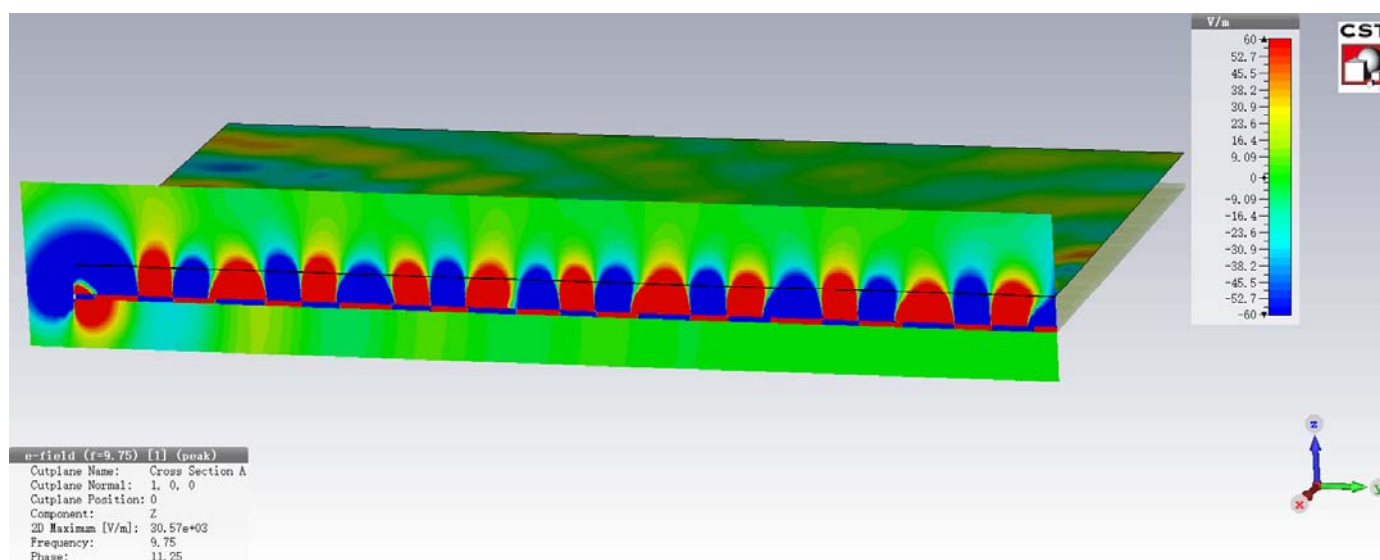
Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC





表面波形成

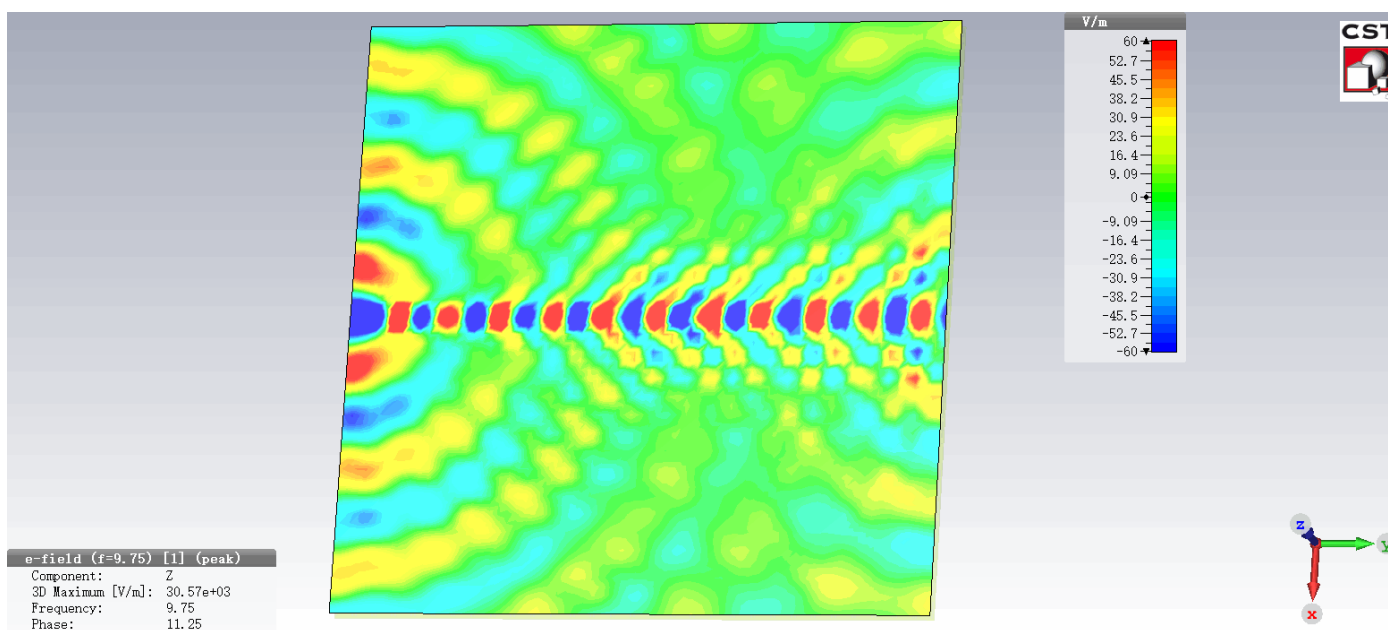
Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC





表面波无衍射传播

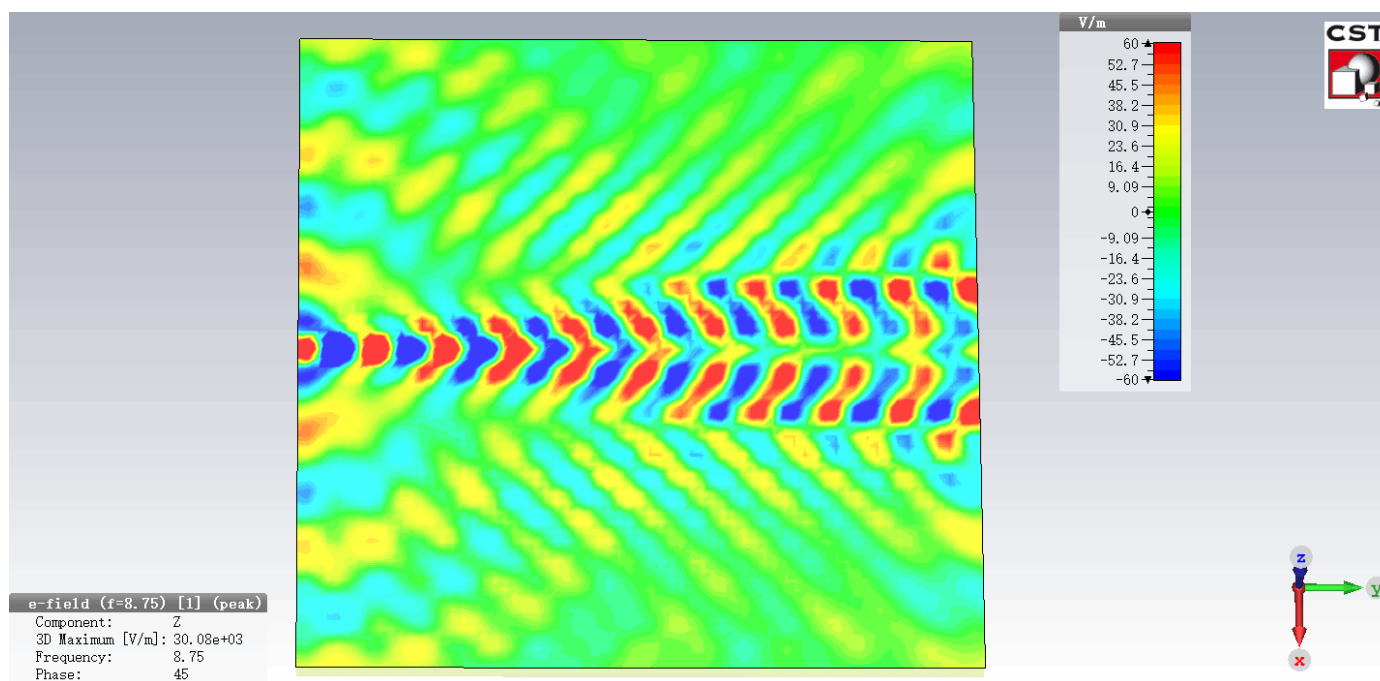
Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC





表面波呈一定角度分岔传播

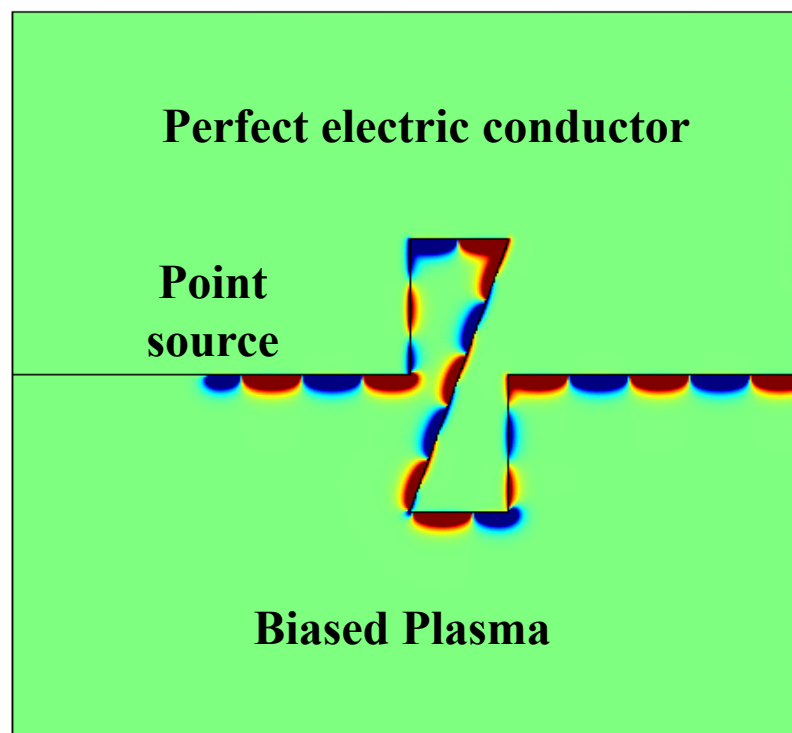
Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC

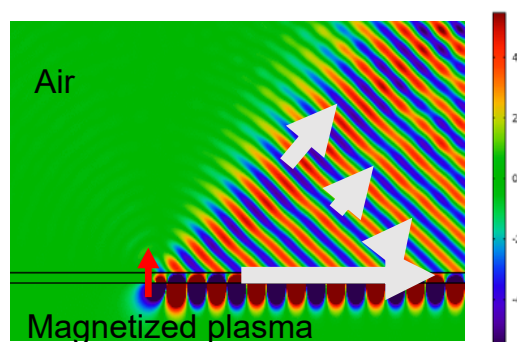




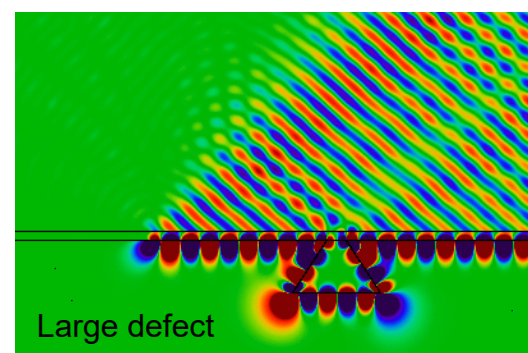
电磁波的无散射传播

Computational Electromagnetics Laboratory, UESTC

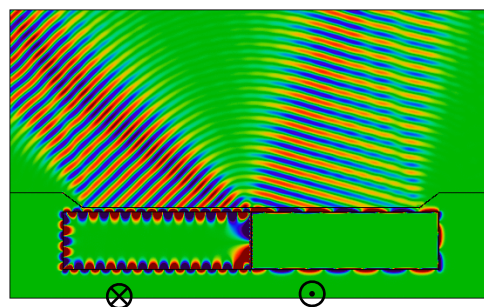




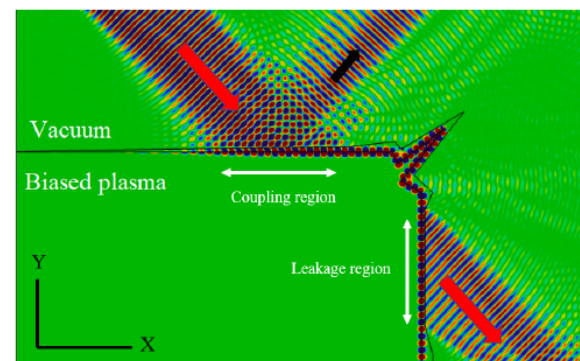
漏波辐射结构



缺陷免疫的鲁棒辐射特性



双向辐射



绕过障碍物传播

S. A. H. Gangaraj and F. Monticone*, "Topologically-protected one-way leaky waves in nonreciprocal plasmonic structures," *Journal of Physics-Condensed Matter*, vol. 30, no. 10, Mar 2018.