

# 左手材料漫谈

邓苏南 李 理

左手材料是近年来国际物理学和电磁学的一个研究热点，是一个全新的领域。众所周知，介质的电磁特性可以用介电常数 $\epsilon$ 和磁导率 $\mu$ 这两个宏观参数来描述。对于通常介质 $\epsilon>0, \mu>0$ 时，电场、磁场和波矢量之间满足右手螺旋关系，称为右手材料；而对于 $\epsilon<0, \mu<0$ 的介质，电场、磁场和波矢量之间则满足左手螺旋关系，这样的介质被称为左手介质，或左手材料。在左手材料中能量与相位的传播方向是相反的，且左手材料还必须是色散的。由于左手材料突破了传统电磁场理论中的一些重要概念，它表现出许多新奇的电磁特性。本文简要分析了左手材料的一些电磁特性，并结合左手材料的研究现状，对左手材料的发展进行了介绍，并对其发展前景进行了展望。

## 一、左手材料的发展历程

1968年，前苏联科学家 Veselago VG 发现介电常数 $\epsilon$ 和磁导率 $\mu$ 都为负值的物质的电磁学性质与常规材料不同，还指出当平面电磁波照射在这样的媒介时，会发生反常的折射现象，不过其在自然界中并不存在，因此他的研究只是停留在理论上。1996年 Pendry 提出了金属线周期结构，这种结构可使介质的介电常数为负。1999年，Pendry 等人又用电介质体设计了一种具有磁响应的周期性结构实现了介质磁导率的负值，进而展现了负折射率材料存在的可能性，人们对这种材料也投入了更多的兴趣。2001年，加州大学 San Diego 分校的 Smith 等物理学家根据 Pendry 等人的建议，首次制造出在微波波段具有负介电常数和负磁导率的物质，证明了负折射率材料的存在。2002年，美国加州大学 Itoh 教授和加拿大多伦多大学 Eleftheriades 教授领导的研究组几乎同时提出一种基于周期性 LC 网络的实现左手材料的新方法。目前基于 LC 网络的左手材料的研究在理论和实验上都有很大进展。研究还表明 LC 左手材料在微波电路、天线等方面的应用中具有很大的优势。在 2002 年底，麻省理工学院孔金瓯教授也从理论上证明了“左手”材料存在的合理性，他称之为“导向介质”。2003年美国 Parazzoli CG 等人及 Houcl 等人同时分别进行了一系列成功的实验

工作，样品实验的数据与模拟计算非常吻合，都清晰而显著地展示出负折射现象；且在不同入射角下测量到的负折射率是一致的，完全符合 Snell 定律，证实了左手材料的存在。

近几年来，国际上有关左手材料的研究论文呈逐年上升的趋势，据不完全统计，在国际主要学术刊物上，2000年与2001年所发表的关于左手材料的研究论文数量分别是13篇与17篇，2002年上升至60篇，2003年上升到100篇以上。左手材料的研究也已引起国内科学界的关注。国家自然科学基金委将左手材料和负折射效应的研究列入了2005年重点交叉项目指南中，同时，基金委信息学部将“异向介质理论与应用基础研究”列入2005年重点项目指南，其中“异向介质”即是左手材料的另一个名称。此外“新型人工电磁介质的理论与应用研究”也于2004年被列入国家重点基础研究发展规划(973计划)。

## 二、左手材料的电磁特性

**逆 Doppler 效应** 由波动理论可知,当波源和观察者互相接近时,观察到的振动频率增加;当两者互相远离时,观察到的振动频率减少,这就是著名的 Doppler 效应。类比声波在空气中的传播,一列火车在迎面开来的时候听到的笛声频率逐渐升高,音调变高;反之,笛声频率逐渐减小,音调变低。但 LHM 内波的相速度和群速度方向相反,即能量传播的方向和相位传播的方向相反,所以如果二者相向而行,观察者接收到的频率会降低,反之则会升高,从而出现逆 Doppler 效应。当反射界面相对于波源后退时,反射波频率在普通材料内降低,而在 LHM 中却会升高。

**反常切伦柯夫辐射** 当带电粒子在介质中匀速运动时会在其周围引起诱导电流,诱导电流激发次波,当粒子速度超过介质中光速时,这些次波与原来粒子的电磁场互相干涉,从而辐射出电磁场,称为切伦柯夫辐射。正常材料中,干涉后形成的波面,即等相面是一个锥面。电磁波能量沿此锥面的法线方向辐射出去,是向前辐射的,形成一个向后的锥角,即能量辐射的方向与粒子运动方向夹角 $\theta$ 。

$\theta$ 由式子  $\cos \theta = \frac{c}{nv}$  确定, 其中  $v$  是粒子运动的速度。

而在负群速度介质中, 能量的传播方向与相速相反, 因而辐射将背向粒子的运动方向发出, 辐射方向形成一个向前的锥角。如图 1 示意的两种情况下的切伦柯夫辐射情形。

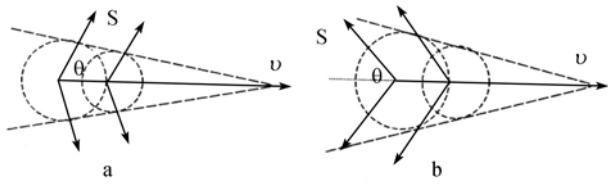


图 1 切伦柯夫辐射的示意图((a) 正常材料中; (b) 负折射材料中)

**负折射效应** 当单色平面波入射到两介质界面时就会发生反射和折射现象(如图 2), 其折射现象满足 Snell 定律。对于正常材料, 该现象称为“正折射”; 若介质 1 为正常材料, 而介质 2 为 LHM 时, 折射光线 3 和入射光线 1 位于界面法线同侧, 相当于折射角为负值, 且折射光线的能量流密度  $S$  方向与波矢  $k$  方向相反, 称为“负折射”。折射角大小仍由 Snell 定律确定, 若把折射率取为负值, 那么 Snell 定律仍然成立。Parazzoli 等人利用左手材料制成了负折射率凹透镜, 并验证了凹透镜的聚焦行为。

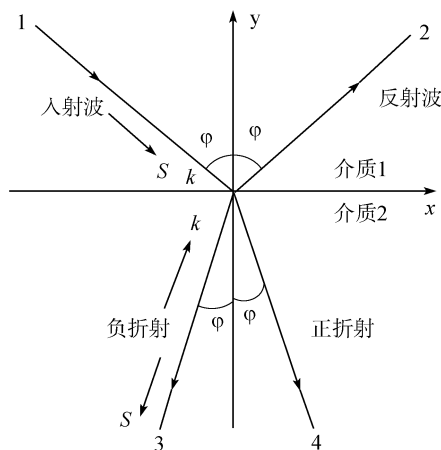


图 2 平面波折射图

### 三、左手材料的应用

**左手材料用于天线** 应用于天线覆层的左手材料作用原理类似于光学领域的凸透镜, 穿过其中的电磁波受其散射特性的束缚, 只能够在垂直方向附近的小角度内传播, 其他方向的传播被限制。通过合理地选取左手材料覆层, 将显著地改善贴片天线的方向性。

法国 Fresnel Institute 的研究人员采用铜片制作了 metamaterial 介质系统, 能够将发散的电磁波聚集在一个狭窄的矩形内, 极大地改善了天线的定向辐射特性。Burokur 等人研究了左手材料对微带贴片天线性能的影响, 发现左手材料覆层的引入可使天线的聚焦性和方向性更好, 增益提高了 2.8dB, 改善了天线的性能, 若选用损耗小的左手材料且保证良好的波阻抗匹配天线的增益可达到 12 dB。

而将左手材料与右手材料复合作为天线基板, 可抑制天线边沿辐射, 减少天线阵元间的干扰, 提高天线方向性。同时, Baccarelli 在理论上对基板的散射方程进行了数学讨论, 提出以左手材料作为天线基板抑制表面波 TE 模、TM 模的条件。他指出左手材料作为天线基板可以减少天线的边缘散射, 提高天线的辐射效率。

另外利用复合左右手传输线可以构成一种新型的行波天线, 其辐射特性由复合左右手传输线的色散特性决定。如果在传输线的单元结构中载入变容二极管, 通过改变偏置电压可以改变其容值, 从而改变传输线的色散特性。这样可以得到压控波束扫描行波天线。这种行波天线可以实现  $180^\circ$  范围内的扫描。再者, 普通的微带行波天线工作在高次模, 需要进行基模抑制才能提高辐射效率, 而这种新型行波天线则工作在基模, 这在一定程度上降低了设计的复杂度。

如此, 手机辐射有望解决。手机辐射之所以可能对人体产生影响, 是因为目前市场上应用的手机天线, 都是全方向发射信号, 向基站发射信号的同时也向人发射电磁波, 对人的辐射无法避免。而新型的左手材料, 通过人造结构来控制电磁波传播方向, 用它制成定向天线, 可以智能寻找附近的电信信号发射基站, 专向基站方向发射信号, 并通过相关技术阻止信号向人脑方向的传播, 可避免电磁波对手机使用者造成辐射。因此, 左手材料定向功能为制造新一代手机天线创造条件。第四代、第五代移动通讯技术对于智能化天线提出了极高要求, 但现有手机天线无法实现定向寻找等智能化功能。基于左手材料的单个小天线, 可实现高方向性或者波束扫描, 轻松达到定向目的, 还能大大降低能耗。目前, 国际通讯产业界等都在加紧研制左手材料, 借以开发未来微波通讯器件。但是目前这项研究仍处于实验室阶段。

左手材料用于谐振装置 利用左手材料中能量与相位传播方向相反的特性, N.Engheta 提出利用左手材料可以实现对右手材料进行相位补偿, 从而构成一种新型的谐振腔。这种谐振腔的谐振频率跟其厚度无关, 而只决定于两种材料厚度的比例。因此这种谐振腔的厚度可以做的非常薄。利用这一原理, 构造出基于左手传输线的新型微带谐振器, 其尺寸远小于传统的半波长微带谐振器。同时, 左手材料也可用于制造开放式谐振腔。开放式谐振腔的基本原理如图 3(a)所示, 左手材料位于 1、3 象限, 折射率  $n=-1$ , 2、4 象限为空气。一线源位于 A 点, 电磁波经左手材料的折射又回到 A 点形成谐振腔。用时域有限差分法对这种结构进行了数值仿真结果如图 3(b)所示。可以看到 虽然整个区域是没有边界的但电磁波的能量主要被限制在中心区域, 形成一个开放式谐振结构。

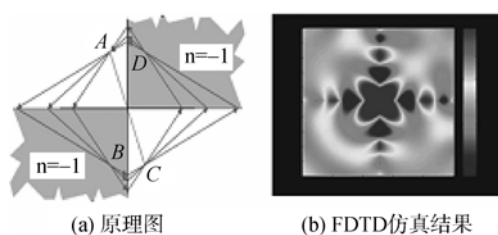


图 3 左手材料构成的开放式谐振腔

左手材料用于超薄雷达吸波 二维的平面左手材料在某些频段内会表现出高阻抗表面的特性, Engheta 提出利用这一特性设计一种对电磁波有较强吸收的超薄材料。其原理是通过在高阻抗表面载入电阻, 使整个表面呈现纯阻性的表面阻抗。通过调整载入的阻值可使表面阻抗接近空气中的波阻抗。这种结构对垂直入射的电磁波有很好的吸收效果, 对于斜入射电磁波, 虽然存在一定程度反射,

但反射波并非原路返回, 因此这种表面对电磁波的后向散射截面很小, 可用于雷达吸波材料。

#### 四、左手材料的研究动态及展望

人们在对左手材料特性继续进行理论分析研究的同时也在探讨它的应用前景。比如说左手材料的反常 Cerenkov 辐射可能有助于探测高能带电粒子, 反常多普勒频移可能研制出体积更小、价格更低廉的无损探伤设备。左手材料制作的透镜不会丢失信息, 会将所有的光场, 包括消逝场在内, 完全复制到像点, 能量无损耗, 这样可以突破光学分辨率极限, 故也称之为理想透镜。左手材料还可用来制造高指向性的天线、聚焦微波波束、实现“完美透镜”、用于电磁波隐身等等。随着纳米技术的进展, 采用纳米导线也有可能研制成光波波段的的人工媒质, 以制造新颖的光子器件。左手材料以它独特的性质必会在新型器件中有巨大的应用潜力。

左手材料研究领域里值得关注的的一个主要问题是要设计并制作出符合应用条件的实际材料, 先前一般实验所用的样品都离不开金属线和环, 频段集中在微波范围。随着人工光子晶体结构研究的发展, 这类结构的左手材料更有可能进入到可见光的范围。2003 年, 土耳其有人在实验中用白宝石短棒构成的正方点阵结构实现光子的负折射现象, 美国人也用类似结构的光子晶体实现了平板透镜的成像等等。可以预言可能制造出的光子晶体结构的左手材料, 将有更广阔的应用前景。如利用左手材料的反常折射特性制作集成电路里的光引导元件; 已设计出双向光波导耦合器件, 有望制作出具有极高分辨率的新型光学元件, 使之用于光学密度存储和加工等等; 左手材料更广阔的应用前景正在进一步探索研究之中。

(江苏省徐州市中国矿业大学 221116)