

时间反演脉冲电磁波在双负材料中传播特性研究*

赵德双[†] 岳文君 余敏 张升学

(电子科技大学应用物理研究所, 成都 610054)

(2011年3月22日收到; 2011年7月28日收到修改稿)

利用全时域电磁仿真技术, 对比研究了时间反演脉冲电磁波和脉冲电磁波透过 Smith 结构双负材料后的时域波形、脉宽压缩以及材料内部空间电场峰值强度分布等时域传播特性. 结果表明: 时间反演脉冲电磁波在透过双负材料后, 在初始源激励处表现出良好的时间和空间聚焦特性. 更重要的是, 在双负材料内部, 观测到了电场峰值强度减弱、截面电场峰值强度趋向均衡分布等新型的物理现象. 这些物理现象对发展能够承受大功率新型的双负材料电子器件及其应用系统很有参考价值.

关键词: 双负材料, 时间反演, 时 - 空聚焦

PACS: 41.20.Jb, 77.22.-d, 84.40.-x

1 引言

双负材料是一种介电常数和磁导率同时为负数的特殊介电材料. 在双负材料中, 电场、磁场以及波矢三者之间满足左手关系, 所以也称之为左手材料^[1]. 在双负材料中, 电磁波往往表现出负相位速度^[2]、负折射率^[3]、完美成像^[4]等非常独特的物理特性, 这些物理特性在光电器件、成像系统、电磁隐身等领域中有巨大的应用潜力. 自 2001 年人们首次利用 Smith 结构在微波段制备出双负材料以来^[5,6], 微波段双负材料研究发展十分迅速, 先后发展了回字形^[6]、嵌套结构^[7]、S 形^[8]等多种新型结构的双负人工材料.

简谐电磁波在双负材料的传播特性已被广泛研究^[2-8], 但时间反演 (time reversal, TR) 电磁波在双负材料中的传播特性研究相对缺乏. 时间反演电磁波不同于由传统信号源直接产生的简谐或脉冲电磁波, 它是通过在时间轴上对接收信号进行反转后得到, 是一种特殊的、富含信道信息的时域电磁波信号. 在 1992 年, Fink 等人在研究过程中发现 TR 具有独特的环境自适应时 - 空同步聚焦特性, 可有效地解决在复杂环境下的声波探测问题^[9]. 随后, TR 技术受到人们广泛关注, 并将其从声学领域引入到电磁波领域, 对 TR 在无线电通信^[10]、雷达探测与成像^[11]等领域中的应用进行研究. 研究表

明, 如果采用时间反演电磁波作为发射信号, 在无线信道满足互易对称条件下, TR 技术同样能够实现电磁波信号在时间和空间上近似完美的能量聚焦^[12-15]. TR 这种独特的时 - 空聚焦特性在空间功率合成、电磁兼容、生物医学以及传感器等领域有着非常广泛的应用.

为了探索研究时间反演电磁波在双负材料中的传播特性, 本文利用全时域电磁仿真技术, 重点研究了时间反演脉冲电磁波在 Smith 结构中的时域传输特性, 分别观测到了脉冲电磁波在时域上的脉宽压缩、能量聚焦以及 Smith 结构内部电场峰值强度减弱等新的物理现象. 这些物理现象不同于双负材料中已发现的完美空间聚焦现象, 因此, 对探索研究和具备新型物理特性的双负材料、电子器件及其应用系统很有参考价值.

2 时间反演电磁波传输原理

2.1 时间反演电磁波

时间反演电磁波是一种富含信道特征信息的特殊电磁波. 在瞬态系统中, 时间反演电磁波主要通过通过对系统的接收信号进行时间反转或镜像得到, 获取方式如下: 首先, 利用理想的信源产生一脉冲 $x(t)$ 对传输系统进行信道探测激励; 然后, 在接收端对接收信号 $r(t)$ 进行记录和存储; 最后, 再

* 国家自然科学基金 (批准号: 61071031, 60872029, 60872034) 资助的课题.

[†] E-mail: dszhao@uestc.edu.cn

对接收到的信号 $r(t)$ 在时间轴上进行反转或镜像处理, 获得时间反演电磁波 $r(-t)$. 假设点对点收/发系统间的信道冲击响应为 $h_{AB}(t)$, 在初始信号源 $x(t)$ 的激励下, 收/发系统间的时间反演波形 $r(-t)$ 可写为

$$r(-t) = x(-t) * h_{AB}(-t), \quad (1)$$

其中, $r(t)$ 为在初始激励源 $x(t)$ 下的接收信号, 即

$$r(t) = x(t) * h_{AB}(t), \quad (2)$$

对 $r(-t)$ 和初始激励信号 $x(t)$, 可以看出, 时间反演波形 $r(-t)$ 隐含有信道冲击响应信息 $h_{AB}(-t)$, 与初始激励信号 $x(t)$ 存在很大差异. 如果将这种富含信道冲击响应信息的时间反演信号 $r(-t)$ 作为系统的发射激励源, 则会获得很多的新颖物理现象.

2.2 时间反演电磁波传输

在时间反演电磁波传输系统中, 系统的激励发射信号不再是理想信源产生的信号 $x(t)$, 而是时间反演信号 $r(-t)$. 设收/发系统之间的传输信道满足互易对称条件 $h_{AB}(t) \equiv h_{BA}(t)$, 依据线性时不变系统原理, 可得 $r(-t)$ 通过传输后, 在初始探测源位置处的接收波形为

$$\begin{aligned} y(t) &= r(-t) * h_{AB}(t) \\ &= x(-t) * h_{AB}(-t)h_{AB}(t) \\ &= x(-t) * R_{hh}(t), \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $y(t)$ 为采用时间反演信号 $r(-t)$ 进行激励下的接收波形, $R_{hh}(t) = h_{AB}(-t) * h_{AB}(t)$ 为信道冲击响应自相关迹函数. 由 (3) 式可以看出, 虽然系统仅仅将激励发射波形由 $x(t)$ 替换成 $r(-t)$, 但是在时间反演传输下, 系统的接收波形 $y(t)$ 与直接采用 $x(t)$ 激励下得到的接收波形 $r(t)$ 有显著区别. 在时间反演传输下, 接收信号 $y(t)$ 可看成 $x(-t)$ 通过一个等效的自相关信道 $R_{hh}(t)$, 而 $R_{hh}(t)$ 是一个单峰值函数, 在理想情况下可近似等效为一个 Dirac 函数或一个完美信道. 通过 Dirac 函数近似, 可知

$$y(t) \approx x(-t) * \delta(t) = x(-t). \quad (4)$$

由上式可以看出, 在时间反演传输系统中, 最初用于探测的信源波形基本上可以得到保形, 而原有系统传输过程中产生的波形形变、时延扩展以及能量扩散等也就自然地得到有效抑制.

双负材料是一种基于周期结构构造出了人工材料, 不仅会产生大量的高次传输模式, 同时也会引入大量的频率色散. 因此, 在传统的传输方式下, 信号经过双负材料后, 会产生明显的波形形变, 例如波形拖尾、信号啁啾、频率色散等, 这些因素会极大地影响信号的传输特性, 同时也会影响双负材料的空间聚焦性能. 因此, 本文将研究利用时间反演传输技术来有效地抑制这些不利因素.

3 基于 Smith 结构的双负材料模型

典型的 Smith 结构主要由周期性排列的金属柱和开路谐振环 (split ring resonator, SRR) 两个部分构成 [5], 是一种介电常数和磁导率全为负数的人工材料. 其关键单元是金属柱和 SRR, 如图 1 所示. 考虑到长方体结构便于电磁建模、网格剖分以及能够获得良好的数值仿真精度, 本文采用长方体金属柱对 Smith 结构进行建模. 长方体金属柱高为 h , 截面边长为 d , 金属柱与 SRR 相隔距离为 e , 如图 1(a) 所示. 如果金属柱的横向尺寸 d 远小于谐振波长, 长方体金属柱具有与圆柱形金属柱几乎相同的电磁散射和谐振特性. 因此, 为获得与文献 [5] 中的圆柱形金属柱基本相同材料特性, 本文中长方体金属柱的截面边长 $d \ll \lambda$, 其中 λ 为谐振波长. Smith 结构另一个关键单元 SSR 由内外两个大小不等的正方形开口环嵌套而成, 如图 1(b) 所示. SRR 的线宽及金属材料厚度均为 w , 内环边长为 b_1 , 外环边长为 b_2 , 内外环的间距为 s , 两环的开口缝隙均为 g . 然后, 将双负材料单元进行组阵, 该阵列可看成是由两种阵列构成: 金属柱阵列和 SRR 阵列. 在独立存在的状态下, 两个阵列分别为单负材料, 前者等效介电常数 $\epsilon_{\text{eff}}^{\text{wire}} < 0$, 后者等效磁导率 $\mu_{\text{eff}}^{\text{SRR}} < 0$. 但两者经过组合后, 整个阵列结构的等效介电常数和等效磁导率全为负数.

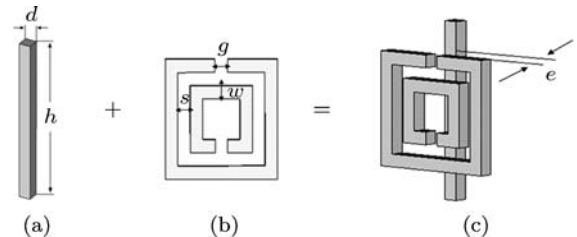


图 1 基于 Smith 结构的双负材料单元 (a) 单个金属柱; (b) 单个 SRR; (c) 双负材料单元

在等间隔周期性排列下, 长方体金属柱阵列的等效介电常数计算如下 [12]:

$$\epsilon_{\text{eff}}^{\text{wire}}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}$$

$$= 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\epsilon_0 D^2 \omega_p^2 \sigma / a^2)}, \quad (5)$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数, ω 为入射波频率, ω_p 为等离子体频率, γ 为等离子体电子碰撞频率, σ 为金属导线的电导率, D 为金属阵列的晶格周期或阵元间隔, a 为导线的粗细. 由 (5) 式可以看出, 通过调整金属导线周期尺寸和导线的粗细, 可在一定的频段范围内得到负介电常数. 同理, 也可以通过合理设计 SRR 结构尺寸及阵列, 使 SRR 阵列的等效磁导率变为负数. SRR 的等效磁导率计算如下 [13]:

$$\mu_{\text{eff}}^{\text{SRR}}(\omega) = 1 - \frac{F\omega_m^2}{\omega^2 - \omega_m^2 + i\omega\Gamma}, \quad (6)$$

式中, $\omega_m = \sqrt{3b_1sc_0^2/A_{\text{inner}}^2}$ 代表 SRR 的本征谐振频率, $\Gamma = 2w/(b_1\sigma)$ 表征结构的损耗系数, $F = A_{\text{inner}}/A_{\text{external}}$ 表示内外环面积比重系数, A_{inner} 为内环面积, A_{external} 为外环面积.

4 数值仿真及结果分析

4.1 仿真模型

本文采用专业电磁仿真软件 CST Microwave Studio 提供的全时域仿真技术, 对脉冲电磁波和时间反演脉冲电磁波在双负材料中的时域传输特性进行了对比研究和分析. 双负材料为 Smith 阵

列结构, 如图 2 中阵列所示. 经过结构优化设计后, 该结构在频段 20.9—22.8 GHz 范围内, 等效磁导率和介电常数均为负数. 其中, 金属柱的截面边长 d 为 0.2mm, 高度 h 为 2.8mm; SSR 外环边长为 1.8mm, 内环边长为 1 mm, g, w, s 都为 0.2mm; 金属柱与 SRR 之间的距离 e 为 0.2mm; 由金属柱和 SRR 组成的 Smith 结构阵列单元间隔 D 为 2.8 mm, 阵元总数目为 3×3 . 为方便研究时间反演电磁波在该材料中的时域传播特性, 我们将其放置在 $8.4 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的封闭波导中, 波导的截止频率为 17.95 GHz.

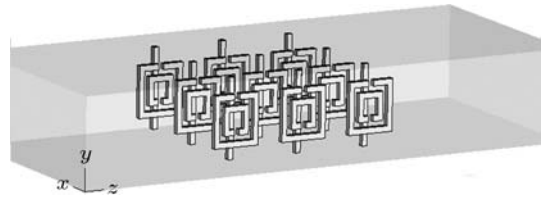


图 2 填充介质为双负材料的波导结构

4.2 信道探测与时间反演激励

信道探测是进行时间反演电磁波传输的第一步, 目的是获取时间反演电磁波信号. 信道探测过程为: 在波导一端馈入激励信号 $x(t)$, 在另一端记录激励响应接收波形 $r(t)$. 其中, $x(t)$ 为理想的调制高斯脉冲 (如图 3(a) 所示), 中心频率 25 GHz, 脉

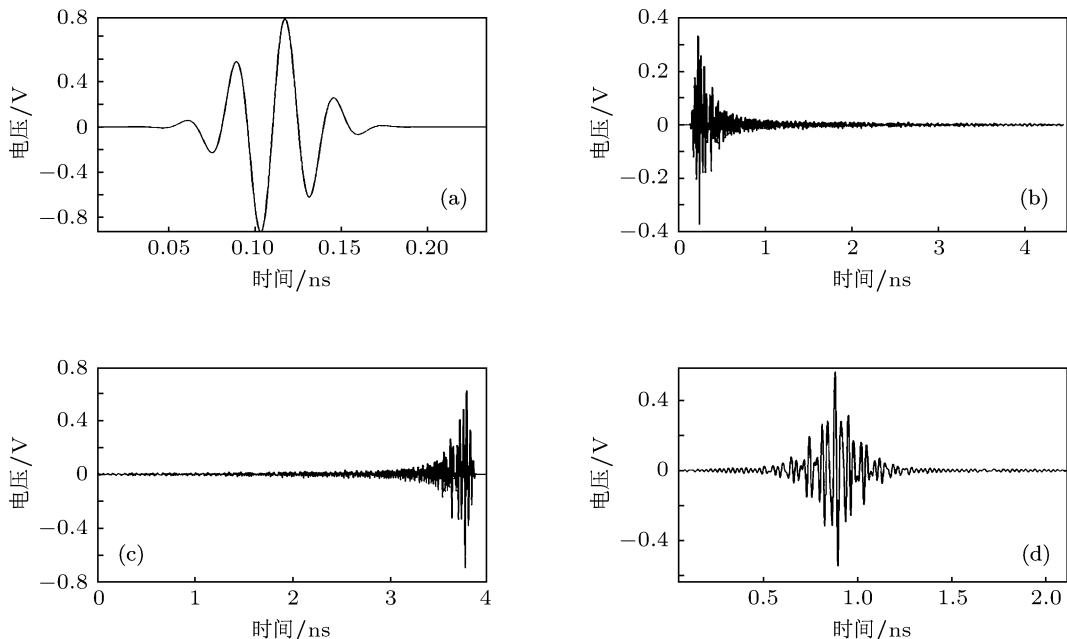


图 3 原始激励脉冲 $x(t)$ 与时间反演脉冲 $r(-t)$ 经过双负材料中的传输特性对比 (a) 原始激励脉冲 $x(t)$; (b) 激励响应接收波形 $r(t)$; (c) 时间反演脉冲 $r(-t)$; (d) 聚焦接收波形 $y(t)$

冲半波全宽度 0.08 ns. 在调制高斯脉冲 $x(t)$ 激励下, 双负材料的时域响应波形 $r(t)$, 如图 3(b) 所示. 从图中可以看出, 双负材料时域响应 $r(t)$ 在时间轴上出现明显的拖尾以及时延展宽, 而且时延展宽较大, 由此也证实了装载有双负材料的波导传输系统是一个高色散系统. 在高色散系统中, 不同频率分量的传播速度相差很大, 导致不同频率分量到达接收端口时间差不同, 进而形成较长的脉冲拖尾以及明显的时延展宽.

在获取信道探测响应 $r(t)$ 后, 再通过对 $r(t)$ 在时间轴上进行反转, 得到时间反演电磁波激励信号 $r(-t)$. 为了方便分析, 文中对 $r(-t)$ 进行了能量归一化处理, 归一化后 $r(-t)$ 总能量与原始激励信号 $x(t)$ 相同. 图 3(c) 为经过能量归一化的时间反演激励波形 $r(-t)$. 在时间反演传输中, 直接采用 $r(-t)$ 作为系统的输入激励信号, 然后在波导输出端口观测和记录其对应的接收波形 $y(t)$.

4.3 数值结果及分析

为对比传统传输方式和时间反演传输方式两

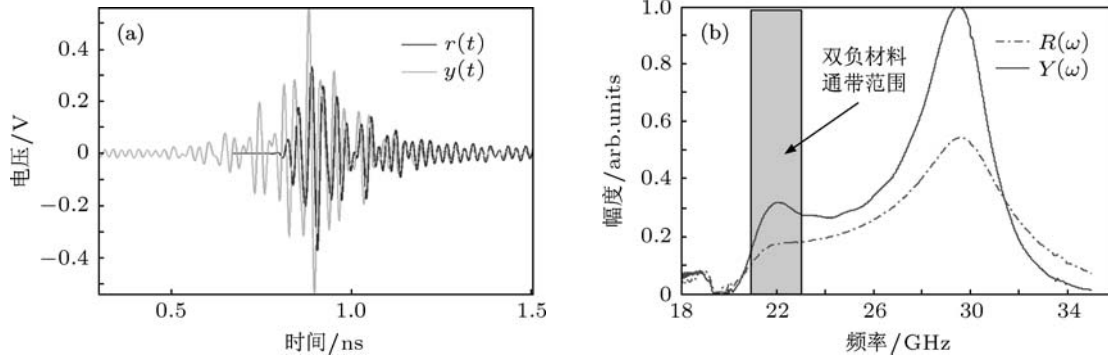


图 4 时域波形 (a) 与频谱 (b) 对比图 (其中, $r(t)$ 对应于初始信号 $x(t)$ 激励下接收波形, $y(t)$ 对应于时间反演波形 $r(-t)$ 激励下的接收波形)

均方根时延 τ_{rms} 是表征信号在时间上聚焦特性的重要参数 [10], 表一给出了两种传输方式下接收波形的均方根时延宽度, 其计算公式如下:

$$\tau_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty P(t)t^2 dt}{\int_0^\infty P(t)dt} - \left(\frac{\int_0^\infty P(t)t dt}{\int_0^\infty P(t)dt}\right)^2}, \quad (7)$$

其中, $P(t)$ 为接收信号 $y(t)$ 或 $r(t)$ 瞬时功率. 虽然多数研究表明双负材料具备完美的“空间”聚焦性能, 但是, 从图 2(b) 和表 1 中可以看出, 在传统传输模式下, $r(t)$ 的能量分散在一个比较长的时

者的异同, 图 4 将两种传输方式下的接收信号进行了对比. 图 4(a) 中, $r(t)$ 为传统传输方式下采用 $x(t)$ 进行激励的接收波形, $y(t)$ 为时间反演传输方式下采用 $r(-t)$ 进行激励的接收波形. 从图 4(a) 中可看出, $y(t)$ 的峰值幅度明显高于 $r(t)$, $y(t)$ 最大幅度值为 0.564 V 而 $r(t)$ 的最大幅度值为 0.373 V, 相比之下, 时间反演传输方式的峰值幅度要比传统传输方式高出约 50%. 再通过分析两种传输方式下接收信号的频谱, 还发现在双负材料的通带 20.9—22.8 GHz 范围内, 时间反演传输方式下的接收信号频谱能量也得到了一定程度增强, 如图 4(b) 阴影部分所示. 产生频谱能量增强的部分原因可归结于时间反演传输对双负材料的频率色散产生的啁啾起到了有效抑制. Smith 结构是一个高色散材料, 当其放置于波导后, 加之波导色散, 系统传输的频率色散进一步增大, 在传统传输方式下, 色散的累积导致信号产生大量啁啾, 致使低频段的能量向高频段转移, 如图 4(b) 虚线尾部部分. 但是, 当啁啾被有效抑制后, 在双负材料通带范围内的频谱能量就不会向其他频段发生大量转移. 因此, 时间反演传输方式下的频谱能量要高于传统传输方式.

间段范围内, 并没有表现出良好的“时间”聚焦特性. 但是在时间反演传输方式下, 接收信号 $y(t)$ 则表现出来良好的“时间”聚焦特性, 其大部分能量集中在 $\tau_{\text{rms}} = 0.1048$ ns 的时间宽度范围, 能量相对集中.

表 1 接收信号特性

	$r(t)$	$y(t)$	比例系数/%
$\tau_{\text{rms}}/\text{ns}$	0.2705	0.1048	73.4
V_{peak}/V	0.373	0.564	50

除时间聚焦外, 时间反演电磁波在双负材料传

输过程中还表现出明显的空间聚焦现象. 沿传播 z 方向波导中心轴线看去, 空间聚焦点位于接收端口, 该处电场峰值强度达到最大. 而在双负材料内部, 各点的电场峰值强度都小于在接收端口中心位置所观测到的值. 本文中的电场峰值强度定义为

$$E_{\text{peak}}(x, y, z) = \max_t(|E(x, y, z, t)|), \quad (8)$$

式中, (x, y, z) 为观测点空间位置. 此外, 本文还对传统传输和时间反演传输两种方式下双负材料内部电场峰值强度分布进行了对比分析, 图 5(b) 为在双负材料内部观测到的峰值电场分布图, 观测位置如图 5(a) 虚线所示. 通过对比发现, 在时间反演传输方式下, 电场峰值强度 $E_{\text{peak}}(x, y = 1.6 \text{ mm}, z = 8.3 \text{ mm})$ 的各点值都比传统传输方式要小, 而且最大强度降低很明显, 相比传统传输方式减小了约 34%, 对双负材料内部的电场峰值强度分布起到了较好的均衡作用. 在双负材料内部, 空间电场峰值强度的减小和均衡分布对研究能够承受大功率的双负材料及其电子器件系统具有非常重要的意义. 如果系统使用相同的双负材料, 在保证材料不被电场击穿的前提下, 时间反演传输则能够大幅度地提高整个系统的传输功率容量; 如果系统的传输功率相同, 时间反演传输则能够大大降低材料的电场击穿可能性.

引起双负材料内部电场峰值强度减小的原因可用时间反演的时 - 空同步聚焦特性进行解释. 时 - 空同步聚焦要求各路电磁波在同一时刻到达同一位置, 才能形成相干合成叠加. 而在双负材料内部中, 由于材料以及波导色散, 不同频率的电磁波以不同的速率进行传播, 如果这些电磁波在尚未到达空间聚焦点之前, 各路电磁波是一个非相干相互作用, 所以双负材料内部的电场峰值强度小于聚焦点处的峰值场强. 同时, 由于双负材料内部空间不是时间反演电磁波的时 - 空同步聚焦点, 色散还未得到完全补偿, 于是材料内部的电磁波时域波形依然存在较大的时延、电磁能量在时域上趋向均衡分布, 这样电场的峰值强度进一步减小. 因此, 在时间反演传输方式下, 双负材料内部峰值强度值也小于传统传输模式, 见图 5(b).

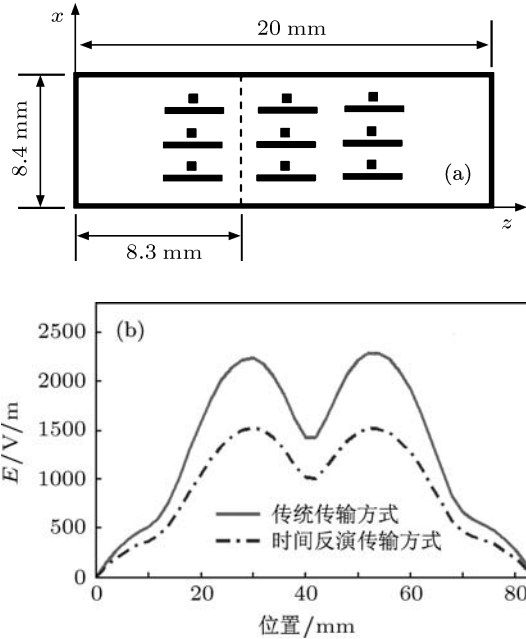


图 5 双负材料内部电场峰值强度分布对比 (a) 虚线为观测位置, 位于波导半高 $y = 1.6 \text{ mm}$ 截面内、平行于波导窄边且离波导左端口 $z = 8.3 \text{ mm}$ 的截线上; (b) 电场峰值强度在传统传输方式及时间反演传输方式下的对比图

5 结论

本文以 Smith 结构为研究对象, 对时间反演脉冲电磁波在双负材料中的传输特性进行了研究, 对比分析了脉冲电磁波和时间反演脉冲电磁波在双负材料中的传输特性, 包括透过双负材料后的时域脉冲波形、时间压缩比以及双负材料内部的空间电场分布特征等. 通过研究发现: 时间反演电磁波在透过双负材料后, 表现出显著的时间和空间能量聚焦物理现象. 并且, 在双负材料内部, 因材料色散的时延扩展和场的非相干相互作用, 空间电场峰值强度减弱并趋向均衡分布, 而且小于传统传输方式下的峰值强度. 这些新型的物理现象发现对探索发展具备新型物理特性的双负材料、电子器件、及其应用系统有重要的参考研究价值, 特别是双负材料内部电场强度减弱并趋向均衡分布这一新型物理特性, 对发展基于双负材料的高功率电子器件和系统等有非常重要意义.

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Smith D R, Schurig D 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 077405
- [3] Grzegorzczak T M, Moss C D. 2005 *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* **53** 2956
- [4] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [5] Smith D R 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [6] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [7] Shelby R A 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 489
- [8] Ozbay E, Guven K, Aydin K 2007 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **9** S301
- [9] Fink M 1992 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* **39** 555
- [10] Guo N Qiu, C M Sadler B M 2007 *IEEE Trans. Wireless Commun.* **6** 4221
- [11] Jin Y, Moura J M F, O'donoghue N 2010 *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing* **4** 210
- [12] Chen Y M, Wang B Z, Ge G D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 024101 (in Chinese) [陈英明, 王秉中, 葛广顶 2012 物理学报 **61** 024101]
- [13] Zhang Z M, Wang B Z, Ge G D, 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 098401 (in Chinese) [章志敏, 王秉中, 葛广顶 2012 物理学报 **61** 098401]
- [14] Lerosey G 2007 *Science* **315** 1119
- [15] Pendry J B 2008 *Science* **322** 71

Propagation characteristics of time reversal pulsed electromagnetic waves in double negative materials*

Zhao De-Shuang[†] Yue Wen-Jun Yu Min Zhang Sheng-Xue

(*Institute of Applied Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

(Received 22 March 2011; revised manuscript received 28 July 2011, China)

Abstract

With the full time-domain electromagnetic simulation technique, the time-domain propagation properties such as the temporal pulse waveform, the pulse compression and the electric field distribution inside the material are comparably investigated by transmitting the time-reversal pulsed electromagnetic wave and the pulsed electromagnetic wave through the double negative material of the Smith structure, respectively. The results show that after the time-reversal pulsed electromagnetic wave passes through the double negative material, the received electromagnetic wave exhibits remarkable spatial and temporal focusing at the location of the initial excitation. The most interesting physical phenomenon is that the peak values of the electric field inside the double negative material become smaller and tend to be uniform in the magnitude. These novel physical phenomena would be very helpful for developing new electronic devices and systems with double negative materials for the purpose of high power applications.

Keywords: double negative materials, time reversal, space-time focusing

PACS: 41.20.Jb, 77.22.-d, 84.40.-x

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.s 61071031, 60872029 and 60872034).

† E-mail: dszhao@uestc.edu.cn