

基于时间透镜原理实现微波信号时间反演*

丁帅[†] 王秉中 葛广顶 王多 赵德双

(电子科技大学应用物理研究所, 成都 610054)

(2011年4月16日收到; 2011年6月16日收到修改稿)

时间反演电磁学是一门新兴学科. 高效的电磁时间反演信号获取方式是时间反演技术获得应用的关键. 本文研究了一种基于时域成像原理获得时间反演微波信号的方法. 首先根据时间透镜原理, 推导出了实现波形时间反演的条件, 并对波形反演的过程进行了数值仿真. 然后设计了两种满足反演条件的啁啾电磁带隙结构来构造色散信道, 并通过实验得到了一个时隙长度为 1.5 ns 的时间反演信号. 由于啁啾电磁带隙结构与理想色散信道的差异, 实验结果中存在波形失真. 文章最后对造成失真的原因进行了分析.

关键词: 时间反演, 微波, 时间透镜, 啁啾电磁带隙

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 84.40.Ba

1 引言

时间反演电磁学是一门新兴科学, 这里所谓的反演并非让时间倒流, 而是针对一个电磁信号序列的反演变换^[1-3]. 图 1(a) 为一个微波信号 $f(t)$ 的时域波形示意图, 那么与之对应的反演信号 $f(-t)$ 的波形则可以表示为图 1(b) 的形式, 沿时间轴逐渐震荡增加. 可以看出, 电磁信号时间反演的过程类似于先入后出的堆栈操作, 信号波形在时间轴反转. 研究发现, 时间反演电磁波展示出了一些独特的物理特性, 利用时间反演技术可以实现电磁波的时间和空间同步聚焦. Carminati 等^[4] 给出了时间反演腔的严格理论证明之后, 时间反演电磁学进入了一个蓬勃发展的阶段. 2007 年, Rosny 和 Fink^[5] 首先发现了时间反演电磁波的近场超分辨率特性, 同年, Lerosey 和 Fink^[6] 的课题组设计了著名的时间反演电磁波远场超分辨率实验, 并将其成果发表在《Science》杂志上. 2008 年, 电子科技大学葛广顶等^[7,8] 对影响微结构天线时间反演超分辨率的因素进行了讨论, 并在此基础上研制出了效率更高、带宽更宽的具有时间反演超分辨率特性的平面结构天线. 由于时间反演理论研究不断深入, 时间反演电磁学在通信、医疗以及目标探测中也开始展示出了巨大的应用潜力^[9-11].

电磁信号的时间反演是整个时间反演电磁系统的核心. 一套高效、迅捷、可靠的信号反演方法能够促进时间反演电磁学走出实验室, 走向应用. 但目前电磁信号的时间反演大多由数字信号处理 (DSP) 技术实现, 但传统的模数/数模 (AD/DA) 器件通常因采样率限制不能直接处理频率为吉赫兹量级的电磁信号, 难以对高频电磁波做时间反演变换, 这成为了制约时间反演电磁学发展的主要瓶颈. 利用高端仪器可以实现高频信号的时间反演变换^[3], 但高昂的成本使其难以走出实验室. 2010 年, Zhai 等^[12] 提出了用波形合成技术实现电磁信号时间反演的方案. 这种方法能够降低 AD 器件采样率, 但目前尚处于仿真研究阶段, 还未能得到实验验证, 而且系统过于复杂, 难以直接应用. 综上所述, 高频信号的时间反演处理成了制约时间反演电磁学发展的主要瓶颈. 因此, 探索一种基于物理机理、低成本的电磁波时间反演的方法, 能够突破这一瓶颈, 使时间反演电磁学得到进一步发展.

Kolner 和 Nazarathy^[13] 于 1989 年提出了时间透镜的概念. 1994 年, Kolner^[14] 从基于麦克斯韦方程的波动方程出发, 展示了优美的时-空对偶特性, 即: 空域中波束的近轴衍射问题和时域窄带脉冲在色散媒质中的传播问题满足形式相同的复扩散方程; 时域中与时间平方成正比的相位调制对应

* 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2008AA01Z206)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20100185110021)、国家自然科学基金 (批准号: 61071031) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: E022050205, ZYGX2010J043) 资助的课题.

[†] E-mail: dingshuai_uestc@yahoo.cn

于空域中的与波束径向距离平方成正比的相位调制,由此定义出与空间薄透镜对偶的“时间透镜”,并进一步引申出了时域成像的概念. 时间透镜理论首先在光学领域中得到应用,利用光学时域成像系统,不仅能够实现时域脉冲在时间轴上的拉伸及压缩,也能够实现时域脉冲的实时傅里叶变换^[14]. 2007年,时间透镜的概念被引入到微波技术领域, Schwartz 等^[15,16]根据时间透镜原理,实现了微波信号的波形拉伸,并于2008年预言了利用这种方法能够实现微波信号的时间反演处理.

本文将对基于时间透镜理论实现电磁波时间反演的方法做进一步探索,探讨获取时间反演电磁信号的关键技术. 首先,利用数值仿真的方法对实现电磁波时间反演的条件做进一步验证. 然后,根据实现信号时间反演的必要条件,对其中的关键器件——微波啁啾延迟线进行了设计,并利用所设计的延迟线得到了一个长度为1.5 ns 电磁信号的反演波形. 最后,对造成波形失真的原因进行了分析. 利用时间透镜原理获取时间反演电磁信号能够避免由数字处理器件采样率不足带来的限制,而且其处理速度是数字信号处理技术无法比拟的. 该方法具有低成本、易集成等优点,可以突破目前制约时间反演电磁学发展的瓶颈,能为高效时间反演镜的实现提供一种有效的信号反演方法.

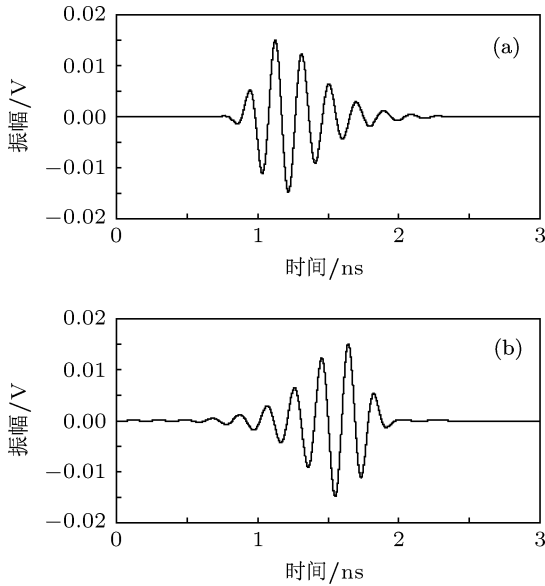


图1 原始信号与时间反演信号 (a) 原始信号; (b) 时间反演信号

2 实现电磁波波形时间反演的条件

在三维直角坐标系中,假设一束圆极化窄带时域电磁脉冲在色散媒质中以 z_0 为起始点沿 z 轴正

方向传播, x, y 方向为其极化方向. 那么这束窄带电磁脉冲在色散媒质中传播满足以下方程^[17]:

$$\frac{\partial A}{\partial \xi} = \frac{i}{2} \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2}, \quad (1)$$

式中, A 为脉冲幅度, β 为传播常数, ω 为角频率. $\xi = z - z_0$, 表示传播距离, τ 为时间. 这束电磁脉冲傍轴衍射问题则满足方程^[18]

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{i}{2k} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

式中, E 为电场强度, k 为波数. 比较方程 (1) 与 (2), 可以看出, 两者具有相似的形式, 并存在以下对偶关系:

$$i \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} \Leftrightarrow -\frac{i}{2k} \quad \xi \Leftrightarrow z, \tau \Leftrightarrow x, y. \quad (3)$$

空间薄透镜成像问题与时间透镜成像问题也存在相似的对偶关系. 空间薄透镜效应的传递函数满足以下公式^[18]:

$$t(x, y) = \exp[-ikn\Delta_0] \exp\left[i\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right], \quad (4)$$

式中, Δ_0 为透镜最大厚度, n 为折射率, f 为焦距, $\exp[-ikn\Delta_0]$ 为定值, 第二项 $\exp\left[i\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right]$ 可以看成空间的二次相位调制. 时间透镜的特征也可以描述为一种实时的相位变化, 相位变化满足以下方程:

$$H(\tau) = \exp(-i\Gamma_0) \exp\left(i\frac{\omega_0 \tau^2}{2f_T}\right). \quad (5)$$

式中 Γ_0 为相位延迟峰值, ω_0 为中心角频率, τ 为时间, f_T 为时间焦距. 式中的第二项 $\exp\left(i\frac{\omega_0 \tau^2}{2f_T}\right)$ 可以看成时间二次相位调制. 很明显, 时间透镜的传递函数与空间透镜的传递函数同样呈现对偶关系. 因此, 可以推断, 时间透镜的成像条件与空间透镜的成像条件也将成对偶关系.

表1总结了空间近轴衍射问题与窄带色散问题的对偶关系以及空间薄透镜成像与时域透镜成像的对偶关系.

表1显示, 空间透镜成像问题中, 像大小的变换尺度为

$$M_S = -d_i/d, \quad (6)$$

式中, d 为物距, d_i 为像距. 像的变换尺度与物、像在透镜前后的距离相关. 与之对偶的时间透镜成像问题中, 波形变换尺度则与信号到达时间透镜前及经过时间透镜后的色散量相关, 表示为

$$M_T = -\left(\xi_2 \frac{d^2 \beta}{d\omega^2}\right) / \left(\xi_1 \frac{d^2 \beta}{d\omega^2}\right), \quad (7)$$

ξ_1 与 ξ_2 表示电磁波在到达时间透镜前和离开透镜后的传播距离, 等式右边的分子分母分别为信号到达时间透镜前与离开时间透镜后的色散量. 很明显,

当 $M_T = -1$ 时, 即信号到达时间透镜前的色散量与离开时间透镜后的色散量相同时, 电磁波波形实现时间反演.

表 1 时-空透镜成像对偶关系

时间域		空间域
复扩散方程	$A_\xi = \frac{i}{2} \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} A_{\tau\tau}$	$E_z = -\frac{i}{2k} (E_{xx} + E_{yy})$
复扩散系数	$-\frac{i}{2} \frac{d^2 \beta}{d\omega^2}$	$-\frac{i}{2k}$
对	扩散距离变量	ξ
偶	轮廓变量	τ
关	透镜传递函数	$H(\tau) = \exp(-i\Gamma_0) \exp\left(i\frac{\omega_0 \tau^2}{2f_T}\right)$
系	透镜焦距	f_T
	成像条件	$\frac{1}{\xi_1 \frac{d^2 \beta}{d\omega^2}} + \frac{1}{\xi_2 \frac{d^2 \beta}{d\omega^2}} = -\frac{\omega_0}{f_T}$
	放大倍数	$M_T = -\xi_2 \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} / \xi_1 \frac{d^2 \beta}{d\omega^2}$

3 波形时间反演的数值模拟

设需反演的信号为 $x(t)$. 根据实现时间反演的必要条件, 我们首先需要构造两个色散信道以及一个时间透镜. 色散信道的响应函数为

$$H_1(t) = \exp(j\mu_1 t^2), \quad (8)$$

$$H_2(t) = \exp(j\mu_2 t^2). \quad (9)$$

根据电磁波波形的反演条件, 选取 $\mu_1 = \mu_2$. 信号经过时间透镜的过程其实质为一个二次相位调制过程. 通过与一个线性扫频信号相乘, 能够完成二次相位调制. 线性调频信号可以表示为

$$c(t) = \exp(j\mu_3 t^2). \quad (10)$$

(8)—(10) 式中的 μ_1, μ_2, μ_3 表示扫频系数, 单位为 Hz/s, 并且满足 $\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 0$.

$x(t)$ 经过第一个色散信道进行预色散处理, 得到预色散信号 $a(t)$, 该过程的数学表达为一个卷积操作,

$$a(t) = x(t) * \exp(j\mu_1 t^2). \quad (11)$$

将 $a(t)$ 与线性扫频信号 $c(t)$ 相乘, 得到经过时间透镜后的信号 $d(t)$,

$$d(t) = a(t) \cdot c(t)$$

$$= x(t) * \exp(j\mu_1 t^2) \cdot \exp(j\mu_3 t^2). \quad (12)$$

最后, 将 $d(t)$ 送入第二个色散信道,

$$\begin{aligned} y(t) &= d(t) * H_2(t) \\ &= x(t) * \exp(j\mu_1 t^2) \\ &\quad \times \exp(j\mu_3 t^2) * \exp(j\mu_2 t^2). \end{aligned} \quad (13)$$

将 (13) 式化简, 可以得到

$$\begin{aligned} y(t) &= 2\pi \cdot \exp[(j\mu_2/\mu_1)(\mu_2 + \mu_1)t^2] \\ &\quad \times x(-\mu_2/\mu_1 \cdot t), \end{aligned} \quad (14)$$

上式表明, 由于 $\mu_2 = \mu_1$, $y(t)$ 的包络为 $x(-t)$, 即为输入信号 $x(t)$ 的时间反演形式.

利用数值仿真软件 Matlab 能够模拟以上过程. 设 $x(t)$ 为一个载波为 5 GHz 的阶梯方波信号, 时隙宽度为 1.6 ns, 其波形如图 2(a) 所示. 当信号经过一个 $\mu_1 = 1$ GHz/ns 的全通色散信道后, 信号被展宽为 $a(t)$, 如图 2(b) 所示. 信号 $a(t)$ 与一个扫频系数为 -2 GHz/ns 的线性扫频信号相乘, 模拟信号经过时间透镜的过程, 得到如图 2(c) 所示波形 $d(t)$. 最后, 将 $d(t)$ 送入 $\mu_2 = 1$ GHz/ns 的信道后, 得到 $y(t)$. 比较图 2(d) 与 (a) 可以看出, 信号的波形已经反演.

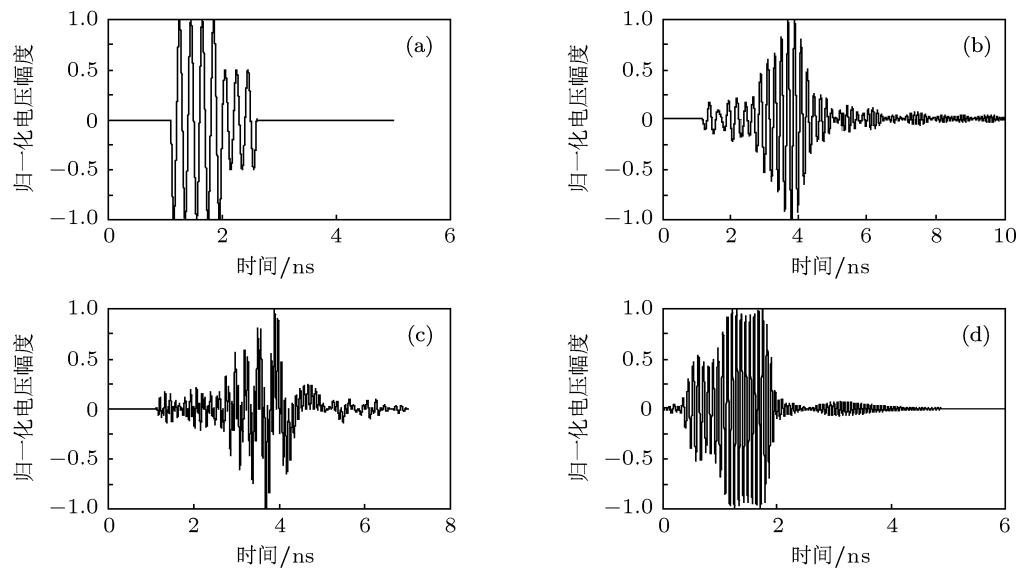


图2 数值模拟时域成像时间反演过程 (a) 输入信号; (b) 预色散后的信号; (c) 经过时间透镜后的信号; (d) 波形反演的信号

4 波形时间反演的实验验证以及讨论

图3所示为利用时域成像理论实现微波信号时间反演. 为实现波形反演, 我们设计了两种微波啁啾电磁带隙结构 (CEBG) 用于提供色散信道^[19]. CEBG 具有独特的二次相位响应特性, 能够作为一种工作于反射模式的色散延迟线使用. CEBG 的群时延斜率用 σ 表示, σ 与扫频系数 μ 为倒数关

系. 第一段 CEBG 结构用于信号的预色散处理, 满足线性群时延的频率范围为 7—9.2 GHz, 群时延斜率为 $\sigma_1 = -2$ ns/GHz. 为获得反演波形, 第二段 CEBG 结构满足线性群时延的范围为 3—6 GHz, 群时延斜率为 $\sigma_2 = -2$ ns/GHz. 两段 CEBG 结构的工作特性曲线如图4所示. 扫频信号的带宽为 1—8 GHz, 扫频系数 $\mu = -1$ GHz/ns. 实验中, 时间透镜模块由计算机仿真完成.

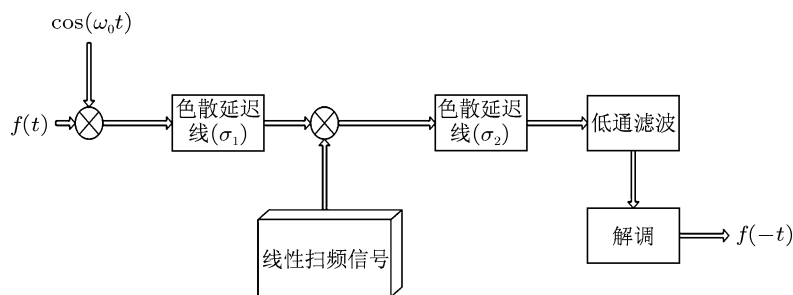


图3 利用时域成像原理实现微波信号时间反演的实验方案

首先, 我们将时隙为 1.5 ns 的锯齿波信号调制到频率为 8 GHz 的载波上, 得到如图 5(a) 所示输入信号. 利用任意波形发生器 AWG7122B 将这个信号送至第一段 CEBG 中进行预色散处理后, 被串行数据分析仪 DSA72004B 采集. 然后通过计算机实现预色散信号与 1—8 GHz 扫频信号的相乘, 得到二次相位调制信号, 并将所得信号反馈给任意波形发生器进行重新产生. 重新发射的二次相位调制信号, 送入第二段 CEBG 中, 低通滤波后得到如图 5(b) 所示波形. 与输入信号相比, 图 5(b) 中的信

号首先出现一个陡峭的上升沿, 达到峰值时开始缓慢下降. 很明显, 图 5(b) 中的信号波形与输入信号相比已经反演. 反演的基带信号可以通过解调的方式获得.

这种方法是在全电子条件下实现高频信号的时间反演, 无需对信号进行采样处理, 避免了传统 AD/DA 器件采样率的限制. 波形变换过程中所需的核心器件——微波啁啾延迟线的设计也相对简单, 而且具有小型化、易集成的优点, 其低损耗特性也决定了这种方法的高效性. 模拟信号处理技

术同时也具备实时性,这一优点也是数字信号处理技术无法比拟的.因此,时间透镜技术为时间反演镜的实现,尤其是快变信道时间反演阵列的实现提供了一种获取时间反演电磁信号的有效方法.

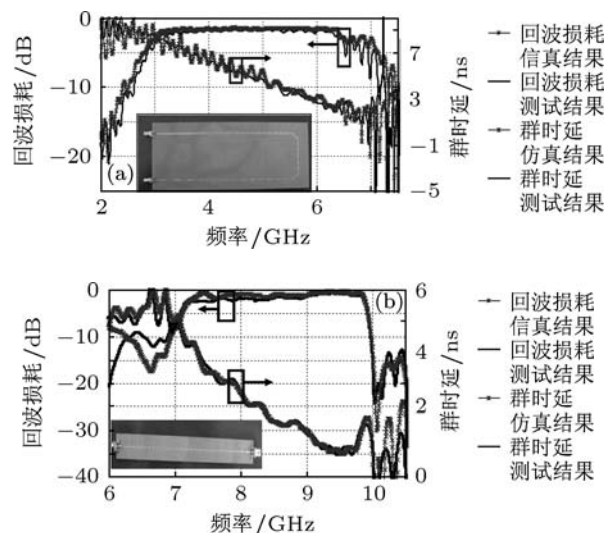


图4 两种 CEBG 结构的反射特性曲线 (a) 第一种 CEBG 的回波损耗与群时延; (b) 第二种 CEBG 的回波损耗与群时延

需要说明的是,根据 (14) 式,波形反演后的信号载波频率会发生变化,由于信号经过时间透镜后取用了差频,因此,反演后的信号载波频率会降低,这一点在图 5 中也清晰地表现出来.在通信或者雷达信号处理中,信息只搭载在基带信号中,载波只起到频谱搬移的作用,载波频率的降低不会丢失基带信号中所携带的信息.因此,理论上采用时间透镜技术获得微波时间反演信号的方法能够保留基带信号所携带信息的完整性.在信道探测中,这种方法能够保留完整的反演信道信息.

我们还应注意,反演后的波形与输入波形相比会存在失真,这种失真会使基带信号携带的信息丢失.造成波形失真的主要原因是微波 CEBG 结构构造的信道为非理想线性色散信道.通过图 4 所示的两组啁啾电磁带隙的特性曲线可以看出,所设计的两个微波啁啾电磁带隙的带内反射系数以及群时延变化都存在波动,这就会造成反演过程中信号幅度以及相位的失真.通过设计相应的幅度均衡以及

时延均衡器件能够抑制这种波形失真,尽量多地保持基带信息完整,这也是后续工作中一个亟待解决的问题.

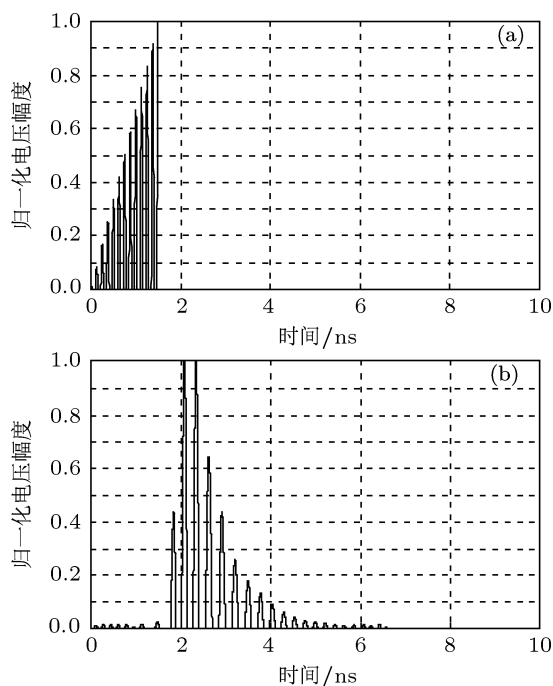


图5 输入信号波形与反演信号波形 (a) 输入信号波形; (b) 反演信号波形

5 结论

时域成像是一种基于物理机理的模拟信号处理方法.这种方法能够突破传统 AD/DA 器件采样率不足的瓶颈,实现对高频微波信号的实时压缩、拉伸以及反演变换.在微波时域成像系统中,波形变换的尺度取决于时间透镜前后的色散量之比,当时间透镜前后信道的色散量相同时,便能够得到时间反演信号.我们利用两段群时延斜率为 -2 ns/GHz 的微波 CEBG 结构实现了一个时隙长度为 1.5 ns 的微波信号的时间反演变换.在后续工作中,我们还将重点探讨更为波形失真问题的解决方法,以及更为高效的微波啁啾延迟线设计方法和长脉冲微波信号时间反演机理,为高效时间反演镜的实现提供更为迅捷、可靠的信号反演方法.

- [1] Zhou G Z, Su Z B 1980 *Acta Phys. Sin.* **30** 164 (in Chinese) [周光召, 苏肇冰 1980 物理学报 **30** 164]
- [2] Zhou G Z, Su Z B 1980 *Acta Phys. Sin.* **30** 401 (in Chinese) [周光召, 苏肇冰 1980 物理学报 **30** 401]
- [3] Fink M 1997 *Phys. Today* **50** 34
- [4] Carminati R, Pierrat R, Rosny de J, Fink M 2007 *Opt. Lett.* **32**

3107

- [5] Rosny de J, Fink M 2007 *Phys. Rev. A* **6** 065801
- [6] Lerosey G, Rosny J, Tourin A, Fink M 2007 *Science* **315** 1119
- [7] Ge G D, Wang B Z, Huang H Y, Zheng G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8249 (in Chinese) [葛广顶, 王秉中, 黄海燕, 郑罡 2009 物理学报 **58** 8249]

- [8] Ge G D, Wang B Z, Wang D, Zhao D S 2010 *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology* Chengdu, China, May 8—11, 2010 p264
- [9] Jiang Z H, Huang S X, He R, Zhou C T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 068401 (in Chinese) [姜祝辉, 黄思训, 何然, 周晨腾 2011 物理学报 **60** 068401]
- [10] Liu D H, Kang G, Li L 2005 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **53** 3058
- [11] Qiu R C, Zhou C, Guo N, Zhang J Q 2006 *IEEE Antenn. Wirel. Pr.* **5** 269
- [12] Zhai H, Sha S, Shenoy V K, Jung S, Lu M, Min K, Lee S, Ha D S 2010 *IEEE Trans. Microw. Theory* **58** 74
- [13] Kolner B H, Nazarathy M 1989 *Opt. Lett.* **14** 630
- [14] Kolner B H 1994 *IEEE J. Quantum Elect.* **30** 1951
- [15] Schwartz J D, Azana J, Plant D V 2007 *IEEE T. Microw. Theory* **55** 327
- [16] Schwartz J D, Azana J, Plant D V 2008 *IEEE Radio and Wireless Symposium* Orlando, US, January 22—24, 2008 p487
- [17] Haus H A 1984 *Waves and Fields in Optoelectronics* (Englewood Cliffs NJ: Prentice Hall) p195
- [18] Goodman J W 1968 *Introduction to Fourier Optics* (New York: McGraw-Hill) p229
- [19] Laso A G, Lopetegi T, Erro M J, Benito D, Garde M J, Murie M A L, Sorola M, Guglielmi M 2001 *IEEE Microw. Wirel. Co.* **11** 486

Realization of microwave wave signal time reversal based on time lens theory*

Ding Shuai[†] Wang Bing-Zhong Ge Guang-Ding Wang Duo Zhao De-Shuang

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

(Received 16 April 2011; revised manuscript received 16 June 2011)

Abstract

Time reversal electromagnetics is a new branch of science. The critical factor for the practical implementation of time reversal technique is to obtain time reversed signal efficiently. In this paper, based on the principle of time lens, a method of obtaining time-reversed microwave signal is studied. First, according to the principle of time lens, conditions for realizing time-reversed waveform are derived. The process for obtaining time reversed signals is simulated numerically. Then two chirp electromagnetic band gap (CEBG) structures are fabricated to construct dispersion channels. And a time reversed signal on a 1.5 ns time scale is obtained in experiment. Due to the difference between CEBG and ideal dispersion channel, there exists a distortion in the experiment results, for which the reasons are analyzed.

Keywords: time reversal, microwave, time lens, chirp electromagnetic band gap

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 84.40.Ba

* Project supported by the High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2008AA01Z206), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20100185110021), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61071031), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant Nos. E02205205, ZYGX2010J043).

[†] E-mail: dingshuai_uestc@yahoo.cn