

文章编号:1001-5078(2007)04-0359-03

基于受激光子回波的光实延时技术研究

刘 明, 是湘全

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 实延时是相控阵天线波束合成的一种重要手段, 而随着带宽和阵列单元数目的增加, 光学实延时技术的采用已成为一种重要趋势。介绍了受激光子回波的物理现象, 分析了这一现象产生的原理, 说明了光实延时的产生方法。

关键词: 受激光子回波; 实延时; 相控阵; 波束合成

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

Study of Optical True Time Delay Technique Based on SPE

LIU Ming, SHI Xiang-quan

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technolog NUST, Nanjing, 210094, China)

Abstract: A true time delay (TTD) is a mean for beam-former of phased-array Antennas. With the increment of the array number and bandwidth, the adopt of optical true time delay (OTTD) is become an important trend. The physical phenomena of stimulate photon echoes (SPE) are introduced. The principle is analyzed, and the method of how to produce OTTD is explained.

Key words: SPE; TTD; phased-array; beam-former

1 引 言

与传统天线相比, 相控阵天线具有无机械运动、高的二维扫描灵活性、准确的波束指向等诸多优点, 目前在雷达和通信等领域显得越来越重要。现代高性能雷达要求有大的扫描角和大的瞬时带宽, 但是, 基于传统移相器的相控阵雷达在进行宽角扫描时, 由于孔径渡越时间和孔径效应的限制, 使得雷达无法实现宽带宽角扫描线。为了实现相控阵雷达的宽带宽角扫描, 应该用实延时线 (TTD) 取代常规相控阵雷达的移相器。但是用传统的金属波导实现实延时具有延信号损耗大、易受电磁干扰、体积大、质量大等缺点, 而利用光学技术解决这种实延时问题已成为一种重要趋势^[1-2]。目前光实延时技术主要有两种途径, 即光波导型和自由空间光学型, 这两种实延时技术基本能解决传统金属线延时的所有缺点, 但对未来的大阵列和超大阵列天线, 光波导型在结构上仍然是比较复杂的。本文提出一种新的方法,

即利用时域光存储技术进行实延时线的构建, 在一个小的特殊光学晶体上, 可以实现多达成千上万条通道的实延时单元。

2 受激光子回波原理

受激光子回波是原子系统在三个相干光脉冲的脉冲序列共振激发下产生的光学瞬态干涉现象, 可以用于实现时域光存储^[3-5], 其具体工作过程描述如图 1 所示。两个激光脉冲分别在 $t = t_1$ 时刻和 $t = t_2$ 时刻以一定的入射夹角照射到存储材料表面, 在存储材料内部形成空间-频率光谱光栅, 如果在 t_3 时刻又有一个激光脉冲照射到存储材料表面, 入射方向与第一个激光脉冲相同, 则在 t_4 时刻沿第二个激光脉冲的方向会产生一个光脉冲, 其中

作者简介: 刘 明 (1969 -), 男, 硕士, 南京理工大学讲师, 研究方向为光电信息与雷达信号处理。E-mail: liumw@163.com

收稿日期: 2006-08-28

$t_4 - t_3 = t_2 - t_1$, 这个光脉冲就称为受激光子回波 (Stimulated Photon Echoes, SPE), 延迟时间等于两个编程脉冲时间的间隔。能够实现这一物理现象的存储材料称为光谱烧孔材料。自然界中有许多种物质可以实现光谱烧孔, 经过大量的实验证明, $\text{Er}^{3+} \text{Y}_2\text{SiO}_5$ 是一种理想的能够长时间存储空间-频率光谱光栅的掺稀土光谱烧孔材料^[6], 其非均匀加宽吸收谱线的中心波长为 $1.5 \mu\text{m}$, 而这一波长的半导体激光器很容易获得, 使系统实现更为方便。下面对受激光子回波现象进行详细的分析。

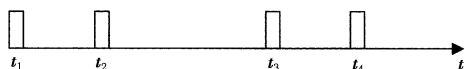


图1 受激光子回波现象(SPE)

为简单起见, 忽略失相过程的影响, 假设三个脉冲振幅相同, 偏振方向相同, 传播方向分别为 k_1, k_2, k_3 , 而 n_1, n_2 和 n_3 分别为三个传播方向的单位矢量。当 $t=0$ 时, 通过系统中 $r=0$ 处的第一个激光脉冲使系统产生受激辐射, 相应的电场强度为^[1]:

$$E_1(r, t) = E \exp[i\omega(t - \frac{n_1 r}{c})] \quad (t \geq n_1 r/c) \quad (1)$$

$t = \tau$ 时, 通过 $r=0$ 的第二个激光脉冲引起的受激辐射为:

$$E_2(r, t) = E \exp[i\omega(t - \tau - \frac{n_2 r}{c})] \quad (t \geq \tau + n_2 r/c) \quad (2)$$

E_1 与 E_2 干涉, 根据光干涉理论, 干涉的光强度 I 具体表现为:

$$I = |E_1 + E_2|^2 = |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2|E_1 E_2^*| = I_1 + I_2 + J_{12} \quad (3)$$

其中, J_{12} 称为干涉项。在满足干涉的基本条件下, 干涉项具体可以写为:

$J_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$, 其中对干涉条纹有贡献的是:

$$\cos \delta = \cos[\omega(\tau - \frac{n_1 - n_2}{c}r)] \quad (4)$$

式中, $\delta = \omega\tau - (k_1 - k_2)r$ 为两束激光的位相差。由于强度按照式(4)分布, 使空间不同位置以及非均匀线型内不同频率上的原子受到强度不同的激发, 使基态和激发态的粒子数出现空间和频率上的周期分布: $(n_1 - n_2)r$ 为常数的平面上的原子, 在非均匀线形中出现周期为 $\Delta\omega = 2\pi/(\tau - \frac{n_1 - n_2}{c}r)$ 的频率栅。一般情况下, 光传播经过整个样品的时间远小

于 τ , 即 $\tau \gg \frac{n_1 - n_2}{c}r$, 所以有 $\Delta\omega \approx 2\pi/\tau$, 而这正是两个脉冲的傅里叶变换谱。对于固定的 ω , 出现 $n_1 - n_2$ 方向周期为 $\frac{2\pi}{|k_1 - k_2|}$ 的空间栅。粒子数的周期分布引起材料的光学性质如透射率等产生周期分布, 形成透射光栅。在 $t = T$ 时刻, 通过 $r=0$ 的第三个激光脉冲使原子系统产生的受激辐射为:

$$E_3(r, t) = E \exp[j\omega(t - T - \frac{n_3 r}{c})] \quad (t \geq T + n_3 r/c) \quad (5)$$

假设激光脉冲的频谱为:

$$g(\omega) = \begin{cases} 1/\Delta, & \omega_0 - \Delta/2 \leq \omega \leq \omega_0 + \Delta/2 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

则这个受激辐射通过上面所述的频率空间透射光栅的响应为:

$$\begin{aligned} E_4(r, t) &\approx \int_{-\infty}^{\infty} E_3 \times \cos \delta \times g(\omega) d\omega \\ &= E \int_{\omega_0 - \Delta/2}^{\omega_0 + \Delta/2} \exp[j\omega(t - T - \frac{n_3 r}{c})] \cos[\omega(\tau - \frac{n_1 - n_2}{c}r)] \frac{1}{\Delta} d\omega \\ &= E [W \exp(2j\omega_0 x_1 / \Delta) \text{sinc}(x_1) + \\ &\quad \exp(2j\omega_0 x_2 / \Delta) \text{sinc}(x_2) + \\ &\quad \exp(2j\omega_0 x_3 / \Delta) \text{sinc}(x_3)] \end{aligned} \quad (6)$$

其中:

$$W = 1 + \exp[-2(\tau - \frac{n_1 - n_2}{c}r)]$$

$$x_1 = \frac{1}{2}\Delta(t - T - \frac{n_3 r}{c})$$

$$x_2 = \frac{1}{2}\Delta(t - T + \tau - \frac{n_3 + n_1 - n_2}{c}r)$$

$$x_3 = \frac{1}{2}\Delta(t - T - \tau - \frac{n_3 + n_2 - n_1}{c}r)$$

式(6)在 $t \geq T + n_3 r/c$ 的条件下成立, 可以看出, 响应是三个辛格函数包络的叠加, 由于辛格函数在零点取得极大值, 分析上面的公式可以看出, 在满足的时间范围内, 只有最后一项有极大值出现, 而出现极大值的时间为:

$$t = T + \tau + \frac{n_3 + n_2 - n_1}{c}r, \text{ 这一项称为受激光子回波。}$$

如果第一个激光脉冲与第三个激光脉冲方向相同, 则受激光子回波的方向就是第二个激光脉冲的方向。若将第一个脉冲作为写入脉冲, 第三个脉冲作为读出脉冲, 则第四个脉冲就是第二个脉冲的再现,

其与读出脉冲的延时就是前两个脉冲之间的延时,相当于是输入信号的复制。

3 受激光子回波的应用

受激光子回波现象传统上主要是应用在超高密度存储领域,可以在一个存储单元中按时间编码存储多个信息,使存储密度提高。实验已经证明,在 $\text{Er}^{3+}\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 掺稀土材料中,每个可寻址的物理地址可存储多达 64kbit 的信息,大大高于传统的存储方式^[5]。这一现象同样也可以用在相控阵雷达阵列天线的波束控制中,用于实延时线的产生。

用这种方式在同一块晶体上可以形成成千上万条光实延时线(OTTD),非常适合于宽带大阵列的相控阵天线系统的波束合成^[8],如图2所示,左边是编程方式,首先由波控计算机计算出每个天线单元的延时时间,然后用不同角度、不同延时的激光脉冲入射在晶体材料上,在晶体中产生不同的空间-频率光谱光栅。右边是应用方式,将射频信号经过光电或声光调制器调制到激光束中,经过调制的光脉冲串入射到晶体材料,就会产生多路不同延时的光脉冲串,经过各自的光电转换模块,就形成了经过延时的多路雷达信号波形,其延时关系就是编程时的延时关系。信号再经过功率放大,馈送到天线单元发射出去,就实现了波束偏转,如图3所示。这一技术同样也可以应用于接收波束的合成,这里不再介绍。

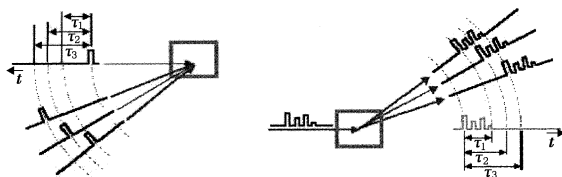


图2 光实延时线的产生方法

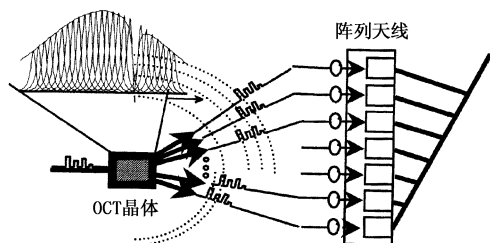


图3 利用光延时线实现波束偏转

4 结论

本文提出了一种全新的产生光实延时线(OTTD)的方法,即利用光学瞬态干涉中的受激光子回波现象的一个方向,可以同时产生成千上万条光延时线,在 $\text{Er}^{3+}\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 掺稀土材料中,延时的最

长时间可以达到 $10 \sim 100\mu\text{s}$,如果编程脉冲采用线性调频信号进行调制^[9-10],通过精确控制信号的起始频率,在步进频率小于 10kHz 时,延时精度可以达到 100ps 以下,可以部分甚至全部取代阵列天线中的移相器和实延时线。随着微波光子集成技术的发展,甚至可以将光电转换模块与天线集成,形成全光控制的大阵列相控阵雷达。

参考文献:

- [1] Edward I Ackerman, Charles H Cox. RF Fiber-Optic link performance[J]. IEEE microwave magazine, 2001: 50 - 57.
- [2] B L Anderson, S A Collins, et al. Optically produced true-time delays for phased antenna arrays[J]. Applied Optics, 1997, 36(32): 8493 - 8503.
- [3] 黄菁,唐志列,梁瑞生. 光谱烧孔技术[J]. 光学技术, 2000, 26(4): 379 - 382.
- [4] 刘青,刘卜,等. 三维光数据存储技术[J]. 宁夏大学学报, 2002, 23(4): 326 - 329.
- [5] 窦凯,靳春明,张家骅,等. 光谱烧孔介质中位相编码的时域全息[J]. 科学通报, 1996, 41(8): 761 - 763.
- [6] Todd Louis Harris. Erbium-based optical coherent transient correlator for the $1.5\mu\text{m}$ communication bands[D]. Phd Dissertation, 2001.
- [7] M Tian, R Reibel, R Babbitt. Demonstration of broadband true-time delay with optical coherent transients[J]. 0 - 7803 - 7003 - 1, IEEE 2001: 223 - 226.
- [8] Y Liu, J Yao, J L Yang. Wideband true-time-delay beam former that employs a tunable chirped fiber grating prism[J]. Applied Optics, 2003, 42(13): 2273 - 2277.
- [9] RF photonics for array processing[R]. MURI second annual report, November, 1999.
- [10] E Fotheringham. Microwave signal processing with photorefractive dynamic holography[M]. Phd Dissertation, 2003.

更正

本刊 2007, 37(3): 275. 作者单位应为:
北京有色金属研究总院, 北京国晶辉红外
光学科技有限公司, 北京 100088;
General Research Institute for Nonferrous
Metals, Beijing Guojing Infrared Optical Technolo-
gy Co., LTD, Beijing 100088, China