

Research on Grating Delay Line Beamforming Network in Optically Controlled Phased Array

Hongxia Guo, Shanxiang Mou

School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu
Email: yzbll@njust.edu.cn

Received: Jun. 30th, 2018; accepted: Jul. 13th, 2018; published: Jul. 20th, 2018

Abstract

This article focuses on the use of the delay characteristics of the grating to achieve beamforming of an optically controlled phased array radar antenna. Two kinds of grating-based delay arrays are designed and verified by experiments. Finally, beam scanning of the light-controlled phased array is obtained. The test results show that both delay arrays have their advantages and disadvantages. Considering comprehensively, Option 2 is better than Option 1.

Keywords

Fiber Delay Line, Fiber Grating Delay Technology, Optically Controlled Phased Array Radar, Beamforming Network

光控相控阵光栅延迟线波束形成网络研究

郭红霞, 牟善祥

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京
Email: yzbll@njust.edu.cn

收稿日期: 2018年6月30日; 录用日期: 2018年7月13日; 发布日期: 2018年7月20日

摘要

本文着重介绍了利用光栅的延迟特性实现光控相控阵雷达天线的波束形成。设计了两种基于光栅的延迟阵列, 并分别进行了试验验证, 得到光控相控阵的波束连续扫描, 试验结果表明这两种延迟阵列各有利弊。综合考虑, 方案2优于方案1。

关键词

光纤延迟线, 光纤光栅延迟技术, 光控相控阵雷达, 波束形成网络

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高性能相控阵雷达要求波束扫描范围大、波束无偏斜、传输频带宽。而目前相控阵雷达波束控制网络中拥有大量的微波移相器、连接电缆和功率分配器, 导致其体积大, 射频带宽窄, 质量重, 温度特性差, 严重限制了相控阵雷达在很多实际场景中的应用[1]。实时延迟技术是满足相控阵雷达性能要求的关键技术。传统的实时延迟技术如: 同轴电缆延迟线、声表面波(SAW)延迟线、电荷耦合器件(CCD)均不能满足需要[2]。随着光纤通信技术的飞速发展, 各种激光光源、光探测器、光调制器、光开关等光纤有源及无源器件已经商品化, 光控相控阵雷达应运而生[3]。相控阵雷达是通过改变天线各发射单元驱动信号的相位来控制波束指向, 而光控相控阵雷达是利用光纤延迟线代替微波移相器实现波束扫描控制, 其延时损耗低、尺寸小、质量轻、柔软易装配[4], 同时由于雷达信号带宽相对于光载波频率极小, 使得光纤传输链路具有稳定的传输特性。

2. 光栅延迟线的基本原理及其优点

利用光纤或光纤器件作为传输介质, 通过控制光纤的长度或者控制光纤器件的传输特性, 从而改变光信号在介质中的传输时间[5], 这就是光纤延迟线的基本原理。本文所研究的光纤延迟线指包含光源、光电调制器、传输介质(光纤/光纤器件)和光电探测器等具有信号延迟功能的光纤组合器件, 如图1所示。

带有微波射频信号的光信号耦合进延迟线链路中, 经过特定的时间 T 进入光探测器, 然后将光信号转换成与原输入微波信号频率相同的电信号输出。总体上看, 输入的微波信号搭载光信号经由光纤延迟链路延迟了一段时间 T , T 的大小由光纤链路[6] [7]的长度或光纤器件的传输特性决定。

若延迟线链路为光纤链路, 设光纤的长度为 L , 折射率为 n , c 为真空中光速, $v = c/n$ 为群速度, 则延迟时间表达式

$$T = \frac{L}{v} = \frac{Ln}{c} \quad (1)$$

若延迟线链路为啁啾光纤光栅链路, 啁啾光栅是指周期沿光栅轴向长度逐渐变化的光栅光纤, 光栅本身也是一种光纤, 其不同之处在于特定波长的光在经过光纤光栅后, 将会被反射回来。光波在啁啾光纤光栅中传输所引起的延时为:

$$T = \frac{2n_{eff}}{c}(z + L/2) \quad (2)$$

式(2)中, L 为光纤光栅的长度, n_{eff} 是光纤光栅的有效折射率。不同波长的光波经过啁啾光栅(啁啾系数为 C), 延迟时间不等, 其延迟时间差为:

$$\tau = \frac{2n_{eff}}{Cc} \Delta\lambda \quad (3)$$

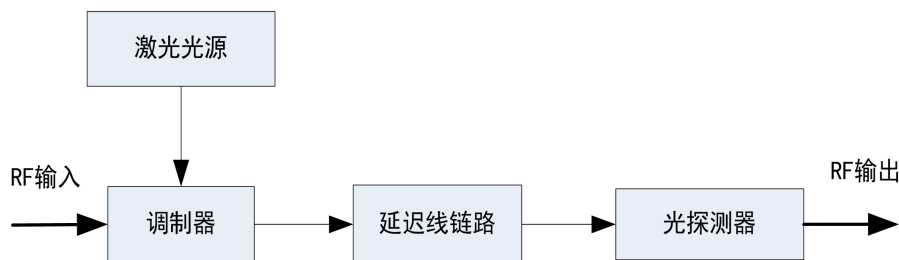


Figure 1. Basic schematic diagram of fiber delay line

图 1. 光纤延迟线基本示意图

由式(1)和(2)可以看出, 延迟链路的实质是利用光纤的长度或者光器件的性能调节光信号的光程。用光纤链路实现延迟网络, 结构虽然简单, 但存在着两个缺点: 1) 难以实现延时可调; 2) 大的延时需要很长的光纤。而光纤光栅作为光延迟器件, 可以解决以上问题。

实际上, 光栅延迟线应用于雷达系统, 有很大的优势: 光纤光栅延迟线具有很高的延时带宽积, 应用于光控阵列, 有好的频率测量分辨能力、高的灵敏度和信号截获能力; 可以实现高的射频频率; 具有与频率无关的恒定单位延时的损耗; 相比于其他类型的延迟线更易于集成。

3. 光控相控阵波束形成原理

由光纤延迟线的基本示意图(图 1), 在光控相控阵雷达天线系统中, 每个天线阵元完成空间微波信号接收后, 通过电/光变换将微波信号调制到光载波上, 载有射频信号的光信号经过光纤链路得到相应的延时, 控制相控阵天线波束扫描。

在一个光波束形成网络中, 假设微波频率为 f , 那么对应这段光纤长度(l)所带来的微波相移为

$$\varphi = 2\pi f \cdot \tau = 2\pi f \cdot \frac{n \cdot l}{c} \quad (4)$$

从式(4)中可知对于一个固定的相移值, 微波频率越高, 所需光纤长度越短。当平面波从空间 θ_B 方向入射到天线阵面时, 微波信号到达相邻天线阵元的空间长度差为

$$\Delta L_{\theta_B} = d \sin \theta_B \quad (5)$$

其中 d 为相邻天线阵元的间距。为了让相邻阵元接收的平面波经过光纤延迟线到达合波点的时间相等, 则相邻延迟线的长度差为

$$\Delta l = \frac{d \sin \theta_B}{n} \quad (6)$$

因为不同阵元接收的空间平面波到达合波点的时间是相等的, 故存在第 M 个阵元接收的时延为:

$$\tau = \frac{(M-1) \cdot d \sin \theta_B}{c} \quad (\text{常量}) \quad (7)$$

则相邻阵元之间接收的空间平面波到达合波点的时间差为:

$$\Delta \tau = \frac{d \sin \theta_B}{c} \quad (8)$$

我们知道, 传统相控阵中微波移相器主要是电移相器, 均匀分布的相控阵天线阵列线阵方向图可表示为:

$$\begin{aligned}
 F(\theta) &= \sum_{i=0}^{N-1} a_i \exp\left(ji\left(\frac{2\pi}{\lambda}d \sin\theta - \Delta\phi_B\right)\right) \\
 &= \sum_{i=0}^{N-1} a_i \exp\left(ji\left(\frac{2\pi}{\lambda}d \sin\theta - \frac{2\pi}{\lambda}d \sin\theta_B\right)\right)
 \end{aligned} \tag{9}$$

由式(9)可以得到在一个波束形成网络中, 只需要改变或者通过计算机编程控制每一个天线单元的幅值和相位 (a_i, ϕ_i) , 就可以得到期望的波束指向。式(9)中阵内相移值 $\Delta\phi_B$ 通常由电移相器提供, 最大波束指向 θ_B 可表示为:

$$\theta_B = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi d} \cdot \Delta\phi_B\right) \tag{10}$$

光控相控阵雷达就是使用光延迟网络代替了电移相器, 实现波束偏转。均匀分布的光控相控阵天线阵列线阵方向图可表示为:

$$\begin{aligned}
 F(\theta) &= \sum_{i=0}^{N-1} a_i \exp\left(ji\left(\frac{2\pi}{\lambda}d \sin\theta - \Delta\tau\right)\right) \\
 &= \sum_{i=0}^{N-1} a_i \exp\left(ji\left(\frac{2\pi}{\lambda}d \sin\theta - \frac{d \sin\theta_B}{c}\right)\right)
 \end{aligned} \tag{11}$$

式(11)中, 阵内相移值 $\Delta\phi_B$ 被相邻延时状态之间的延时差替代。天线波束存在最大指向 θ_B 可以表示为:

$$\theta_B = \arcsin\left(\frac{\Delta\tau \cdot c}{d}\right) \tag{12}$$

基于光延迟移相的光控相控阵通过改变延迟线延迟步进 $(\Delta\tau)$ 就可以实现空间波束的偏转扫描。

4. 光栅延迟线波束形成网络设计仿真

光纤延迟线的结构按分支的形式可分成循环光纤延迟线[8]和抽头光纤延迟线[9]。根据这两种结构, 我们设计了基于线性调频光栅延迟阵列的两种方案。并分别进行了试验验证。

4.1. 光栅延迟线波束形成网络结构设计

方案一, 我们采用线性调频光纤光栅和光开关联合设计 4 通道延迟阵列, 实现延时误差为 0.5 ps, 波束指向延迟误差为 0.573°, 工作在 X 波段, 延迟时间为 0~124 ps 不等。方案一结构见图 2 所示, 由 8 个串接的线性调频光纤光栅实现不同波长光源的延时, 光开关实现二级延时补偿。可调谐激光器产生可调谐激光阵列, 调节输入光源的波长间隔即可得到不同的延时阵列, 实现光控相控阵天线波束扫描。此方案可实现波束连续扫描。

方案一特点是: 1) 结构比较固定, 设计 4 通道延迟阵列需设计出符合要求的光纤光栅, 结构比较简单, 但是方案不具有可拓展性, 如果要改变天线阵列指标, 就得重新设计新的光栅, 实际应用受到很大限制; 2) 利用光开关做二级延时补偿, 每条支路带有的固定延时不同, 系统误差不易控制。

为了克服方案一存在的问题, 我们提出一种更简便的光栅延迟线结构(图 3)。方案二也是由光开关、线性调频光栅所构成, 但其突出优势是系统结构可编程、可拓展。2 * 2 光开关可使波长循环经过线性调频光栅得到大时间延迟。在高速可调谐激光器的作用下, 该系统可实现可调渐进的时延步长。

方案二可实现延时误差为 0.4 ps, 波束指向延迟误差为 0.458°, 工作在 X 波段, 延迟时间为 0~544.398 ps 不等。可见方案二相比于方案一延时误差有所降低, 延时范围大大增加。方案二的特点在于: 1) 结构复杂性降低, 不需要光开关的二次时延补偿; 2) 结构可拓扑, 实用性能提高, 通过控制光开关即可实现不同次数的循环, 可得到大的时延; 3) 对线性调频光栅的性能要求减小, 成本降低。

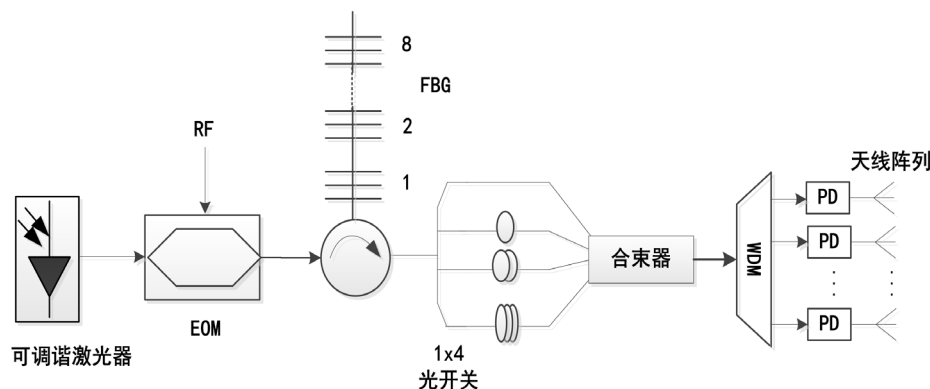


Figure 2. Linear FM grating delay line beamforming network (EOM: electro-optic modulator; FBG: fiber Bragg grating; WDM: wavelength division multiplexer; PD: photodetector)

图 2. 线性调频光栅延迟线波束形成网络(EOM: 电光调制器; FBG: 光纤布拉格光栅; WDM: 波分复用器; PD: 光电探测器)

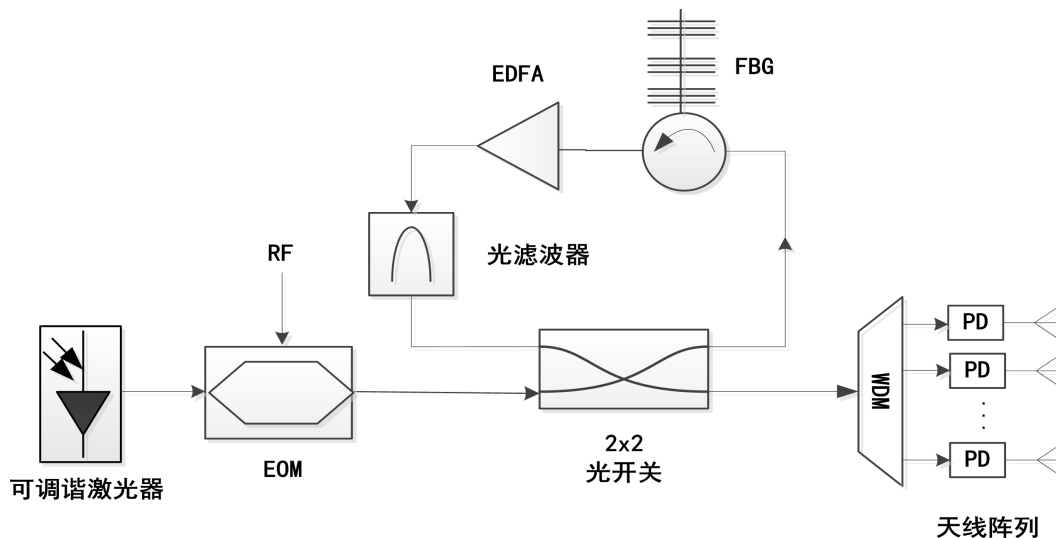


Figure 3. Linear FM grating cyclic delay line beamforming network (EDFA: Erbium doped fiber amplifier compensates for losses in the loop, guaranteeing the cycle times)

图 3. 线性调频光栅循环延迟线波束形成网络(EDFA: 掺铒光纤放大器, 补偿环路中的损耗, 保证循环次数)

4.2. 试验结果分析

对上诉两种方案进行试验验证。我们选取光源波长范围为 1547.72 nm~1553.33 nm, 波长间隔为 0.8 nm 的 8 个不同波长。方案一可实现 5 bit 延迟阵列, 可得到 $2^5 = 32$ 种不同延时状态; 方案二为了测试方便, 选取 2 次循环, 可得到 16 种延迟状态。为了方便对两种方案进行比较, 我们选取参数一致的线性调频光纤光栅, 选取方案一中前两个通道进行试验测试。

在光学软件 Optisystem 中进行两个方案的模拟仿真, 得到方案一中 1 * 4 光开关的第 00 和 01 支路共 16 种延时状态; 同样测试可得方案二两次循环后 16 种延迟状态, 两种方案延时步长分布如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 方案一由于采用二级延时补偿, 所设计的延迟步长线性度很好, 但相比于方案二其延时范围小很多。事实上, 方案二随着循环次数增多, 延迟步进线性度也会得到明显改善。

我们用试验得到的延迟步长进行光控相控阵波束形成网络测试仿真。假设相控阵接收天线工作于宽带发射状态, 工作频率 $f_c = 10\text{ GHz}$ ($\lambda_c = 30\text{ mm}$), 波束处于最大偏转角时空间不出现栅瓣, 天线阵元间

距取为 $d = \lambda_c/2 = 15 \text{ mm}$ 。

方案一和方案二实现的光控相控阵天线波束扫描方向图见图 5 和图 6。从图中可以得到两种方案均可实现波束 $\pm 60^\circ$ 的扫描。

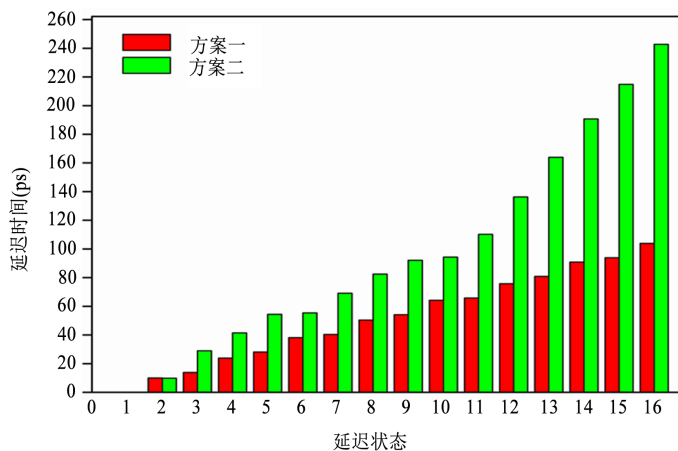


Figure 4. Time-delay state step distribution of the two schemes

图 4. 两种方案延时状态步长分布图

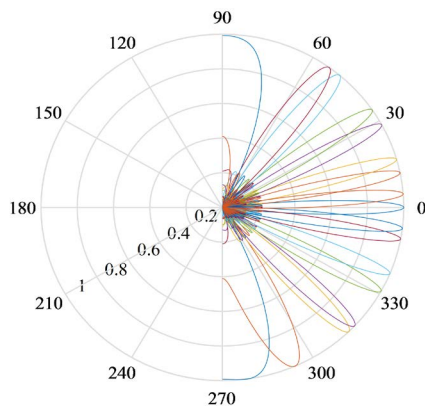


Figure 5. Simulation diagram of scheme 1 continuous beam scanning

图 5. 方案一波束连续扫描仿真图

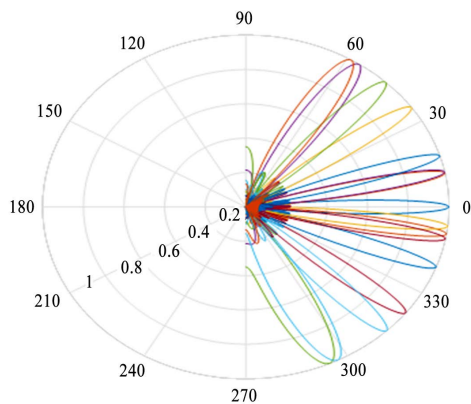


Figure 6. Simulation diagram of scheme 2 continuous beam scanning

图 6. 方案二波束连续扫描仿真图

5. 总结

本文着重介绍了利用光栅延迟线实现光控相控阵雷达的波束连续扫描, 提出两种基于线性调频光栅延迟线的波束形成方案, 并分别进行了试验验证。从试验结果和实际应用需求可以看出两种方案各有利弊, 如果设计需求确定, 可考虑方案 1, 结构更简单; 但综合考虑, 方案 2 优于方案 1, 延迟精度更高, 结构可拓扑。随着光电子器件的发展, 这两种方案更利于集成化、性能更优。

致谢

这项工作得到了中国国防科学技术进步研究计划的支持(No.403040101)。

参考文献

- [1] 廖先炳. 光纤延迟线及其应用[J]. 军事通信技术, 1992(1): 29-38.
- [2] 解安国, 薛余网, 郭建文. 微波光纤延迟线技术研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2002(4): 1-5.
- [3] 邱绍峰, 范戈. 光纤延迟线在雷达信号处理中的应用[J]. 光学技术, 2003, 29(4): 000429-000433.
- [4] 郭葆玲. 光控相控阵雷达中的光纤延迟线[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2007(5): 34-37.
- [5] 张春熹, 张晓青, 胡妹玲. 光纤延迟线应用研究动态[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2234-2244.
- [6] 邓浩. 基于光控相控阵雷达的光纤延迟线关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [7] 周建华, 任国荣, 杨健君, 等. 啁啾光纤光栅延迟线在光控相控阵雷达中的应用研究[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(1): 33-36.
- [8] Yao, J. and Zhang, J. (2014) Time-Stretched Sampling of a Fast Microwave Waveform Based on the Repetitive Use of a Linearly Chirped Fiber Bragg Grating in a Dispersive Loop. *Optica*, 1, 64. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.1.000064>
- [9] 李希明, 黄鹏飞. 多抽头宽带光纤延迟线的设计与分析[J]. 光电技术应用, 2012, 27(1): 45-48.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org