

## Characteristic Analyses of the Spectra of Fiber Gratings and Antenna Patterns of Radar

ZHANG Xuanyu<sup>1\*</sup>, ZHU Congcong<sup>2</sup>, ZHOU Chuanrui<sup>1</sup>

(1. Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing Jiangsu 210039, China;

2. The First Military Representative Office in Nanjing of the Military Representative Bureau, Equipment Development  
Department of the Central Military Commission, Nanjing Jiangsu 210007, China)

**Abstract:** Fiber gratings play important roles in area of radar, meanwhile, the reflection spectra of fiber Bragg gratings and the antenna patterns of radar also have certain similarities, such as, the apodization to the fiber gratings spectrum and the weighting to the antenna pattern have similar effects, both are to suppress the side lobes or minor lobes of the signals. Simulations to the reflection spectra of the fiber Bragg gratings, such as uniform gratings, phase-shifted gratings, apodized gratings and chirped gratings are conducted, based on the coupled mode theory. At the same time, according to the structure models of above gratings, the models of the unidimensional array radar are established, and analyses and simulations to the antenna patterns of the corresponding arrays are conducted. The simulations show that related structures have the effects of modulation to the array pattern, such as suppressing the minor lobes. The research contents could promote the achievement transformation and the interdisciplinary development in areas of fiber optics and radar.

**Key words:** fiber Bragg gratings; array radar; reflection spectrum; antenna pattern

EEACC: 6135; 6310

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2023.01.015

## 光纤光栅光谱与雷达方向图特性分析

张轩宇<sup>1\*</sup>, 朱聪聪<sup>2</sup>, 周传睿<sup>1</sup>

(1. 南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039;

2. 中央军委装备发展部军事代表局驻南京地区第一军事代表室, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 光纤光栅在雷达领域发挥着重要作用, 与此同时光纤 Bragg 光栅的反射光谱和雷达方向图间也存在一定的相似性, 如光栅的光谱切趾和雷达的方向图加权有类似的作用, 都是为了抑制信号的旁瓣或者副瓣。基于耦合模理论对均匀光栅、相移光栅、切趾光栅、啁啾光栅等光纤 Bragg 光栅的反射光谱进行了仿真分析, 同时, 根据上述光栅的结构模型, 构建了一维阵列雷达模型, 并对相应阵列的方向图进行了分析和仿真。仿真结果表明, 相关构型能够起到方向图调制的效果, 如实现对副瓣抑制的效果等。研究内容促进了光纤光学和雷达领域的相关成果转化和交叉学科发展。

**关键词:** 光纤 Bragg 光栅; 阵列雷达; 反射谱; 方向图

中图分类号: TN957.2; TN253

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2023)01-0085-05

光纤光学在雷达的天线系统<sup>[1]</sup>、波束扫描<sup>[2]</sup>、延时控制<sup>[3]</sup>和馈电电路<sup>[4]</sup>等方向发挥着重要作用, 由于其广泛的应用, 持续得到各领域研究人员的关注。光纤光栅<sup>[5]</sup>作为光纤光学的重要组成部分, 由于具备优异的光谱编辑和定制能力从而拥有独特的延时特性, 在雷达延时控制等领域发挥着无与伦比的优势, 在新兴的光控阵雷达和微波光子雷达中应用广泛, 解决了一系列关键性问题。基于光纤光栅与雷达间存在千丝万缕的关系, 本文从光纤 Bragg 光栅的反射光谱和雷达的方向图角度出发, 展开了相关的仿真分析。首先对均匀光栅、相移光栅、切趾光栅和啁啾光栅的反射谱开展了仿真分析, 随后根据上述光栅的结构构

型, 构建了类似结构的一维阵列雷达模型, 并对其方向图进行了仿真分析。仿真结果表明雷达领域常用的泰勒加权可有效改善光纤光栅的反射谱旁瓣, 同时, 特殊构型的啁啾阵列有助于压制方向图的副瓣水平。由于光纤光学<sup>[6]</sup>和雷达<sup>[7]</sup>领域所关注的对象本质上都是电磁波, 二者在相关技术分析和处理方面存在可互相借鉴的地方, 本文旨在借此分析, 促进光纤光学和雷达领域相关技术的发展。

### 1 理论模型

#### 1.1 Bragg 光栅耦合模理论

光纤是利用全反射的原理实现光波定向传播的

导波器件,折射率未受调制的均匀光纤,当光波在纤芯中传输时,模场是稳定的,可通过麦克斯韦方程组对其中的光波模式进行分析。当光纤纤芯折射率受到外界周期性调制,引起前向传输的纤芯模和后向传输的纤芯模之间产生耦合时,会引起 Bragg 谐振,谐振波长的位置及光栅反射光谱可由耦合模方程解出。简化后的耦合模方程如下所示<sup>[5]</sup>:

$$dF(z)/dz = jF(z)k_s + jB(z)ke^{-j2\delta z + j\varphi} \quad (1)$$

$$dB(z)/dz = -jB(z)k_s - jF(z)k^*e^{j2\delta z - j\varphi} \quad (2)$$

式中: $F(z)$ 和 $B(z)$ 分别是前向和后向传播模式的振幅, $\delta = \beta - \pi/\Lambda$ , $\beta$ 是传播常数, $\Lambda$ 是光栅周期, $k_s$ 是模式的自耦合系数, $k^*$ 和 $k$ 是模式的互耦合系数, $\varphi$ 是光栅中引入的相移。

当光纤纤芯受到的折射率调制不再是线性或者均匀分布时,式(1)、式(2)难以获得解析解,而可以通过将光栅区域分割成多段,将每段等效为均匀光栅的方式,利用数值方法获得整段光栅的反射光谱<sup>[5]</sup>。

$$\begin{bmatrix} F \\ B \end{bmatrix} = T_m T_{m-1} \cdots T_i \cdots T_1 \begin{bmatrix} F_0 \\ B_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $T_i$ 是第 $i$ 段光栅对应的传输矩阵。在一般条件下,根据初始条件 $F_0 = 1$ 和 $B_0 = 0$ ,可获得整段光栅的反射率 $R = |B/F|^2$ 。

对于均匀光纤 Bragg 光栅而言,当 $k^2 > \delta^2$ , $s = \sqrt{k^2 - \delta^2}$ ,光栅长度为 $L$ 时,其反射率可由下式表示<sup>[5]</sup>:

$$R = \frac{kk^* \sinh^2(sL)}{s^2 \cosh^2(sL) + \delta^2 \sinh^2(sL)} \quad (4)$$

## 1.2 阵列方向图合成理论

对于雷达发射方向图而言,其是由各个阵元辐射的电磁波在远场相干叠加而成,因而,根据各个阵元辐射的信号,可获得一维阵列雷达的方向图解析表达式。

假设将雷达阵列的第一个阵元作为相位参考,波束指向阵列法向,阵元增益各向同性,在空间中某一远场点,其与阵列的法向夹角为 $\theta$ ,则第 $n$ 个阵元对空间电场叠加的贡献度为 $A_n e^{j(n-1)kd \sin \theta}$ , $N$ 个阵元在空间中相干叠加获得的电场为<sup>[8]</sup>:

$$E(\theta) = \sum_{n=1}^N A_n e^{j(n-1)kd \sin \theta} \quad (5)$$

式中: $A_n$ 是阵元激励, $k = 2\pi/\lambda$ 是传播常数, $\lambda$ 是辐射电磁波波长, $d_n$ 是阵元间距。

对于阵元激励 $A_n = 1$ 的均匀线阵而言,其电场强度方向图可由下式表示<sup>[8]</sup>:

$$G(\theta) = |E(\theta)| = \left| \frac{\sin[(Nkd/2) \sin \theta]}{\sin[(kd/2) \sin \theta]} \right| \quad (6)$$

## 2 光栅光谱

本文借助于上述耦合模理论,仿真获得了均匀光栅、相移光栅、切趾光栅和啁啾光栅的反射光谱,光纤 Bragg 光栅的结构示意图如图 1 所示,由于受到折射率调制,前向传输的纤芯模和后向传输的纤芯模之间发生耦合,图中 $\Lambda$ 是光栅周期, $L$ 是光栅长度。

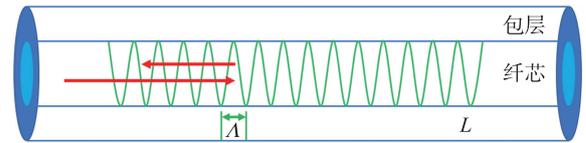


图 1 光纤 Bragg 光栅结构示意图

光纤 Bragg 光栅通常通过准分子激光、飞秒激光等激光光源,利用相位掩模板<sup>[9]</sup>或者逐点直写<sup>[10]</sup>的方式在光纤纤芯中形成周期性折射率调制,从而引起前向传输的纤芯模和后向传输的纤芯模之间的耦合效应,并形成后向 Bragg 反射光谱。

如上所述,利用耦合模理论仿真获得光纤 Bragg 光栅的反射光谱,均匀、相移、切趾和啁啾等光栅采用的光栅长度均为 1 cm,纤芯折射率为 1.448,折射率调制强度均为 0.000 1,Bragg 光栅反射谱中心谐振波长在 1 550 nm 左右。仿真得到的光谱如图 2 所示。

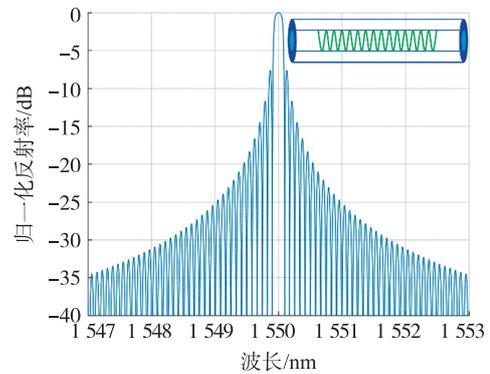


图 2 均匀光纤 Bragg 光栅反射光谱

图 2 展示了均匀光纤 Bragg 光栅的反射谱及结构示意图,从其反射谱中可看出,在 Bragg 谐振波长对应的主峰旁,有较高的旁瓣,这对其在光栅传感领域的复用解调、光纤激光领域的激光受激输出或者雷达领域的多波长光栅延时<sup>[11]</sup>等诸多应用造成了不利的影响,通常采用切趾的方式压制反射谱中的旁瓣强度,提升光纤光栅在多项应用中的性能。

相移光纤 Bragg 光栅的反射谱展示在图 3 中,从图 3 中的结构示意图可看出,相移光栅是在光栅区域的折射率调制不连续,形成了相位突变,从而在

光栅的反射谱中形成了凹口,通过调节相移量可实现凹口位置的调谐,这里光栅引入的相移量为  $\pi$ ,其在光栅反射谱的中心附近形成了一个凹口。同时,可通过调节相位突变个数,实现凹口数量的调谐。相移光纤光栅在雷达及通信领域也发挥着重要作用,如其在微波光子学中的纤载射频链路性能提升、超宽带技术等方面发挥着积极的作用<sup>[12]</sup>。

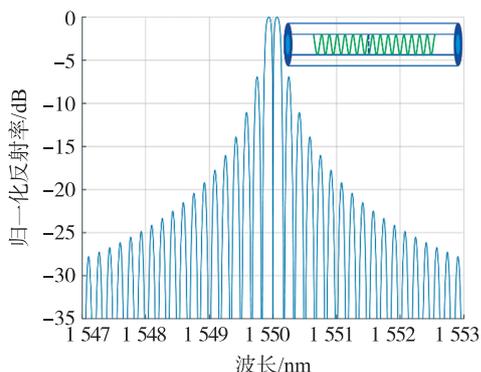


图 3 相移光纤 Bragg 光栅反射光谱

如前所述,由于均匀光纤 Bragg 光栅反射谱具有较高的旁瓣,极大地影响其性能发挥,切趾光纤 Bragg 光栅通过对光栅结构的强度进行调制,如图 4 中的结构示意图所示,其减小光栅两端折射率调制强度的突变,实现旁瓣的抑制,这与雷达的副瓣抑制是类似的。这里运用了雷达领域常用的泰勒权<sup>[13]</sup>,其在光纤光栅领域并不常用,从图 4 中的反射光谱可看出,通过泰勒权进行切趾可使得 Bragg 光栅的反射谱旁瓣得到明显的抑制。

啁啾光纤 Bragg 光栅通过逐渐改变光栅调制区域的折射率调制间隔,即光栅的周期,实现光栅光谱的扩展,如图 5 中的反射光谱及插图所示,这里采用的光栅啁啾系数为  $6 \times 10^{-9}$ 。啁啾光纤 Bragg 光栅除在光纤传感和光纤通信领域得到广泛的应用外,在雷达领域也发挥着重要的作用,由于传统雷达受到孔径渡越等效应的影 响,限制了大带宽雷达的应用。而由啁啾光纤光栅构成的延时线可实现时延的连续

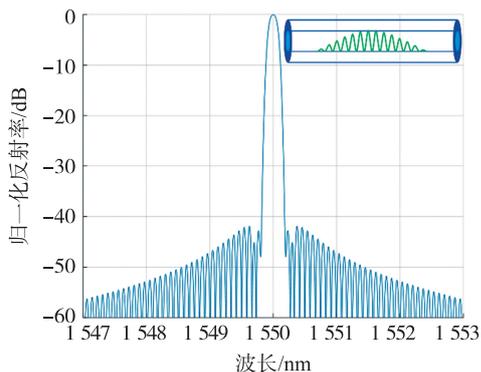


图 4 切趾光纤 Bragg 光栅反射光谱

变化<sup>[14]</sup>,实现对雷达的真延时,使微波光子学雷达等大带宽雷达的性能得以充分发挥。

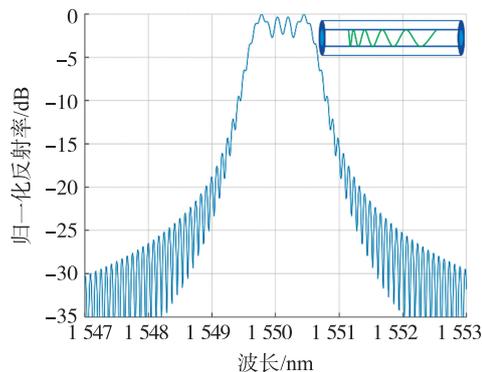


图 5 啁啾光纤 Bragg 光栅反射光谱

### 3 阵列方向图

上文对典型的光纤 Bragg 光栅的反射光谱进行了仿真计算,并对其特性开展了分析和讨论。本节基于上述提出的光纤 Bragg 光栅的结构,对具有类似结构形式的一维阵列雷达的方向图开展了仿真分析。

基于阵列天线的波束合成示意图如图 6 所示,图中  $d$  是单元间距, $M$  是阵列单元数,通过对天线单元施加合适的相位,其辐射的电磁波在远场可合成具有指向性的电磁波,从而可实现对目标的探测。通过调节天线单元幅度和相位,实现对天线方向图的调制,产生特定的波束形状。同样,由于天线收发性能具备互易性,对于回波信号可通过数字波束形成等对幅度或者相位进行加权实现接收波束的数字化控制。

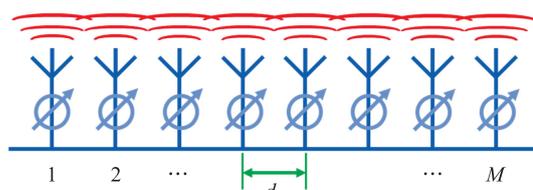


图 6 一维阵列天线波束合成示意图

这里,根据上述光纤 Bragg 光栅的相关结构,构造了均匀、相移、切趾和啁啾雷达阵列,并对其合成方向图进行了仿真。其中,阵列中天线单元数  $M$  为 100 个,单元间距  $d$  为电磁波波长的一半,电磁波的频率为 10 GHz。

和均匀光纤 Bragg 光栅有较强的旁瓣类似,均匀线性阵列的方向图如图 7 所示,由于阵列均匀的电场激发在空间中合成时生成较强的副瓣电平。从图 7 中的阵列方向图中可看出,在均匀电场激发下,第一副瓣电平仅低于主瓣峰值约 13.2 dB,这对于雷达的抗干扰和抗杂波等性能造成严重的困扰,在雷

达设计及应用中需加以控制和处理。

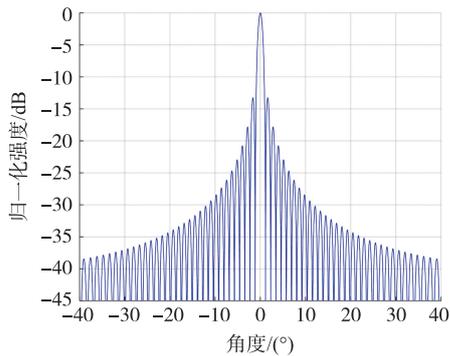


图 7 均匀一维阵列方向图

根据前述光纤 Bragg 光栅的相移结构,这里一维阵列的相位产生突变,突变相移量为  $\pi$ 。对产生相移后的阵列方向图进行仿真,所得结果如图 8 所示,由图可知当阵列产生相移量为  $\pi$  的相位突变时,与相移光纤 Bragg 光栅的反射光谱类似,在其方向图主瓣的中心位置将形成一个凹口,通过对相移量的调谐,可实现对凹口零深位置的改变。因此,利用该特性有潜力实现对主瓣干扰的置零,减少该干扰对雷达探测性能的影响<sup>[8,15]</sup>。

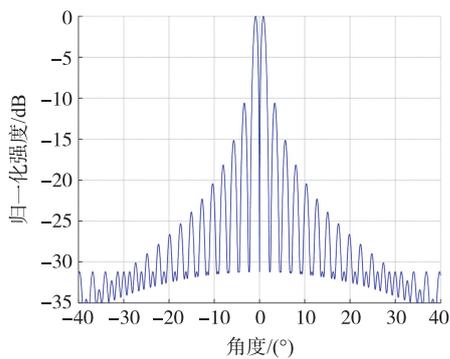


图 8 相移一维阵列方向图

根据光纤 Bragg 光栅对切趾的定义,其类似于雷达中的加权处理。利用光纤光栅领域常用的  $\tanh$  切趾函数<sup>[5]</sup>,对均匀线性阵列进行加权处理,可得到如图 9 所示的切趾阵列方向图,其中  $\tanh$  函数中的  $\alpha$  和  $\beta$  分别取值为 0.5 和 3。从方向图中可知,通

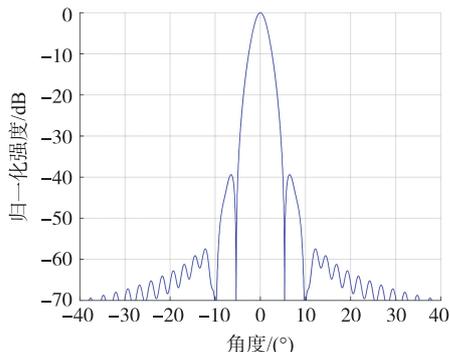


图 9 切趾一维阵列方向图

过对阵列进行切趾,可有效降低其副瓣。同时,在相同的第一副瓣幅度条件下, $\tanh$  函数加权较泰勒加权获得的主瓣宽度较大,但其余副瓣幅度远低于泰勒加权。另外,通过对  $\tanh$  函数中  $\alpha$  和  $\beta$  等参数的编辑,可获得较丰富的加权曲线,实现对方向图灵活的编辑能力。光纤光栅领域还有其他多种切趾函数,在雷达领域也具有较大的应用潜力。

根据 Bragg 光栅的啁啾结构,这里对阵列采用啁啾处理,阵列中 100 个天线单元中的前 30 个和后 30 个单元的单元间距分别从一倍波长逐渐变化为二分之一波长和从二分之一波长变化到一倍波长,中间的 40 个天线单元的间距为二分之一波长,其结构类似于光纤啁啾 Bragg 光栅中的非线性啁啾<sup>[16]</sup>,这里波长指上文中电磁波对应的波长。仿真得到的方向图展示在图 10 中,可知,其可在一定程度上降低副瓣的幅度,同时,与均匀线性阵列相比,在同样的单元数下,该啁啾阵列的 3dB 波束宽度也有一定的降低,这有利于提高目标探测的角度分辨率。

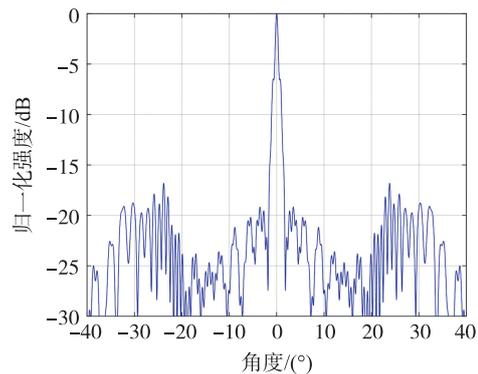


图 10 啁啾一维阵列方向图

## 4 结束语

光纤光栅在雷达领域存在广泛的应用,且随着微波光子雷达、量子雷达等前沿技术的发展,其应用前景将更加广阔。本文利用耦合模理论对光纤均匀、相移、切趾和啁啾 Bragg 光栅的反射谱进行仿真分析,同时,根据上述光栅结构,构建了均匀、相移、切趾和啁啾一维阵列,利用方向图合成理论对其方向图进行了仿真分析。仿真结果表明,相移阵列可在方向图主瓣中形成凹口,有潜力用于抗主瓣干扰;切趾阵列可利用  $\tanh$  函数的多变性,实现对方向图的丰富编辑;啁啾阵列在同样的单元数下,可实现方向图副瓣和波束宽度一定程度的降低。相关仿真分析旨在为实验和方案设计提供指导,后续可结合相关实验和设计开展进一步深入研究,期待为光栅和雷达设计优化提供借鉴和参考。本文首次将光纤光

栅与雷达阵列结合讨论分析,这将有助于促进光纤光学在雷达领域的理解与应用,并推动二者相关信息处理方式的互相借鉴和成果转化。

### 参考文献:

- [1] Georges J B, Lau K Y. Broadband Microwave Fiber-Optic Links with RF Phase Control for Phased-Array Antennas [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(11): 1344-1346.
- [2] Srivastava N K, Raghuvanshi S K, Parihar R. Demonstration of Super-Gaussian Apodized Linearly Chirped Fibre Bragg Grating for Efficient Beamsteering in Ku-Band Applications [J]. IET Optoelectronics, 2021, 15(3): 157-165.
- [3] García S, Guillem R, Gasulla I. Ring-Core Few-Mode Fiber for Tunable True Time Delay Line Operation [J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31773-31782.
- [4] Riza Nabeel A. High-Speed High-Isolation  $2 \times 2$  Fiber-Optic Switch for Wideband Radar Photonic Beamforming Controls [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(15): 2500-2505.
- [5] 张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 41-84.
- [6] 杨雪华, 李亦军. 基于光纤侧向耦合效应的漏液监测系统[J]. 电子器件, 2021, 44(6): 1510-1515.
- [7] 蔡志匡, 王吉, 肖建. 超宽带探地雷达控制系统设计与实现[J]. 电子器件, 2019, 42(4): 1031-1035.
- [8] Richards Mark A. Fundamentals of Radar Signal Processing [M]. 邢孟道, 王彤, 李真芳, 等译. Second Edition. 北京: 电子工业出版社, 2017: 7-11, 410-414.
- [9] Konstantaki M, Pissadakis S, Pugliese D, et al. Bragg Grating UV Inscription in A Bioresorbable Phosphate Glass Optical Fiber [C]//2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Trento, Italy, 2016: 1-4.
- [10] Yu Y J, Shi J D, Han F, et al. High-Precision Fiber Bragg Gratings Inscription by Infrared Femtosecond Laser Direct-Writing Method Assisted with Image Recognition [J]. Optics Express, 2020, 28(6): 8937-8948.
- [11] Shin J D, Bae D H, Kim B G. Optical True Time-Delay Feeder for Phased Array Antennas Using Fiber Bragg Gratings and Metal-Film Reflectors [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2005, 45(2): 122-124.
- [12] 倪娟. 光纤光栅在微波光子学中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [13] 施文武. 一种提高雷达系统输出信噪比的方法[J]. 电讯技术, 2006, 46(3): 153-155.
- [14] Pisco M, Campopiano S, Cutolo A, et al. Continuously Variable Optical Delay Line Based on a Chirped Fiber Bragg Grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(24): 2551-2553.
- [15] 韩阳阳, 苏五星, 沈浩浩, 等. 自适应波束形成零陷优化抗干扰研究[J]. 电子信息对抗技术, 2014, 29(1): 51-54.
- [16] 王振彬, 陈琦玮, 邵钟浩. 高斯切趾非线性啁啾光纤光栅特性的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2005(3): 11-15.



张轩宇(1989—),男,博士,工程师,主要研究方向为雷达系统设计, xuan yuzhang2018@163.com。