

基于宽带光控相控阵的电子对抗系统及其方法

王思雅, 张俊莎, 邵微笑, 关文硕, 王 森

北京振兴计量测试研究所, 北京

收稿日期: 2021年10月14日; 录用日期: 2021年11月24日; 发布日期: 2021年12月1日

摘 要

随着微波光子学和相控阵天线技术的广泛应用, 因相控阵天线的窄带宽的缺点, 目前尚未能很好与传统的电子对抗系统进行融合, 本文引入光学延时方式, 使得光控相控阵具有宽带的特点, 工作频率覆盖2~18 GHz, 满足电子对抗领域需求。本文提出的基于宽带光控相控阵的电子对抗系统实现了电扫描、高增益、灵巧波束控制以及小型化低功耗方面的功能, 性能进一步提升。并在此系统的基础之上, 提出了一种基于宽带光控相控阵的电子对抗方法。

关键词

宽带光控相控阵, 电子对抗系统, 阵列天线

Electronic Countermeasure System Based on Wideband Optical Phased Array and Its Method

Siya Wang, Junsha Zhang, Weixiao Shao, Wenshuo Guan, Sen Wang

Beijing Zhenxing Measurement and Testing Institute, Beijing

Received: Oct. 14th, 2021; accepted: Nov. 24th, 2021; published: Dec. 1st, 2021

Abstract

With the wide application of microwave photonics and phased array antenna technology, due to the narrow bandwidth of phased array antenna, it has not been well integrated with the traditional electronic countermeasure system. In this paper, the optical fiber delay method is introduced to make the optical phased array have the characteristics of wideband, and the working frequency covers 2~18GHz, which meets the needs of the field of electronic countermeasure. The electronic countermeasure system based on wideband optical phased array proposed in this paper realizes

the functions of electrical scanning, high gain, smart beam control and miniaturization and low power consumption, and the performance is further improved. Based on this system, an electronic countermeasure method based on wideband optically controlled phased array is proposed.

Keywords

Wideband Optical Phased Array, Electronic Countermeasure System, Array Antenna

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

当前电子对抗领域中基于传统纯粹电学处理的技术面临瓶颈,主要体现在带宽、系统灵敏度、覆盖空域以及小型化和低功耗等方面。目前,相控阵天线技术愈发成熟,应用愈发广泛,传统相控阵天线具有辐射功率大、快速灵活扫描、抗干扰能力强、反应速度快、可靠性高等特点[1] [2],但因带宽受到天线孔径效应和天线孔径渡越时间的限制,显现出不能适应宽带射频这一弊端。而电子对抗系统一般工作频率覆盖范围宽,因此相控阵技术未在电子对抗领域广泛应用。当引入微波光子学技术、实时延时技术,采用功耗低、带宽宽、体积小的光纤延迟线代替传统延迟线对信号进行传输、分配与控制后,天线阵列波束指向与延时值和阵元间距有关,与射频信号频率无关,因此采用光学延时方式的光控相控阵与信号频率无关,能够适应宽带相控阵的需要,满足电子对抗的需求。所以,基于微波光子学的宽带光控阵,为相控阵技术在电子对抗领域应用提供了重要途径。

基于微波光子学的电子对抗技术研究方面,国内有关研究尚处于起步阶段。十二五期间,一些研究所已搭建了微波光子雷达、卫星通信等系统样机,清华大学在硅基微波光子器件方面取得了诸多成果,但是有关基于微波光子学的电子干扰机方面的研究起步不久,还处于概念阶段。

由此可见,电子对抗系统的发展趋势如下:

- 1) 采用模块化、开放式射频架构,具备软件自定义功能,与雷达等功能的集成化综合化趋势明显。
- 2) 微波光子学不断发展,在雷达与通信领域应用不断增加。

本文描述一种基于宽带光控相控阵的电子对抗装置以及方法,能够实现 2~18 GHz 的宽带光控相控阵与传统电子对抗装置的融合,解决微波移相器的瞬时带宽小问题,满足电子对抗装置向电扫描、高增益、灵巧波束控制、空间功率合成方向发展的需求,也实现微波光子学与电子对抗技术的融合提升传统电子对抗装置的性能。

2. 基于微波光子学的电子对抗技术理论研究

2.1. 宽带相控阵的波束发散问题

基于传统移相器的相控阵天线带宽受到天线孔径效应和天线孔径渡越时间的限制,宽带时会出现波束发散、增益降低的问题。

而当采用射频移相器时,天线阵列波束指向 θ 与微波移相器相移 Φ 、信号波长 λ 、阵元间距 d 有关,因此不同信号波长将产生不同的波束指向角,即波束指向与频率相关。

所以传统的采用移相器的相控阵不能适应宽带射频。当采用光学真延时的延迟线时,天线阵列波束

指向 θ 与延时值 ΔL 和阵元间距 d 有关, 与射频信号频率无关, 因此采用光学延时方式的光控相控阵与信号频率无关, 能够适应宽带相控阵的需要。

当采用光学真延时后, 阵列天线波束指向在子阵级别上采用延时线后, 子阵的孔径效应和天线孔径渡越时间的限制任然存在, 但子阵的孔径与整个天线孔径相比已经减小很多, 所以能实现较大的瞬时带宽, 该带宽与子阵数量相关, 子阵数量越大, 子阵孔径越小, 瞬时带宽越高, 如果所有相移都由真延时线实现, 则能实现最大的瞬时带宽。因此, 光控相控阵天线理论上能实现宽带相控阵电子对抗系统构建。

2.2. 光控相控阵应用在电子对抗领域的优势

宽带光控相控阵应用了宽带阵列天线、光真实延时技术、光纤传输技术等, 同传统的电子对抗装置相比, 有许多优点。

1) 因微波与光波理论基础统一, 微波器件和光电子器件可使用相同材料和技术在同一芯片上集成, 而光波的频率更高, 可载带宽更大, 用光子代替电子能改善无线电设备的功能架构, 避免电磁兼容性问题, 解决带宽、系统灵敏度等当前电子对抗领域中基于传统纯粹电学处理的技术瓶颈[3]。

2) 采用光传输和分配技术, 减轻了系统重量, 减小体积, 增强抗电磁干扰能力, 改善线路传输特性, 提高了设备的可靠性、机动性[4]。

3) 由于光纤传输的低损耗和宽频带特性, 使两者的距离从原来同轴电缆时的 300 m 以内扩大到 2~5 km, 并且频带可覆盖 X 波段(8~12 GHz)或 Ku 波段(12~18 GHz)。实现天线信号的远程化传输, 提高了电子对抗装置和操作人员生存能力[5]。

基于以上优点, 宽带光控相控阵可与电子对抗结合, 亦可用于雷达系统设计中, 全面提升空间目标探测能力, 还可应用于电子设备升级换代中。

3. 基于宽带光控相控阵的电子对抗方法

在基于微波光子学的电子对抗技术理论研究的基础上, 提出一种基于宽带光控相控阵的电子对抗方法。方法步骤流程图如下图 1 所示:

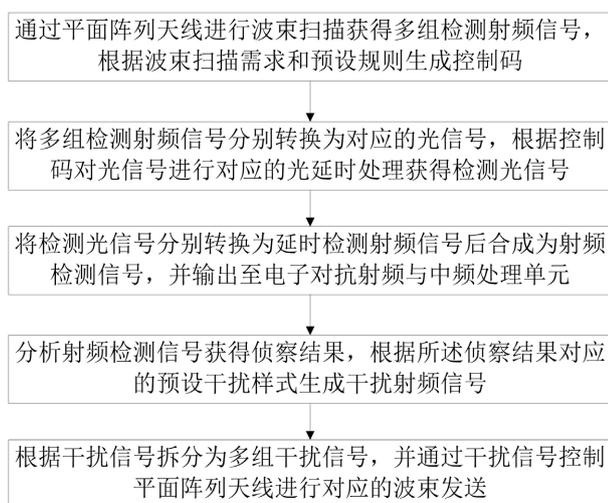


Figure 1. Electronic countermeasure method based on broadband optical phased array

图 1. 基于宽带光控相控阵的电子对抗方法流程图

在侦察时，首先通过工作频率范围为 2 GHz 到 18 GHz 的平面阵列天线进行波束扫描获得多组检测射频信号，根据波束扫描需求和预设规则生成控制码。控制码是根据波束扫描需求获得波束指向角，然后使用公式 1 计算获得电磁波波程差和延时信息，根据延时信息生成控制码。

接着将多组检测射频信号分别转换为对应的光信号，根据控制码对光信号进行对应的光延时处理获得检测光信号；

将检测光信号分别转换为延时检测射频信号，将延时检测射频信号进行放大处理后，合成为射频检测信号，并将射频检测信号输出至电子对抗射频及中频处理单元。

然后，电子对抗射频与中频处理单元将射频检测信号进行多级变频降至预设中频信号，对中频信号进行数模转换采样、信号检测和参数测量，并通过雷达信号分选获得侦察结果，并根据侦察结果获得对应的预设干扰样式；根据干扰样式经过数模转换获得预设中频干扰信号，对中频干扰信号进行多级上变频幅度调理获得干扰射频信号。

最后，根据干扰信号拆分为多组干扰信号，并通过干扰信号控制平面阵列天线进行对应的波束发送。

根据基于宽带光控相控阵的电子对抗方法，为将宽带光控相控阵技术与传统电子对抗装置融合，提高电子对抗装置的功能和性能，提出一种基于宽带光控相控阵的电子对抗系统。

3.1. 系统总体设计

一种基于宽带光控相控阵的电子对抗系统的示意图如图 2 所示。该系统主要由宽带光控相控阵部分、宽带功率合成/分配网络单元和电子对抗处理单元组成，其中宽带光控相控阵部分由宽带阵列天线单元、多通道宽带射频收发单元、光延时网络单元以及波控单元组成。

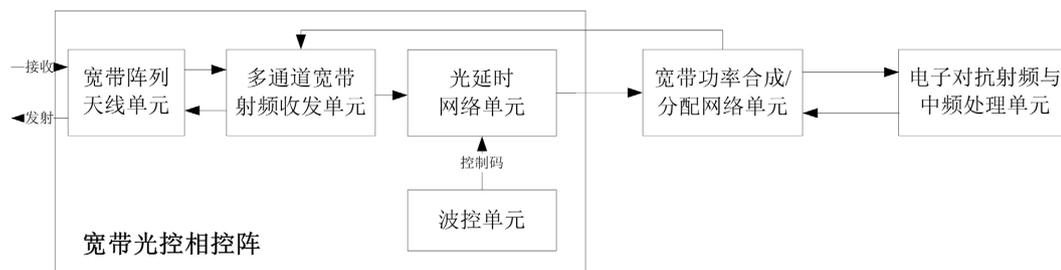


Figure 2. Electronic countermeasure system based on broadband optical phased array
图 2. 基于宽带光控相控阵的电子对抗系统示意图

系统的整体处理过程为：首先通过平面阵列天线进行波束扫描获得多组检测射频信号，波控单元根据波束扫描需求和预设规则生成控制码；多通道宽带射频收发单元将多组检测射频信号分别转换为对应的光信号，根据波控单元生成的控制码对光信号进行对应的光延时处理获得检测光信号；然后将检测光信号分别转换为延时检测射频信号后合成为射频检测信号，最后将射频检测信号输出至电子对抗处理单元。

3.2. 宽带光控相控阵设计

3.2.1. 宽带光控阵干扰天线设计

宽带阵列天线单元中各天线的工作频率范围为 2 GHz 到 18 GHz。该天线具有良好的宽带带适应性，核心在于强耦合结构和多级阻抗匹配结构的设计。常规偶极子单元的频带特性是很窄的。同时，当天线单元与单元之间间距布置得较近时，互相的耦合影响会使天线性能发生变化。通常这种耦合产生的影响

是需要天线设计时避免的，而这次设计却利用了这一特性来增强天线的频带特性。如下图所示，在天线相邻的位置增设强耦合结构进一步增强单元间的互耦。通过对耦合结构形状、尺寸、位置的设计最终实现拓宽偶极子频带特性的目的。图中金色部分即为强耦合结构。

由图 3 的三维结构可看到金色的两层强耦合结构将两个偶极子的连接处夹在中间层，同时强耦合结构接地保持共电位。此时，原本独立的一个个小尺寸的偶极子天线就被串成了一个尺寸的大天线。这样，天线既可以在小尺寸天线对应的频段谐振，又可以在多个天线拼成的大尺寸天线上谐振，从而实现良好的宽频特性。

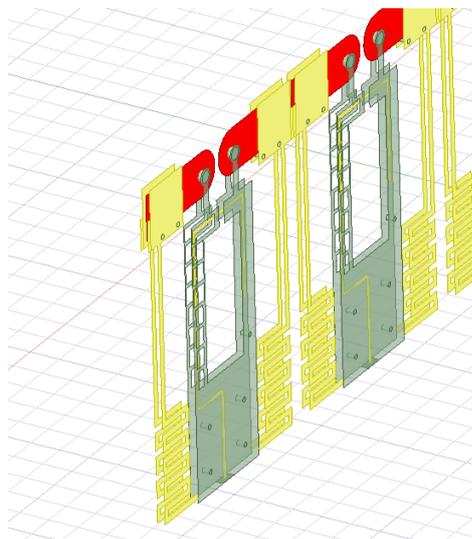


Figure 3. Strongly coupled dipole antenna array
图 3. 强耦合偶极子天线阵

除了天线辐射结构需要有很强的频带特性外，馈电结构也需要有足够的带宽才能实现。图 8 中的灰绿色结构即为宽带馈电结构。馈电结构基于 Marchand 巴伦设计，先根据天线结构特征将 Marchand 巴伦基于带状线设计成环状结构，再通过多级开孔实现多级阻抗转换从而实现多级阻抗匹配的宽带特性。图 4 为 8×8 阵列天线实物图。

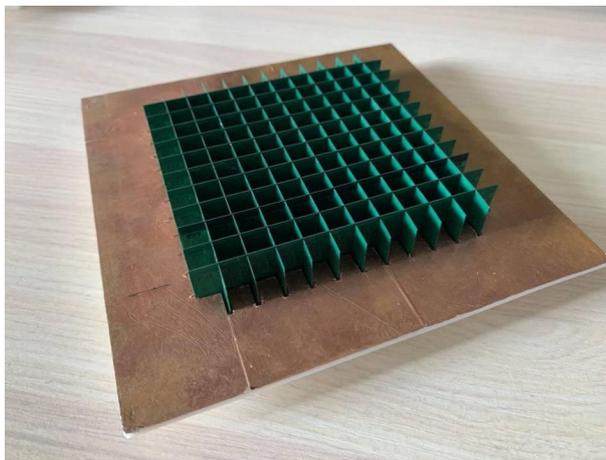


Figure 4. 8×8 array antenna
图 4. 8×8 阵列天线实物图

3.2.2. 基于微波光子学的光学真延时网络设计

该型光纤延迟网络的主要功能是通过切换不同长度的光纤延迟线路来实现多通道射频信号的不同延迟功能。基本原理如图 5 所示，射频信号通过光调制模块实现信号的电光转换，将射频信号调制在光载波上，光信号进入野外光缆进行长距离传输。通过光解调模块将光信号转换为电信号。

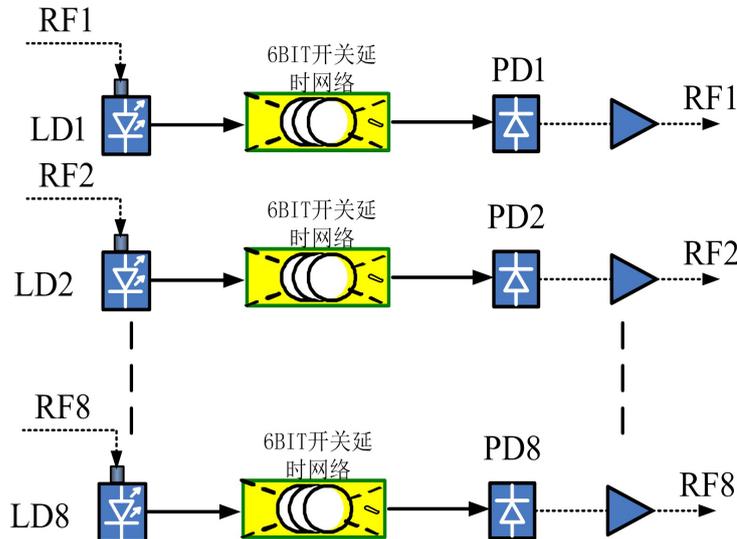


Figure 5. Optical fiber delay network
图 5. 光纤延迟网络原理图

图 6 以及图 7 是光延时网络单元的一个典型的应用结构，激光器发出的连续波被一个频率 f 的模拟信号进行强度调制，该调制信号经过一段长为 L 的光纤传输后，被探测器解调。

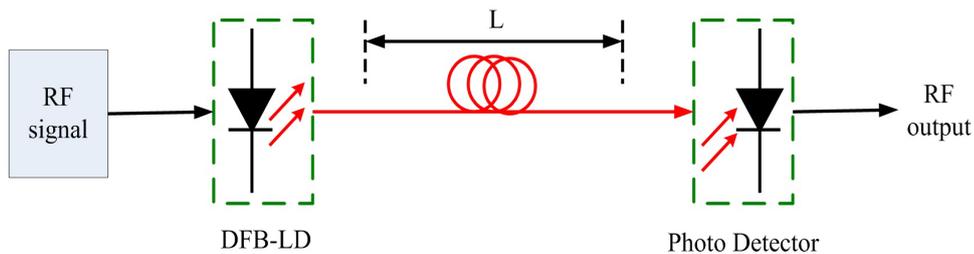


Figure 6. Basic principle of optical fiber transmission
图 6. 光纤传输的基本原理

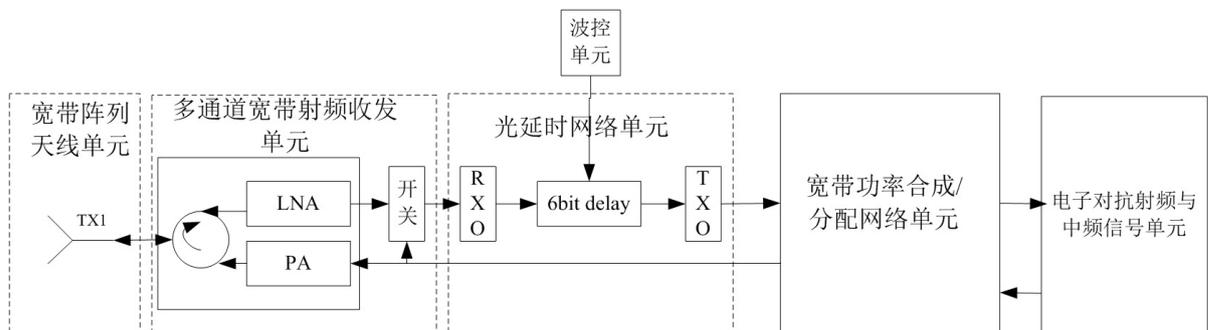


Figure 7. Single channel principle of broadband optically controlled phased array unit
图 7. 宽带光控相控阵单元的单通道原理示意图

3.3. 宽带功率合成/分配网络单元设计

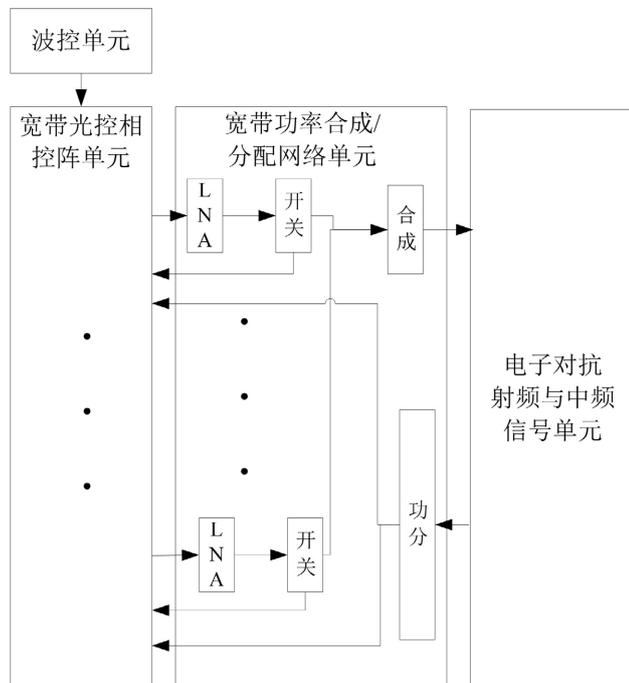


Figure 8. Composition diagram of broadband power synthesis/distribution network unit

图 8. 宽带功率合成/分配网络单元组成示意图

宽带功率合成/分配网络单元的设计思路是把多路 2~18 GHz 接收信号合成一路，把一路 2~18 GHz 发射干扰信号功分为多路，完成多阵元通道信号到单一收发电子对抗单元之间的信号合成和功分转换，合成模块把多路 2~18 GHz 接收信号合成一路，功分模块把一路 2~18 GHz 发射干扰信号功分为多路，完成多阵元通道信号到单一收发电子对抗单元之间的信号合成和功分转换。其示意图如图 8 所示。

3.4. 电子对抗处理单元设计

电子对抗射频与中频处理单元，包括射频接收模块、中频处理模块、射频发射模块三部分，射频接收模块把光控阵合成的射频信号进行多级变频降至中频，送给中频处理模块，中频处理模块对中频信号进行 ADC 采样、信号检测和参数测量、雷达信号分选获得侦察结果，选定干扰样式进行干扰技术产生，经过 DAC 转换得到中频干扰信号送给射频发射模块，进行多级上变频幅度调理获得射频干扰信号送至光控阵进行干扰发射。

中频处理模块包括系统控制和 DRFM 两种硬件功能。包括：DSP 主处理单元、FPGA 处理单元、电源分配网络、板上二次电源、时钟管理单元、测幅 ADC 单元、测频 ADC 单元、驱动控制单元、高速 ADC 单元、高速 DAC 单元、驱动控制单元、串口电平转换单元等部分组成。

如图 9 所示：控制与信号处理硬件在控制软件控制下完成整机功能，其中控制软件驻留在 DSP 内，完成系统控制、通信、状态收集、信号分选等功能；控制与信号处理硬件主要完成射频收发控制、侦察参数测量、干扰样式产生、雷达信号产生、接口转换等功能。

中频处理模块是电子对抗设备的控制核心。完成与综控机通信功能、系统硬件控制功能、参数测量与雷达信号分选功能、干扰信号产生功能、状态收集功能等。

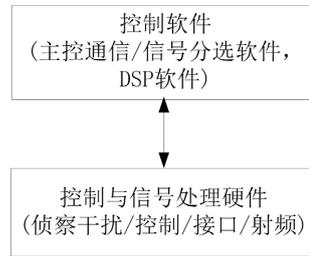


Figure 9. Software composition block diagram

图 9. 软件组成框图

电子干扰时, 该模块负责对接收到雷达信号的采样、存储、分选、复制、干扰时序的控制和对外通信。该模块内包括 DRFM 相关功能, 包含 A/D 变换、数据字存储器、多普勒调制器、卷积器、D/A 变换和控制电路部分, 中频信号(带宽 1000 MHz)在同步信号的控制下, 经过 A/D 变换, 存储到 FPGA 中。干扰技术产生器(FPGA 内)在控制软件控制下, 根据选定的干扰样式和干扰参数, 控制存储信号读写过程和收发时序, 产生有关干扰信号。存储的接收雷达信号在干扰技术产生器的控制下进行多普勒调制及卷积运算, 再经过 D/A 变换、幅度控制后中频输出, 完成相参信号的时域调制、频域调制以及幅度调制。

4. 系统构建方案及实验验证

4.1. 基于宽带光控相控阵的电子对抗系统构建方案

电子对抗时, 接到电子干扰指令时, 首先进行自主侦察, 截获并识别威胁信号后按照预设策略实施压制、欺骗以及复合干扰, 破坏雷达对目标的探测、跟踪和识别, 提供设定干扰样式和干扰特性给靶试试验。具体讲, 通过 X/Ku 收发天线接收来自外部的雷达信号, 并进入收发模块接收通道, 在变频模块与本振信号进行混频, 将雷达信号下变频到控制与信号处理模块处理所需的中频频率, 经信号处理实现时域和频域调制, 完成针对威胁雷达的干扰样式处理, 并输出干扰信号。在微波通道内, 干扰信号经变频模块进行上混频处理形成射频干扰信号, 进入收发模块发射通道进行功率放大和幅度控制, 并通过天线将信号辐射出去。控制与信号处理模块完成对测频功能和信号参数精确测量功能, 并保持与控制设备的通讯, 对整个干扰设备的工作时序进行控制。二次电源模块将送来的+28 V 电源变换到各模块工作所需的各种电源。

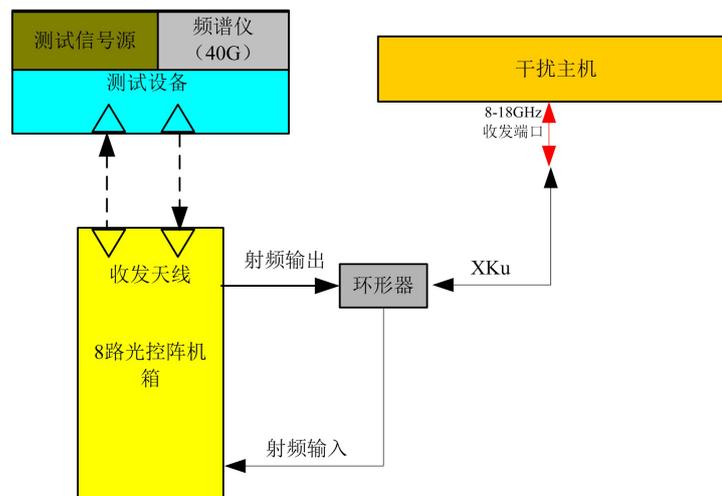


Figure 10. Test system composition block diagram

图 10. 测试系统组成框图

4.2. 测试系统构建

如图 10 所示, 对光控阵机箱、干扰主机通过环形器进行收发转换后, 可以实现二者的联调。用信号源输出信号到喇叭天线, 送至紧耦合阵天线, 通过光控阵机箱后送至环形器再到干扰主机, 考核干扰机侦察接收能力。干扰发射时, 干扰信号通过光控机箱送至光控阵天线再到接收天线用频谱仪观测。

4.3. 集成测试软件

用于测试的软件界面如图 11 和图 12 所示。



Figure 11. Optical delay network control interface
图 11. 光延时网络控制界面



Figure 12. TR control interface
图 12. TR 控制界面

4.4. 光控阵测试结果

限于微波暗室试验条件限制，试验过程中选取的工作频点为 8 GHz、10 GHz、12 GHz 和 14 GHz，天线方向图波束分别为 0° 、 20° 和 40° ，具体的试验结果如图 13~16 所示。

由实验结果可以看出，天线波束指向角随着设置的角度不同，发生相应的偏移，但是由于此天线为 8×8 阵列天线，本样机在实验过程中实际使用为 4×2 阵列，因此导致波束较宽，峰值功率指向角度与实际设置值有偏差。

其中，宽带阵列天线实现为 8×8 共 64 阵元全阵，由于受系统实现成本等因素限制，有源 TR 和光延时网络实现为 2×4 共 8 路有源子阵列，只是按 2×4 共 8 路子阵进行实物测试，最终通过实际测试发现：子阵的仿真结果与实测结果基本一致，因此全阵增益指标按照仿真结果得到的优于 15 dB。

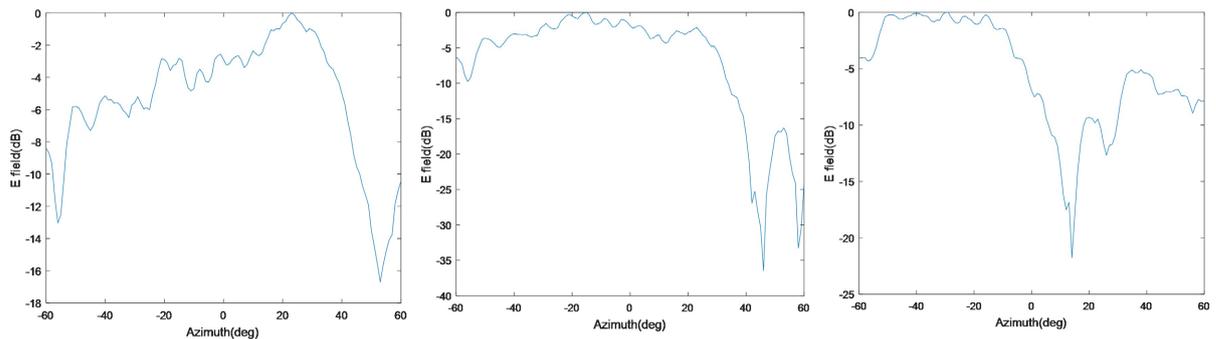


Figure 13. System result of 8 GHz

图 13. 8 GHz 时的结果曲线

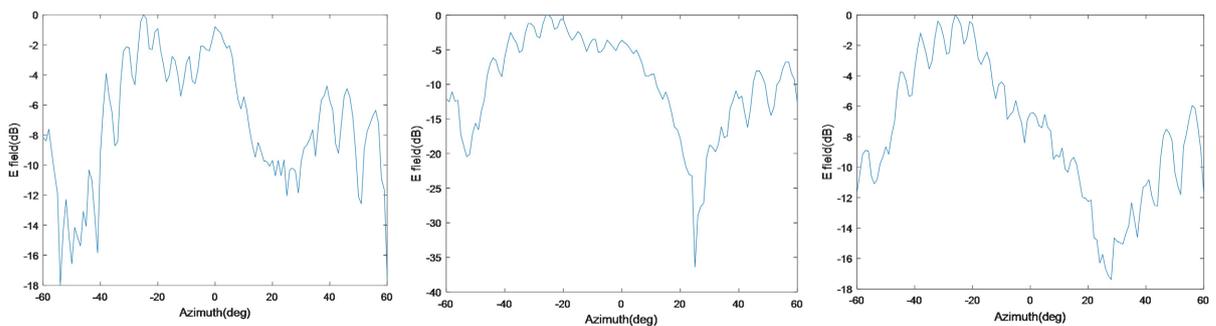


Figure 14. System result of 10 GHz

图 14. 10 GHz 时的结果曲线

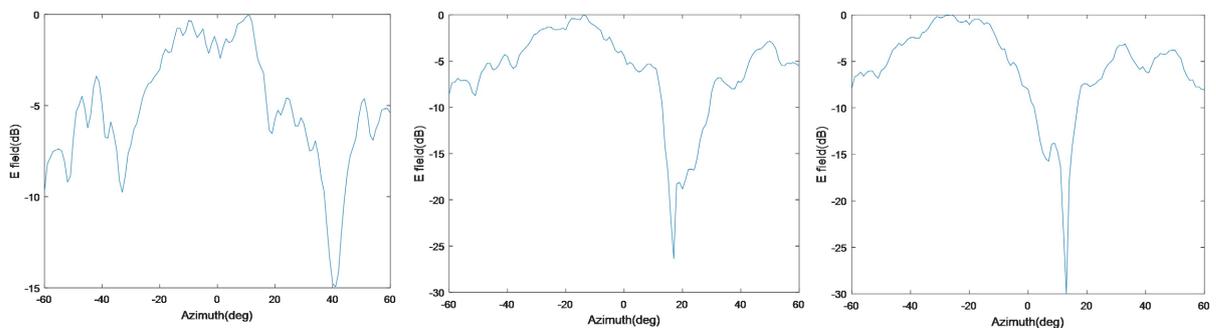


Figure 15. System result of 12 GHz

图 15. 12 GHz 时的结果曲线

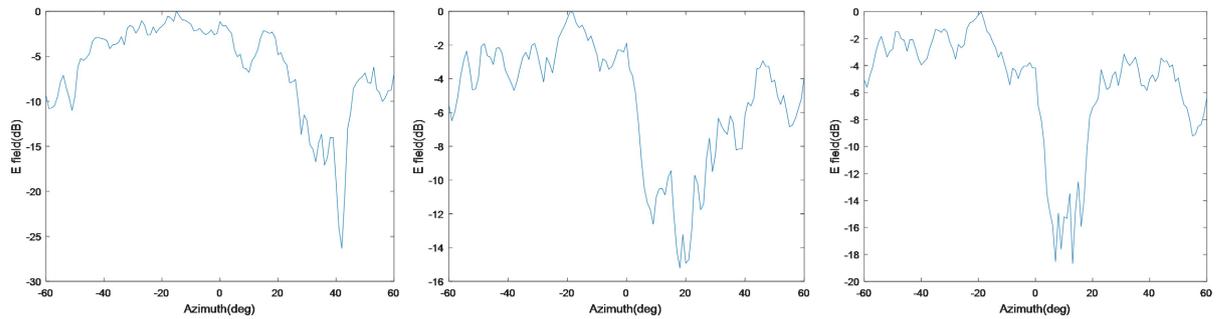


Figure 16. System result of 14 GHz
图 16. 14 GHz 时的结果曲线

5. 结束语

本文的主要工作与创新点有两点：1) 是实现 8*8 阵元 10 GHz 带宽的光控相控阵天线，通过偶极子天线的互耦合设计扩展了频带宽度，天线既可以在小尺寸天线对应的频段谐振，又可以在多个天线拼成的大尺寸天线上谐振，从而实现良好的宽频特性，增益达到 15 dB；2) 是采用通过光控延时网络实现干扰波束控制，使干扰机获得相控阵的窄波束、高增益优势，实现了 8 阵元的有源光控阵样机并进行了方向图测试，通过延时网络的光学延时实现了电磁波的波束中心偏移和扫描。

本文将一种宽带光控相控阵与电子对抗系统相结合，提出了一种基于宽带光控相控阵的电子对抗方法和装置，提升了传统电子对抗装置的性能。随着技术的发展和进步，我日后将会在光控平面相控阵列和毫米波光控相控阵列等相关技术进行更加深入研究，并将先进技术与电子对抗技术将会进一步融合，提高电子对抗装置能力。通过本项目研究，突破了基于宽带光控阵的电子对抗装置系统样机研制、宽带小型化天线、有源光控阵等关键技术，研制了天线样件和样机，验证了光控波束扫描性能。但是，距离工程化还有一定的距离，特别是紧耦合天线的结构可靠性、增益提高、光延时网络的精细化 ps 级控制、光延时网络的快速性、光延时芯片的工程化等均为进一步研究的工程化问题，后续会继续关注微波光子技术在雷达、电子对抗方向的应用，随着光延迟芯片的成熟，未来应用会持续扩大。

参考文献

- [1] 何子述, 金林, 韩蕴洁, 严济鸿. 光控相控阵雷达发展动态和实现中的关键技术[J]. 电子学报, 2005, 33(12): 2191-2195.
- [2] 曹俊友. 光传输关键技术及毫米波光控相控阵技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [3] 高瑜翔. 光控相控阵阵列系统及其关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [4] 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.
- [5] 张忠华, 孙晓昶. 光控相控阵雷达[J]. 电讯技术, 2002(2): 71-75.