

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108000

基于分级延迟的宽带相控阵天线研究

姜 玮 潘宇虎 夏琛海 徐弘毅
(南京电子技术研究所 南京 210039)

摘要: 由于色散效应和孔径渡越效应的存在,传统相控阵天线本质上是一种窄带系统。为了解决这一问题,实时延迟在相控阵天线设计中得到了广泛的应用。提出了一种分级延迟的方案来改善天线阵列的瞬时宽带性能。首先简要介绍了分级延迟方案扩展带宽的原理,然后通过仿真设计对子阵级延迟和分级延迟方案下天线宽带性能进行了讨论和对比分析,最后通过试验测试天线的典型宽带性能,对偏离中心频率 1.5 GHz,方位/俯仰扫描 60°的波位,采用分级延迟方案后和子阵级延迟相比,实测指向误差由 1.24°/1.63°降低至 0.47°/0.24°,证明该分级延迟方案极大地提升了天线的瞬时带宽,并具有良好的工程实现性。

关键词: 相控阵天线;宽带;实时延迟

中图分类号: TN82 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 510.99

A study on broadband phased array antenna based on multi-stage true time delay line

Jiang Wei Pan Yuhu Xia Chenhai Xu Hongyi
(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Due to the dispersion effect and aperture fill effect, essentially, the traditional active phased array antenna is a narrow-band system. To solve this problem, true time delay (TTD) method is massively employed in active phased array antenna design. A multi-stage TTD method is proposed to improve the instantaneous bandwidth of antenna array. Firstly, the theory of multi-stage TTD is briefly introduced. Then the antenna radiation pattern performance employing sub-array TTD and multi-stage TTD method are analyzed and compared based on simulation results. Finally, the typical broadband performance of the antenna is tested. When the measured wave position's frequency is 1.5 GHz deviating from the center frequency and azimuth/elevation sweep angle is 60°, the pointing error is reduced from 1.24°/1.63° to 0.47°/0.24° after employing multi-stage TTD method, and the results prove that the multi-stage TTD method significantly expand the instantaneous bandwidth with good engineering realizability.

Keywords: phased array antenna; broadband; true time delay

0 引 言

自二次世界大战以来,雷达技术得到了全世界的广泛关注和发展。近半个世纪,随着半导体工艺的进步,有源相控阵天线由于其高可靠性、波束快速灵活多变等优点在机载、地面、舰载等领域得到了广泛的应用^[1-4]。过去20年来,由于对高分辨测绘、目标识别和电子对抗侦收等功能日益迫切的需求,实现超宽带有源相控阵天线成为了亟需解决的难题^[5-6]。

为了实现大的瞬时带宽,需要使用实时延迟线(true time delay, TTD)来代替传统非色散的移相器对阵元进行收发时延的控制。张蕾等^[7]提出在子阵上添加延迟器来扩

展相控阵天线的带宽,但由于子阵级延迟存在量化效应,采用这种方案的相控阵天线波束会出现副瓣抬升和增益下降^[8-11]等问题最终限制宽带性能。梁剑^[12]提出一种基于分数延时滤波器的设计方法在数字域实现实时延迟,相比传统延迟器件这种方法精度高,可重构,但对数字采样芯片、可编程器件等数字器件处理能力要求高,且功耗大,往往导致系统成本较高、庞大复杂。当阵元规模较大时,数字器件的延迟精度受到时钟精度与同步的影响也会更加明显^[13]。文献[14-15]提出利用微波光子技术实现宽带的相控阵雷达,因此基于光学方法设计实现实时延迟网络和宽带波束也得到了广泛的关注和研究^[16-17],但目前常规使用的微波光子延迟器件的损耗、动态范围、温度漂移等实际工程问题

收稿日期:2021-10-02

较难解决,对需要在复杂恶劣的环境工作的天线阵列难以有效应用。

针对上述问题,为了实现在恶劣使用环境具有可靠瞬时宽带性能的相控阵雷达,在考虑硬件规模、工程可实现性的前提下,本文提出了基于传统微波实时延迟线的分级延迟方案。首先本文分析了分级延迟方案的原理,然后通过分级延迟方案进行仿真优化设计,同时与只有子阵级延迟进行对比分析,最后结合具体工程设计通过实验测量验证了分级延迟方案下天线阵列优异的瞬时宽带性能,满足项目使用需求。

1 实时延迟分级原理

由于传统移相器是非色散器件,所以具有一定规模的相控阵天线通过移相器进行相位控制从而使波束指向变化时,会受到色散效应和孔径渡越效应的影响,瞬时带宽一般很窄。色散效应是指工作频率变化时,阵元中移相器的相位几乎不变,导致天线阵面的空间相位和阵内相位不同,使得波束指向随工作频率变化而偏离的现象。孔径渡越效应则是由于相控阵天线存在一定的规模和大小,接收/发射特定方向电磁波时,不同位置阵元/目标接收到信号的时间存在时间差,从而影响信号的合成和测距精度等。为了解决该问题,需要在天线阵面中使用实时延迟线代替移相器,来实现宽带相控阵天线的波束控制,如图 1 所示。

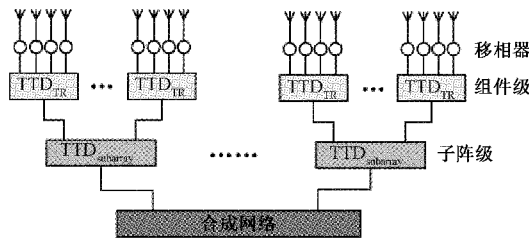


图 1 组件级+子阵级延迟架构

当相控阵天线只在阵元中使用移相器进行波束控制时,阵面的孔径渡越时间 T_A 和带宽 B 如式(1)和(2)所示。

$$T_A = L \times \sin(\theta) \quad (1)$$

$$B \propto \frac{1}{L \times \sin(\theta)} \quad (2)$$

其中, L 为天线的口径尺寸, θ 为辐射角度,瞬时带宽 B 受到孔径渡越时间的限制,与其成反比。为了增加相控阵天线的瞬时带宽,采用子阵级延迟的方案时,将阵面均分为若干子阵。子阵间所需相位差通过子阵级实时延迟网络实现,子阵内阵元的剩余相位差通过组件中的移相器实现。这种方案从本质上说是将阵面分解成了若干较小的“阵面”,从而降低了实际的孔径渡越时间,从而提高了相控阵天线的瞬时带宽。

在要求极大瞬时带宽或者对全频段波束质量要求极高的应用场景下,子阵级延迟仍然不能满足要求,此时需要在设计中降低实时延迟的颗粒度,克服子阵级延迟带来的量

化效应。受到外部接口、空间尺寸和供电等外部能力的约束,考虑到工程实现性,可以采用组件级+子阵级延迟的方案,子阵间所需路程差使用子阵实时延迟网络实现,组件间路程差使用组件实时延迟网络实现,剩余阵元的相位差再通过非色散移相器实现。该方案不改动相控阵天线中子阵级后的硬件架构,只对和阵元互联的组件增加实时延迟线,兼顾了系统的硬件规模和宽带性能,便于实现。

2 延迟方案设计仿真

本文接下来仿真分析了只有子阵级延迟和分级延迟下相控阵天线的宽带性能,通过对组件级+子阵级延迟的合理规划设计,有效地提升了相控阵天线的瞬时带宽。一个矩形分布的天线阵面如图 2 所示,阵元规模为 1 152 个,共 32 行 36 列,呈现三角形栅格排布,单元间距为 14 mm。组件为垂直放置的条式组件,全阵阵元均匀划分为 16 个子阵,如图 2 中黑色和白色区域所示。

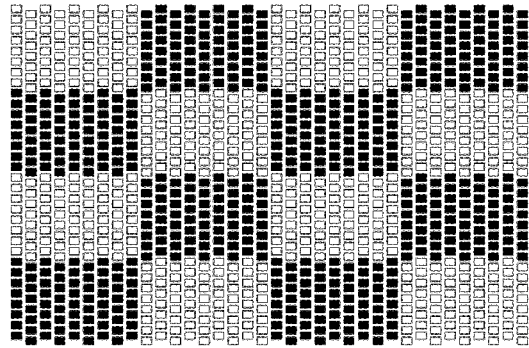


图 2 相控阵天线阵元分布和子阵划分

基于上一节中描述的两种不同延迟方案,分别计算两种方案所需的延迟量和移相量映射到各阵元上,基于 MATLAB 数学分析软件,通过傅里叶变换计算方位面和俯仰面 60° 扫描时,天线阵面在工作频段内的方向图典型参数。只采用子阵级延迟时,统计结果如表 1~2 所示。可以发现随着工作频率远离中心频率时,指向误差逐渐变大,副瓣电平也随之抬升。当工作频率偏离中心频率 1.5 GHz 时,指向偏差已经超过 20% (对该波位和频率下天线的波束宽度进行归一化)。

表 1 只有子阵级延迟+方位面扫描仿真

频率	方向性系数/dB	指向误差	方位最大副瓣/dB
F0-1.5	28.44	2.29°/26.97%	-9.25
F0-1	29.58	1.39°/17.35%	-11.78
F0-0.5	30.53	0.65°/8.56%	-14.92
F0	31.27	0.03°/0.42%	-19.45

采用组件级+子阵级的分级延迟方案时,统计结果如表 3~4 所示。可以发现和只有子阵级延迟相比,各项指标

表 2 只有子阵级延迟十俯仰扫描仿真

频率	方向性 系数/dB	方位指向 误差	俯仰最大 副瓣/dB
F0-1.5	28.38	1.88°/22.07%	-14.22
F0-1	29.83	1.12°/13.93%	-17.05
F0-0.5	30.69	0.52°/6.83%	-17.87
F0	31.27	0.02°/0.28%	-19.45

随着工作频率偏离中心频点的变化趋势是类似的,但由于分级延迟方案细化了实时延迟的颗粒度,使得方向性系数、指向误差和副瓣性能都有了可观的改善,改善的幅度和频率偏离中心频点的程度正相关。

表 3 分级延迟十方位面扫描仿真

频率	方向性 系数/dB	方位指向 误差	方位最大 副瓣/dB
F0-1.5	29.66	0.24°/2.83%	-17.72
F0-1	30.19	0.16°/2.01%	-15.79
F0-0.5	30.67	0.12°/1.58%	-18.49
F0	31.11	0.03°/0.42%	-18.79

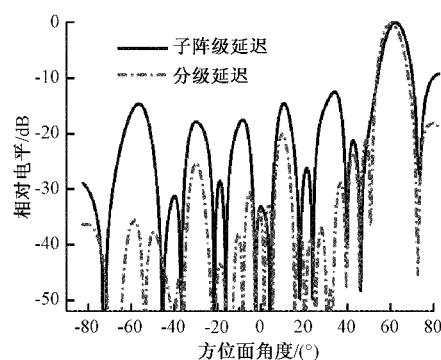
表 4 分级延迟十俯仰扫描仿真

频率	方向性 系数/dB	方位指向 误差	俯仰最大 副瓣/dB
F0-1.5	29.46	0.19°/2.23%	-13.10
F0-1	30.26	0.10°/1.24%	-16.09
F0-0.5	30.79	0.05°/0.66%	-17.92
F0	31.26	0.02°/0.28%	-18.51

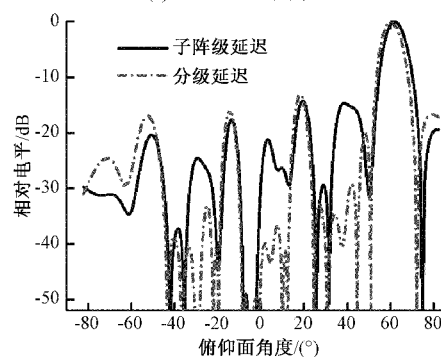
以 F0-1.5 GHz 为例,两种延迟方案在方位面与俯仰面扫描 60° 的情形下的方向图切面图如图 3 所示,图 3(a) 为方位面仿真结果,图 3(b) 为俯仰面仿真结果。可以发现两种延迟方案相比,由于分级延迟采用的条式组件存在实时延迟线,使得方位面每列都存在实时延迟,子阵分布导致的量化瓣在方向图中消失,整体方向图性能改善明显,但由于组件中的实时延迟线的最小延迟量较大,仍然存在以 4 个阵元为周期的量化瓣;俯仰面改善的趋势和方位面类似,子阵量化效应得到抑制,而由于条式组件垂直放置,仍然存在以条式组件分布为周期的量化瓣,但整体副瓣水平已满足设计要求。

3 延迟方案实验验证

为了对两种延迟方案下的指向误差、副瓣等性能测量,分析宽带性能的改善情况。本文加工了真实天线阵列进行验证,天线单元分布与仿真模型一致,并配备相应的有源控制网络与接收合成网络,用来控制实时延迟线并合成波束。通过在暗室使用微波平面近场测试系统,对阵列进行



(a) 方位面扫描仿真波瓣图



(b) 俯仰面扫描仿真波瓣图

图 3 方位面和俯仰面扫描 60° 仿真波瓣图

了方向图测试分析。天线阵面的典型测试结果统计如表 5~8 所示,分别为两种方案方位/俯仰扫描 60° 的实测结果。通过统计可以发现,与只有子阵级延迟相比,使用分级延迟后指向误差由 1.24°/1.63° 降低至 0.47°/0.24°,方向性系数和副瓣水平也有了不小的改善。

表 5 只有子阵级延迟十方位面扫描实测

频率	方向性 系数/dB	方位指向 误差	方位最大 副瓣/dB
F0-1.5	26.65	1.24°/14.80%	-7.74
F0-0.5	28.96	0.65°/8.68%	-13.40
F0	30.23	0.16°/2.25%	-14.40

表 6 只有子阵级延迟十俯仰面扫描实测

频率	方向性 系数/dB	方位指向 误差	俯仰最大 副瓣/dB
F0-1.5	27.38	1.63°/18.54%	-10.22
F0-0.5	30.05	0.67°/8.54%	-16.08
F0	30.75	0.24°/3.22%	-16.36

表 7 分级延迟十方位面扫描实测

频率	方向性 系数/dB	方位指向 误差	方位最大 副瓣/dB
F0-1.5	28.99	0.47°/5.61%	-14.31
F0-0.5	30.24	0.21°/2.80%	-14.05
F0	30.66	0.06°/0.85%	-14.84

表 8 分级延迟+俯仰面扫描实测

频率	方向性系数/dB	方位指向误差	俯仰最大副瓣/dB
F0-1.5	29.09	0.24°/2.73%	-10.47
F0-0.5	30.44	0.09°/1.15%	-16.88
F0	30.89	0.06°/0.80%	-16.70

在方位面和俯仰面扫描 60° 时,两种延迟方案在 F0-1.5 GHz 的测试方向图切面图如图 4 所示。可以看到和图 3 相比,两种方案的测试结果和仿真结果均相似,设计和测试的符合性良好。其中由于延迟线自身存在非线性和线性延迟误差,再考虑到天线阵面的装配、测试、标校等流程中不可避免地带入其他随机误差,测试和仿真存在轻微差异。

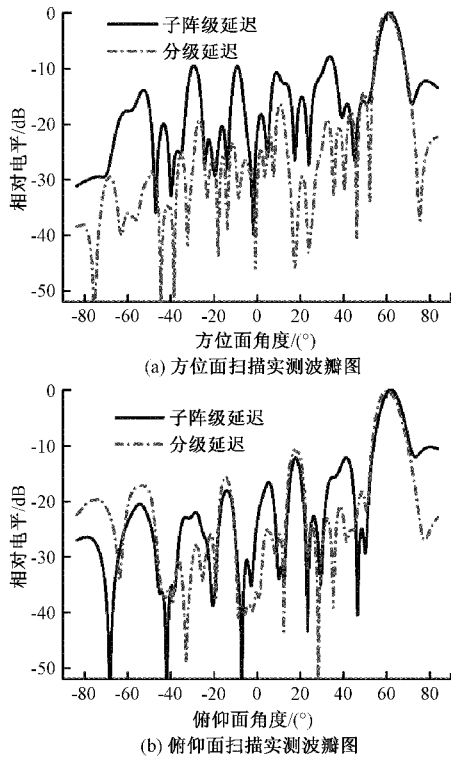


图 4 方位面和俯仰面扫描 60° 测试波瓣图

通过一定的设计要求和校准流程可以将仿真和设计的这些误差降到工程上可接受的范围内。与之前的研究相比,由于本文中良好的实时延迟线分级设计,兼顾延迟颗粒度、天线阵列性能与工程可实现性,以较小的器件密度代价实现了瞬时带宽的拓展,有效地提升了天线阵列的性能。

4 结 论

随着作战需求不断提升,战场电磁环境日益复杂,对雷达的宽带性能的要求也越来越高,如何在各种外部约束条件和当前的器件工艺水平下,提升雷达的瞬时带宽成为雷达设计中的重要考量因素。本文在具体工程边界限制下,

基于分级延迟方案,充分优化实时延迟线分布,结合仿真算法设计与实验测试分析,对不同延迟方案下的典型指标性能进行了讨论,验证采用分级延迟方案极大地改善了雷达的宽带性能,方案具有良好的工程实现性。在未来的研究中,可以继续提升延迟器件密度与颗粒度降低量化瓣、利用数字延迟替代电子器件提升延迟精度等方面继续攻关。

参考文献

- [1] 方红梅,宋志国,谢永鹏,等.大型非周期相控阵天线协同设计[J].电子测量技术,2021,44(1):1-6.
- [2] 夏琛海,牛宝君.机载 X 波段圆口径平面阵列天线的子阵划分研究[J].现代雷达,2018,40(6):57-61.
- [3] 曹兰英,董晔,郭维娜.机载火控雷达发展趋势探究[J].航空科学技术,2021,32(6):1-8.
- [4] 贾宏进,彭凡,蒋莹莹.国外舰载相控阵雷达的发展及未来趋势[J].雷达与对抗,2015,35(1):1-6.
- [5] 张光义.相控阵雷达瞬时带宽的几个问题[J].现代雷达,1990,12(4):1-10.
- [6] 陈泳,张玉华,肖达,等.宽带相控阵雷达的延时实现方法[J].现代雷达,2020,42(5):70-75.
- [7] 张蕾,郭陈江,丁君.子阵级应用延迟线对相控阵天线带宽改善的分析[J].航空计算技术,2008,37(6):65-67.
- [8] 郑小雨,刘洛琨,郭虹,等.相控阵天线瞬时带宽扩展方法研究[J].现代雷达,2014,36(11):40-44.
- [9] 顾军,胡瑾贤,李春来.一种解决宽带相控阵雷达瞬时带宽的方法[J].舰船电子对抗,2019,42(5):95-97.
- [10] 孙红兵,李树良,王琦,等.相控阵雷达天线延时技术的发展[J].微波学报,2021,37(5):9-15.
- [11] 曹书华,汪凌艳,王勋.子阵级数字阵列雷达波束形成性能分析[J].电子测量技术,2020,43(5):33-38.
- [12] 梁剑.基于时延的发射数字波束形成技术研究[J].国外电子测量技术,2020,39(6):55-59.
- [13] 明文华,王月,张永杭.宽带信号发射波形数字延迟方法研究[J].雷达科学与技术,2019,17(6):695-699,704.
- [14] 潘时龙,张亚梅.微波光子雷达及关键技术[J].科技导报,2017,35(20):36-52.
- [15] 高晖,邓晔,张金平,等.微波光子相控阵的技术分析与展望[J].雷达学报,2019,8(2):251-261.
- [16] 崔乃迪,寇婕婷,赵恒,等.应用于相控阵雷达的光子晶体慢光波导光实时延迟线[J].光学学报,2016,36(6):223-229.
- [17] 覃朝坚.高精度连续可调光纤延迟线技术[J].光通信技术,2016,40(7):53-55.

作者简介

姜玮,工学博士,工程师,主要研究方向为有源相控阵天线系统、天线测试、隐身技术等。

E-mail: freejw@126.com