

文章编号:1001-893X(2010)05-0080-04

宽带低副瓣微带反射阵列天线*

官正涛

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:为了实现便携式雷达设备的轻小型化,系统采用微带反射阵列天线替代传统的抛物反射面天线。该天线设计的难点是如何实现雷达工作频带内的天线低副瓣特性。采用微带延迟线的移相方案,并提出微带贴片与延迟线满足线性相移关系的匹配原则,实现了反射阵列天线的宽带低副瓣特性。实测结果表明,在 X 频段 3.2% 的带宽内,天线副瓣电平低于 -25 dB,并且天线效率不低于 50%。

关键词:便携式雷达;反射阵列;微带延迟线;低副瓣

中图分类号:TN82 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2010.05.018

A Microstrip Reflectarray Antenna with Wide Bandwidth and Low Side-lobe

GUAN Zheng-tao

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract:To realize lighter and smaller portable radar, the traditional paraboloid antenna is substituted with a microstrip reflectarray antenna. The design difficulty of the antenna is how to keep the low side-lobe property in the whole working band of the radar. A phasing scheme of the microstrip delay-line is used to realize low side-lobe of the microstrip reflectarray antenna. The match fundamental that the microstrip patch and delay-line are satisfied with the relationship of linear phase is adopted to realize wide bandwidth of the antenna. Test result shows that the side-lobe of the microstrip reflectarray is below -25 dB in the 3.2% bandwidth of the X-band, and the efficiency of the antenna is no less than 50%.

Key words:portable radar;reflect array;microstrip delay-line;low side-lobe

1 引言

便携式雷达可用于边境、海岸、战区前沿、战场环境侦察和监视,也可用于要地和高价值设施,如政府要地、军事基地、部队驻地、电站、油库等敌方攻击目标的防御和保护,具有极大的市场潜力。目前,便携式雷达多利用易折叠微带反射阵天线替代传统的抛物反射面天线研制而成的。微带反射阵天线的最大优点是反射面可以分块折叠,可以 3 层叠放,和收

发信机组装一个便携单元,能快速装卸,具有目前国外便携式雷达平板阵天线的便携优点,而且重量轻,天线增益高,生产成本低。

为雷达系统配套的微带反射阵列天线在设计过程中,除了要考虑介质损耗、单元互耦和表面波控制等因素以提高天线效率外,还要考虑措施以降低天线副瓣电平和增加天线副瓣电平带宽。合理选择印制板的材料参数和厚度,就能兼顾介质损耗、单元互耦和表面波抑制^[1-3]。

* 收稿日期:2009-09-28;修回日期:2010-02-26

基金项目:中国电子科技集团公司第十研究所基础技术基金项目(H07003.1)

Foundation Item:The Basic Technology Foundation of the 10th Institute of CETC(No. H07003.1)

本文采用微带延迟线移相的方案,降低了印制板蚀刻加工要求,保证了低副瓣的微带反射阵列天线的加工实现。准确控制反射单元的反射相位,包括在中心频点反射相位的准确提取,降低反射相位在频带内的色散,降低反射单元之间的耦合和降低表面波辐射,微带反射阵列天线就能实现宽带低副瓣特性。实验测试结果表明,该微带反射阵列天线在 X 频段 3.2% 的带宽内副瓣电平低于 -25 dB,并且天线效率不低于 50%。

2 天线原理

微带反射阵列天线的示意图及其坐标系统如图 1 所示。在双面板的第 1 层蚀刻有大量微带贴片天线单元。每个微带贴片都用 (m,n) 赋予一个序号,其中 m 代表行序号, n 代表列序号。微带贴片天线单元的示意图如图 1(d)。在图 1 中, A 、 B 分别为反射阵天线的方位和俯仰口径尺寸; C 为天线面下边缘; F 为馈源相位中心至反射阵面的距离,一般也称为反射阵天线焦距; S_x 、 S_y 分别为微带贴片单元在 x 和 y 方向的尺寸; L 、 W 为贴片在 x 和 y 方向的尺寸。

当从馈源辐射出来的电磁波照射到第 (m,n) 个微带贴片上时,由于它没有负载,故将接收到的电磁波二次辐射回自由空间。我们把这一过程中在贴片处的附加相位记为 $\varphi_{m,n}$,在反射阵中心的附加相位记为 φ_{00} ,并把从馈源相位中心到第 (m,n) 个贴片中心的距离记为 r_{mn} ,到反射阵中心的距离记为 r_{00} ,那么当满足:

$$(kr_{mn} + \varphi_{mn}) - (kr_{00} + \varphi_{00}) = 2i\pi \tag{1}$$

式中, i 为整数, k 为自由空间波数。则所有贴片的二次辐射波在 $z=0$ 平面同相,因而所有二次辐射波所形成的阵列天线主波束方向在 z 方向,这就是反射阵天线的基本工作原理。

3 天线设计

在仿真条件受限制的条件下,采用几何光学法分析与阵中单元局部仿真相结合的方法,设计微带反射阵列天线。反射面阵元的设计是微带反射阵列天线设计的重点和难点,阵元设计目标是微带贴片单元反射相位参数的准确提取。因此,从设计角度看,合理选择反射阵列天线的基本参数后,阵元设计满足要求,则天线技术状态就能满足指标要求。

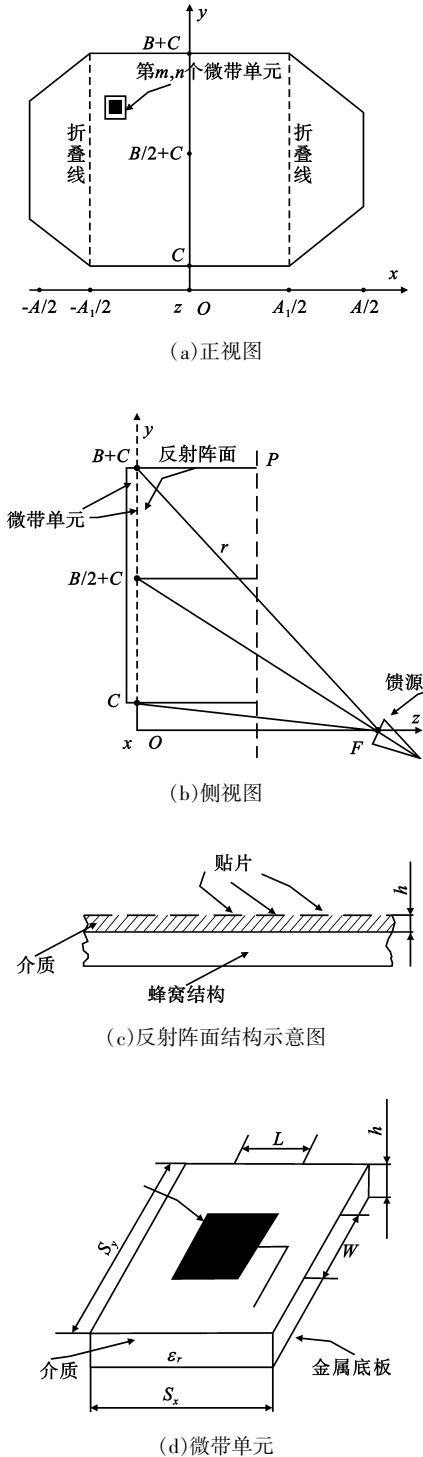


图 1 微带反射阵天线示意图及其座标系统
Fig.1 Microstrip reflectary antenna in the reference frame

3.1 天线基本参数

天线焦径比为 0.6,天线口径分布采用近似台劳分布,方位边缘照射电平约为 -16 dB,俯仰边缘照射电平约为 -8.5 dB。

3.2 阵元设计

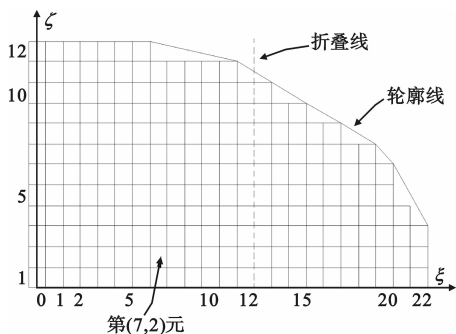


图2 天线第一象限阵元分布图

Fig.2 Units of antenna laying in the first quadrant

反射阵元关于阵面中点对称分布,设阵面中点为直角坐标系(ξ,ζ)原点,其第一象限阵元分布如图2所示。图中一个方格代表一个阵元,每个阵元的尺寸为0.6λ×0.6λ。采用几何光学法,可计算出每个单元的延迟相位φ_{mn}：

$$\varphi_{mn} = 2i\pi + (kr_{00} + \varphi_{00}) - (kr_{mn} + \varphi_{mn}) \quad (2)$$

式中,k为波数;r为馈源相位中心到阵元采样点的距离;φ为馈源引起的相位差,可忽略不计;下标mn指第m行、第n列的阵元。阵元延迟相位与延迟线长度的关系如下^[1]：

$$\varphi_{mn} = \frac{4\pi\sqrt{\epsilon_e}(L_{mn} + \Delta L)}{\lambda_0} \quad (3)$$

式中,L_{mn}为阵元延迟线长度;ε_e为传输线等效介电常数,λ₀为中心频率对应的波长;ΔL为端头效应引起的附加相位的等效长度,实际设计中不用考虑。

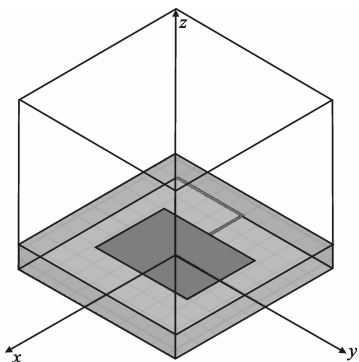


图3 反射阵元微带延迟线仿真的“元胞”模型

Fig.3 Simulation model of the reflecting unit

对辐射贴片、微带延迟线的理论设计没有考虑阵列中表面波和互耦的影响,延迟线相位的设计也是建立在单个微带贴片与延迟线匹配的基础上,这与实际情况有所差别。因此,必须采用仿真软件分析,仿真

的“元胞”模型如图3所示。理论设计结果可作为仿真优化的初始值,还能定性地指导优化过程。

图4中实线为理论计算结果,点划线为“元胞”模型的计算结果。除接头处延长1.6mm范围内的延迟线与延迟相位不满足线性变化外(这是由于接头处的不连续性,引起的高次模所致),其余都近似满足式(3)的线性关系,仿真结果与理论结果误差在±2°范围内。因此,在实际设计中,将延迟线1.6mm处设为参考相位。

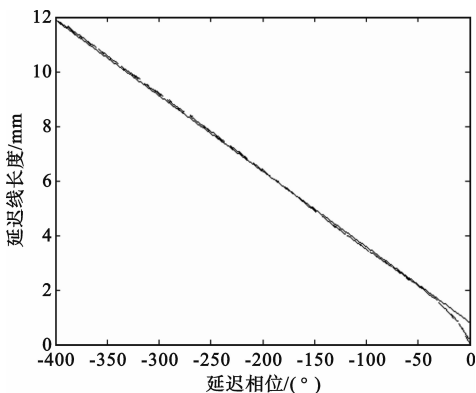


图4 微带延迟线与延迟相位的关系

Fig.4 Relationship between the microstrip delay-line and the delaying phase

为了便于后续的ANSYS参数化语言(APDL)自动制图,将仿真结果在MATLAB中拟合,则延迟线长度对延迟相位的拟合公式如下：

$$\begin{aligned} L = & -2.9232 \times 10^{-14} \phi^6 - 3.8129 \times 10^{-11} \phi^5 - \\ & 1.923 \times 10^{-8} \phi^4 - 4.6818 \times 10^{-6} \phi^3 - \\ & 5.5962 \times 10^{-4} \phi^2 - 5.8039 \times 10^{-2} \phi + 0.17713 \end{aligned} \quad (4)$$

将式(1)代入式(3)可得每个单元的延迟线长度,从而完成设计。

采用几何光学法分析反射阵列天线方向图特性。首先,在FEKO中分析角锥喇叭馈源,以其相位中心为坐标原点,在反射阵阵元中心位置提取阵元幅度和相位信息;其次,将幅度和相位信息导入MATLAB平台作为二维点源阵(每个点源为反射阵阵元中心)的幅度和初始相位;再次,根据波束扫描指向确定各阵元补偿相位量;最后,计算各点源在各方向上电场矢量叠加的模,即为反射阵列天线的方向图。天线在中心频点的方位方向图和俯仰方向图如图5所示,其中方位面波束宽度为2.75°,副瓣电平为-34dB;俯仰面波束宽度为4.7°,副瓣电平为-21.4dB。

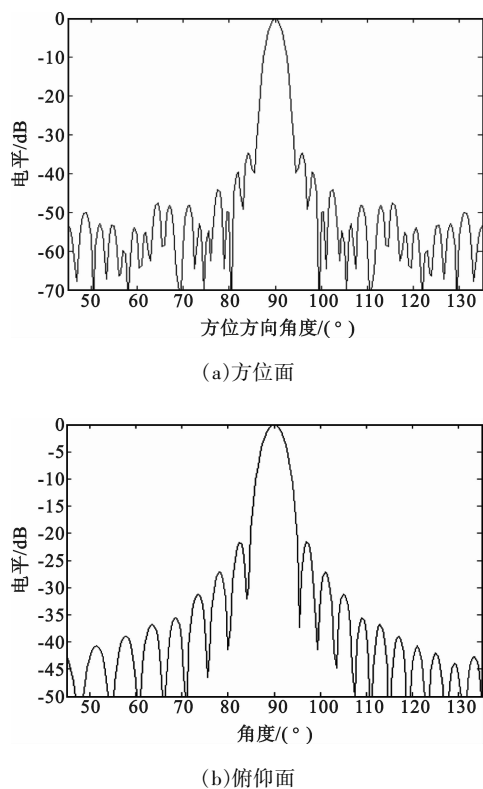


图 5 几何光学法分析的天线方向图

Fig.5 Pattern of the antenna using GO method

4 实验结果及分析

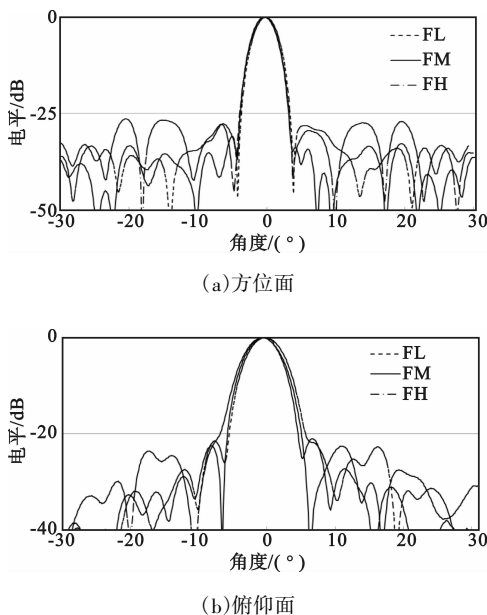


图 6 天线实测方向图

Fig.6 Measure pattern of the antenna

为了验证微带反射阵列天线的设计,对天线实物进行测试。测试结果表明,天线中心频点方位面波束宽度为 2.79°,副瓣电平为 -32 dB;俯仰面波束

宽度为 4.79°,副瓣电平为 -21.1 dB,如图 6 所示,在工作频段内,天线增益不低于为 32.9 dBi。天线实测结果与理论计算结果一致,波束宽度的增加和副瓣电平的抬高是由于加工误差引起的。这说明几何光学法与阵元相位提取技术相结合的分析方法切实有效,设计精确。

由图 6 可见,在天线的 3.2% 的工作频段内,天线的效率优于 50%,并且方位面副瓣电平均低于 -25 dB,满足便携式雷达天线的技术要求。

5 结 论

本文提出的微带延迟线移相的方案适用于低副瓣微带反射阵列天线设计,提出的微带贴片和微带延迟线的匹配原则能进一步拓宽微带反射阵列天线的低副瓣带宽。阵元的相位提取技术能有效提高设计精度,适用于所有阵列天线的设计,不受阵元形式的限制,具有通用性。

该微带反射阵列天线成功应用于便携式雷达系统,不仅电性能完全替代传统的抛物反射面天线,并且天线可以折叠,体积减小了三分之二,重量也减少了 60%。

参考文献:

[1] RONALD D,JAVOR, WU Xiao-dong, et al. Design and performance of a microstrip reflectarray antenna[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 1995, 43(9): 932 – 939.

[2] HUANG J, POGORELSKI R J. A ka-band microstrip reflectarray with elements having variable rotation angles[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 1998, 46(5): 650 – 656.

[3] POZAR D M, TARGORIGSKI S S, SYRIGOS D S. Design of millimeter wave microstrip reflectarrays[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 1997, 45(2): 287 – 296.

作者简介:

官正涛(1978 –),男,四川人,2004年毕业于西南交通大学电磁场与微波技术专业,一直从事天线设计与测量工作,主要研究领域包括多波束天线、波导裂缝阵天线、微带阵天线、微带反射阵天线等,曾获部级成果一等奖一项。

GUAN Zheng-tao (male) was born in Sichuan Province, in 1978. He graduated from Southwest Jiaotong University in 2004. His research interests include multibeam antenna, waveguide slotted antenna, microstrip array antenna, microstrip reflectarray antenna, etc.

Email: zhtguan@163.com