

文章编号: 2095-4980(2016)02-0236-06

宽频带多波束天线阵及其 RCS 的缩减设计

梁洪灿, 贺友龙, 潘 伟, 倪文俊, 蒋凡杰

(中国电子科技集团公司 第 51 研究所, 上海 201802)

摘要: 设计了一种工作于 P,L 波段多波束天线阵, 形成的 9 个波束在方位面实现 90° 空域范围覆盖。多波束通过模拟延迟线构成的移相网络实现, 同时运用小型化技术将移相网络集成到功分网络中。通过印制电路板工艺实现各馈线所需的相移值。阵列单元采用印刷对数周期天线形式, 同时在阵列安装座底板上粘贴吸波材料, 进而显著缩减了阵列在 X,Ku 波段的雷达散射截面(RCS)。理论仿真分析及实验测量结果证明, 该天线阵不仅具有宽频带、波束方向图特性良好, 而且方位面 180° 范围内平均 RCS 小于 16 m^2 , 满足系统设计要求。

关键词: 多波束; 阵列天线; 宽频带; 雷达散射截面缩减

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0236

Design of broadband multibeam antenna array and RCS reduction

LIANG Hongcan, HE Youlong, PAN Wei, NI Wenjun, JIANG Fanjie

(No.51 Institute, China Electronic and Technology Corporation, Shanghai 201802, China)

Abstract: A multibeam antenna array at P and L bands is proposed, covering the 90° space range in the azimuth. The multibeam can be acquired by phase shifter network that consists of analog delay lines, and the phase shifter network is integrated with power divider network by using miniaturization techniques. The phase shift values are realized by Printed Circuit Board(PCB) process. The Radar Cross Section(RCS) reduction of the antenna array is realized at X and Ku bands, by adopting Log Periodic Dipole Antenna(LPDA) element and pasting the absorbing material to the bottom surface of the array installation. Theoretical analysis and measurement results show that the array is with the features of broadband and multibeam radiation pattern. At the same time, the average RCS is less than 16 m^2 within 180° space in the azimuth, which satisfies the requirements of the system design.

Key words: multibeam; antenna array; broadband; Radar Cross Section reduction

在高科技综合电子战争中, 隐身技术扮演着越来越重要的角色, 并且越来越受到重视。不管机载、车载, 还是舰载平台设备, 主要威胁是雷达探测, 故而需要采取隐身技术, 来提高飞行器、导弹等的生存、突防和纵深打击能力。但对于低可见平台而言, 对其总雷达散射截面(RCS)贡献较大的却是平台上的天线。随着雷达探测和隐身技术的发展, 武器平台上的天线 RCS 控制技术成为武器系统隐身研究重点。天线系统由于其自身的工作原因, 必须保证正常辐射和接收, 因此常规的隐身措施, 如低 RCS 外形设计^[1]、频率选择表面技术^[2]、雷达吸波材料^[3]、阻抗加载技术、无源对消和有源对消技术等, 不能简单地应用在天线隐身上。这就使天线系统的隐身成为隐身技术中特别需要解决的问题^[4-5]。为尽量缩减 RCS 值, 本文设计的 P,L 波段多波束天线阵考虑了以下 2 点: a) 组阵单元选择方面, 尽量采用无大面积金属结构的的天线形式。对数周期天线因其具有超宽频带、方向图特性优良等优点, 故最终采用印刷对数周期天线作为布阵单元; b) 阵面安装板在 X,Ku 波段时相当于电尺寸超大的金属板, 对整个阵列散射性能造成极大影响。采用在安装板平面上粘贴吸波材料措施, 来降低金属板对来波信号的反射, 从而降低整个天线阵的 RCS。文中最后实测表明粘贴吸波材料使天线阵 RCS 值得到明显缩减。

1 天线阵设计原理

根据系统指标要求, 本文设计的 P,L 波段多波束天线阵, 在方位面同时覆盖范围为 90° 。为了达到系统指标

要求, 天线阵采用模拟多波束形式, 根据理论分析^[6-8], 采用 9 个波束来实现方位面 90°范围覆盖。9 个波束指向位置分别约为: 0°, ±10°, ±20°, ±30°, ±40°。多波束天线阵是由 P,L 线阵和波束形成网络组成的。

天线阵在方位面进行组阵, 在 P,L 波段均采用传统线阵形式。线阵各单元间均匀步进的相移值, 是通过波束形成网络中微带延迟线来实现, 使得阵列波束扫描到空间给定的角度上。为了抑制大角度扫描时波束方向图的栅瓣, 阵元间距 d 应满足:

$$d \leq \frac{\lambda_h}{1 + \sin \theta_0} \tag{1}$$

式中: λ_h 为最高频率波长; θ_0 为最大扫描角。经仿真设计, P,L 波段线阵的阵元间距 $d \approx 0.45\lambda_0$, 其中 λ_0 为中心工作频率波长。P 波段组阵单元数 12 个, L 波段组阵单元数 16 个, 分上下 2 行排布; 为了能更好地接收多种极化信号, 阵元采用 45°线极化放置。P,L 波段线阵的工作频率相对带宽分别为: 71% 和 85%。另外 P,L 波段 2 组单元作为系统的个体识别、消隐天线使用。P,L 波段多波束天线阵结构示意图如图 1 所示。

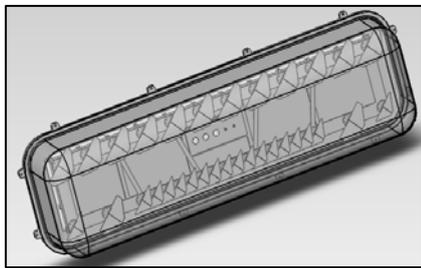


Fig.1 Illustration of antenna array structure
图 1 天线阵结构示意图

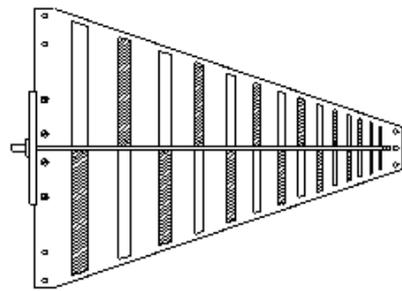


Fig.2 Illustration of element structure
图 2 单元结构示意图

1.1 阵列单元

阵列单元采用双面覆铜的印刷对数周期天线形式, 属于经典非频变宽带天线, 结构示意图如图 2 所示。根据对数周期天线基本原理, 通过 HFSS 仿真软件的仿真与优化设计, 便可获得良好的阻抗匹配特性。使用矢量网络分析仪, 测试 L 波段线阵阵中单元电压驻波比, 由图 3 中曲线可知阵中单元 $VSWR \leq 1.7$, 具有较低的驻波, 传输特性良好。

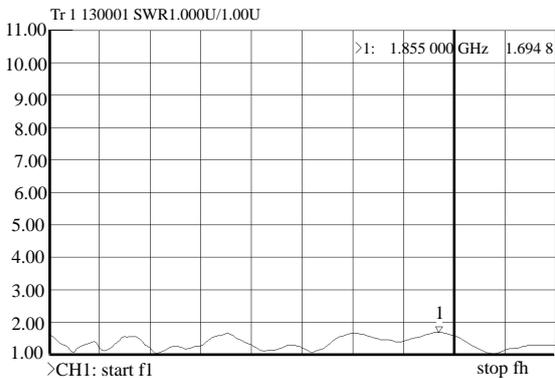


Fig.3 Standing wave ratio of element voltage
图 3 单元驻波比

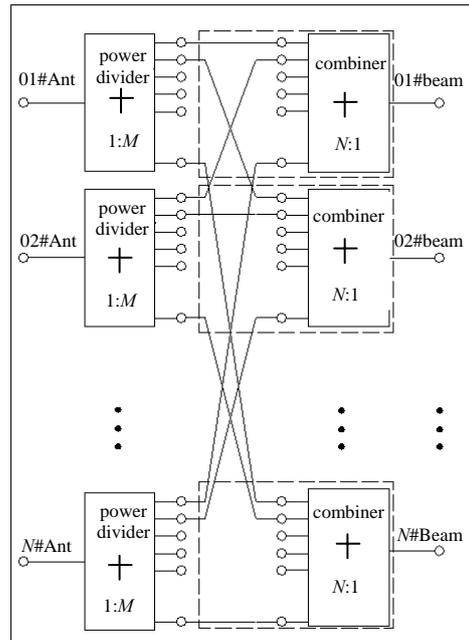


Fig.4 Schematic diagram of the shaped multibeam network
图 4 多波束形成网络原理图

1.2 多波束形成网络设计

多波束形成网络原理如图4所示, N 个天线单元(或阵)收到的信号经过功分器分为 M 路, 经移相网络后进行合路, 形成扫描角度不同的 M 路波束输出。本文设计天线阵经波束形成网络, 在方位面($\pm 45^\circ$ 范围内)实现9波束。多波束形成网络由功分器和移相合路器组成, 其中移相合路器由微带延迟线和合路器构成。

1.3 天线阵结构实现

工程上考虑到防雨及耐盐雾要求, 天线阵面采用天线罩密封保护。天线罩材质为玻璃钢, 具有较强的耐老化、耐紫外线能力, 在微波暗室对采用该材质天线罩进行透波率和天线方向图测试, 测试结果表明该材料对天线性能无明显影响。

宽频段多波束天线阵实物如图5所示, 一方面为避免底板反射造成天线驻波和方向图恶化, 另一方面为了进一步降低整个阵列的 RCS 值, 设计时就考虑在天线金属底座铺设吸波材料, 来减缩天线阵在 X, Ku 波段的 RCS 值, 利于设备隐身。多波束天线阵实物最大外形尺寸为: $2.65\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 。



Fig.5 Picture of the antenna arrays
图5 天线阵实物

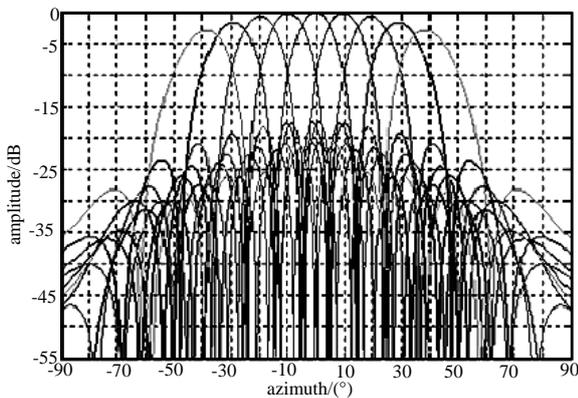


Fig.6 Simulated pattern of the center frequency in P-band
图6 P波段中心频率仿真方向图

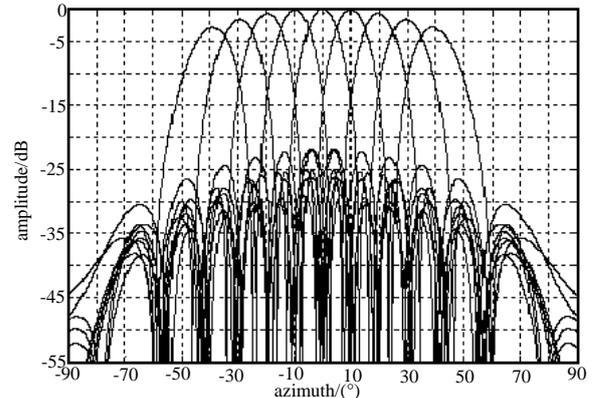


Fig.7 Simulated pattern of the center frequency in L-band
图7 L波段中心频率仿真方向图

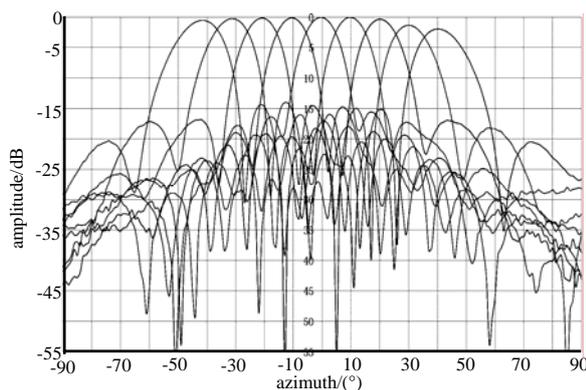


Fig.8 Measured pattern of the center frequency in P-band
图8 P波段中心频率实测方向图

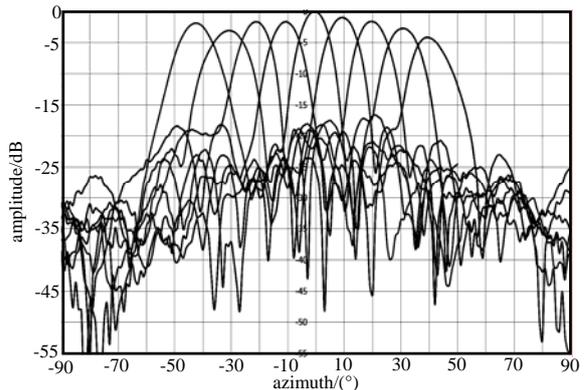


Fig.9 Measured pattern of the center frequency in L-band
图9 L波段中心频率实测方向图

2 仿真设计与测试

2.1 天线阵多波束的仿真设计与测试

同时为满足低副瓣的要求, 对各单元进行幅度加权馈电, 天线阵采用幅度加权压低副瓣电平同时拓宽波瓣宽度。P波段的12阵元的幅度加权系数(电流分布)依次为: $-3\text{ dB}, -2\text{ dB}, -1\text{ dB}, 0\text{ dB}, 0\text{ dB}, 0\text{ dB}, 0\text{ dB}, 0\text{ dB}, 0\text{ dB}, -1\text{ dB}, -2\text{ dB}, -3\text{ dB}$ 。

-2 dB,-3 dB; L 波段的 16 阵元的幅度加权系数(电流分布)依次为: -7 dB,-7 dB,-5 dB,-4 dB,-2 dB,0 dB, 0 dB,0 dB,0 dB,0 dB,-2 dB,-4 dB,-5 dB,-7 dB,-7 dB。不等幅馈电网络通过在功分器中加衰减网络来实现。根据阵列理论^[6-8],采用 matlab 软件仿真,得到了图 6、图 7 所示 P,L 波段中心频率 f_0 的 9 波束方向图。图 8、图 9 是实测 P,L 波段中心频率 f_0 的 9 波束方向图,由各波束曲线对比数据可知,实测同仿真电性能指标基本一致,满足系统技术指标要求。

2.2 天线阵 RCS 的预估与测试

当物体被电磁波照射时,能量将朝各个方向散射。散射场与入射场之和就构成空间的总场。散射能量的空间分布依赖于物体的形状、大小、结构以及入射波的频率等特性。能量的这种分布,人们用散射截面来表征,它是物体的一个假想面积。物体本身被称为目标或散射体。

RCS 是基于平面波照射下目标各向同性散射的概念,在给定方向上返回或散射功率的一种量度,它用入射场的功率密度归一化,形式上定义式为^[9]:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{S_s}{S_i} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|H_s|^2}{|H_i|^2} \quad (2)$$

式中: σ 为雷达散射截面; S_s 和 S_i 为雷达接收机处的散射波和目标处入射波的能量密度; E_s 和 E_i 为雷达接收机处的散射电场和目标处入射电场; H_s 和 H_i 为雷达接收机处的散射磁场和目标处入射磁场。

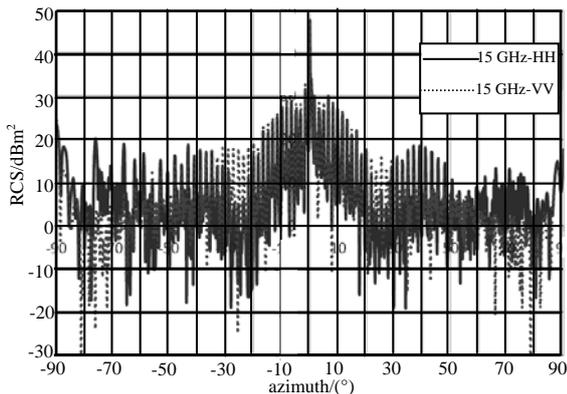


Fig.10 RCS of antenna at 15 GHz without absorbing material
图 10 15 GHz 天线阵不加吸波材料 RCS 值

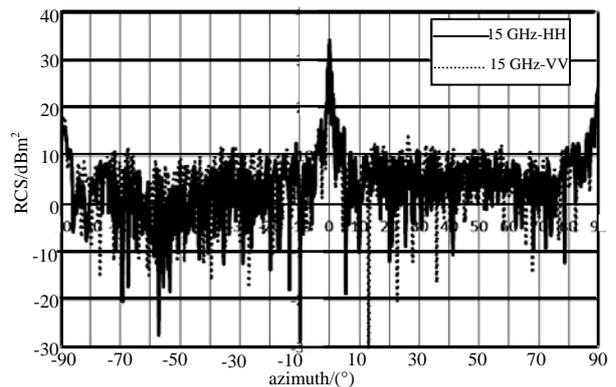


Fig.11 RCS of antenna at 15 GHz with absorbing material
图 11 15 GHz 天线阵加吸波材料 RCS 值

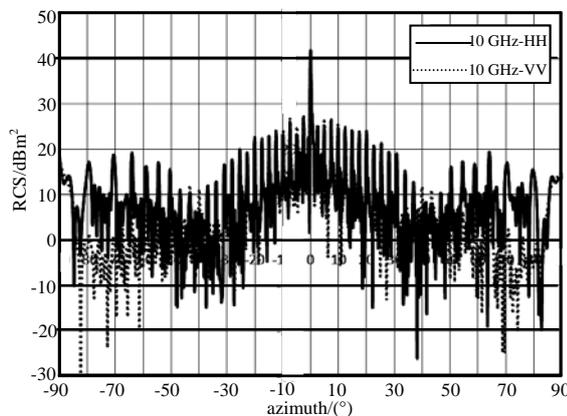


Fig.12 RCS of antenna at 10 GHz without absorbing material
图 12 10 GHz 天线阵不加吸波材料 RCS 值

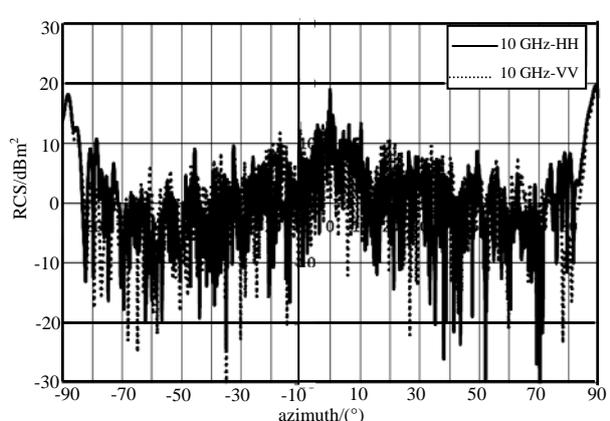


Fig.13 RCS of antenna at 10 GHz with absorbing material
图 13 10 GHz 天线阵不加吸波材料 RCS 值

对于较规则目标的雷达散射截面计算,比如阵列底座,忽略阵列单元的影响,为了便于评估可用金属平板代替。对于金属平板,可用光学类反射器公式来预估。电磁波垂直入射时,金属平板反射器的单站 RCS 最大值估算公式为:

$$\sigma_{\max} = 4\pi a^2 b^2 / \lambda^2 \quad (3)$$

式中： a 和 b 为金属平板的长和宽，单位为 m ； λ 为波长，单位为 m 。天线阵底座等效的金属平板的尺寸为： $a=0.6 m$ ， $b=2.5 m$ 。在频率为 10 GHz 和 15 GHz，电磁波垂直入射天线阵时，等效的天线阵单站最大 RCS，代入式(3)，计算可得： σ_{\max} 分别为 44.9 dBm² 和 48.5 dBm²。

图 10~图 13 分别是天线阵底板加和不加吸波材料，天线在 X,Ku 波段 RCS 实测曲线，方位面角度范围 $\pm 90^\circ$ ，纵坐标 RCS 单位为 dBm²。

根据实测天线阵不加吸波材料的测试数据，在频率 10 GHz 时，2 种极化下天线阵单站最大 RCS 为 41.7 dBm² 和 41.9 dBm²；在频率 15 GHz 时，2 种极化下天线阵单站最大 RCS 为 47.6 dBm² 和 47.4 dBm²，与等效计算值较为吻合。

表 1 天线阵在 10 GHz 和 15 GHz 的 RCS 值
Table1 RCS of antenna array at 10 GHz and 15 GHz

10 GHz-HH		10 GHz-VV		15 GHz-HH		15 GHz-VV		remark
RCS/m ²	RCS/dBm ²	RCS/m ²	RCS/dBm ²	RCS/m ²	RCS/dBm ²	RCS/m ²	RCS/dBm ²	
48.9	16.9	46.7	16.7	97.7	19.9	95.5	19.8	without
4.9	6.7	4.1	6.1	13.2	11.1	15.3	11.9	with
average RCS($\pm 90^\circ$ azimuth space)								

图 10~图 13 和表 1 中 VV、HH 分别表示垂直极化和水平极化，表 1 备注中“without”表示底座不加吸波材料，“with”表示底座加吸波材料。从图中曲线和表 1 中统计数据可知，在天线座底部铺设吸波材料，能大大降低天线 RCS 值，使得天线阵在方位面 $\pm 90^\circ$ 范围内，10 GHz 和 15 GHz 下，平均 RCS 值分别小于 5 m² 和 16 m²，满足设计指标平均 RCS 值 20 m² 要求。从实测结果可以看出，天线阵底座两端金属面散射也较大，由图中曲线 $\pm 90^\circ$ 附近 RCS 值可知，后续可以在底座外壁四周喷涂雷达吸波漆，进一步来降低天线阵平均 RCS 值，更有利于设备隐身。

3 结论

本文设计的双频段多波束天线阵，采用了微带板对数周期天线作为阵元，并在天线阵底座上铺设吸波材料。实测结果表明：通过在天线阵底座上铺设吸波材料，可以大大缩减天线阵 RCS 值，具有一定隐身效果，并且天线阵电性能指标不受影响。在工程应用中具有一定的参考价值。

参考文献：

- [1] PAN W B,HUNG C,CHEN P,et al. A low_RCS and high-gain partially reflecting surfaces antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014,62(2):945-949.
- [2] WANG N Z,LIU Q,WU C Y,et al. Wideband Fabry-Perot resonator antenna with two complementary FSS layers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014,62(5):2463-2471.
- [3] 余定峰,耿攀,徐正喜,等. 基于电磁建模的舰船雷达隐身技术[J]. 舰船科学技术, 2014(11):80-85. (YU Dingfeng,GENG Pan,XU Zhengxi,et al. Research on radar stealth technology of ship based on electromagnetic modeling[J]. Ship Science and Technology, 2014(11):80-85.)
- [4] JIANG Wen,ZHANG Yang,DENG Zhaobin,et al. Novel technique for RCS reduction of circularly polarized microstrip antennas[J]. Journal of Eletromagnetic Waves and Applications, 2013,27(9):1077-1088.
- [5] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社, 2005. (HUANG Peikang,YIN Hongcheng,XU Xiaojian. Radar Target Characteristic[M]. Beijing:Pulishing House of Electronics Industry, 2005.)
- [6] RAHIM M K A,GARDNER P. Microstrip bandwidth enhancement using log periodic technique with inset feed[J]. Jurnal Teknologi, 2004,41(4):53-66.
- [7] 夏勇,张浩,李晓娟,等. 二次雷达波束控制系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(3):266-269. (XIA Yong,ZHANG Hao,LI Xiaojuan,et al. Design of beam steering system for secondary surveillance radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(3):266-269.)
- [8] MATTHEW B,LIU W. Space array design for wideband beamforming with reduced complexity in tapped delay lines[J]. IEEE/ACM Trans. on Speech and Language Processing, 2014,22(8):1236-1247. (下转第 244 页)