



高增益低旁瓣宽扇形波束脊形波导缝隙天线阵列设计

姚华飞, 邱琳琳, 王安康, 马亚东

Design of high-gain low-sidelobe wide-sector beam slotted ridge waveguide antenna array

YAO Huafei, QIU Linlin, WANG Ankang, and MA Yadong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2023247>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

77 GHz汽车角雷达宽波束平坦增益阵列天线设计

Design of 77 GHz automotive angular radar array antenna with wide beamwidth and flat gain

电波科学学报. 2021, 36(1): 43–48

低副瓣任意波束直接合成算法研究

Direct synthesis of low sidelobe arbitrary beam

电波科学学报. 2019, 34(3): 278–286

W波段宽带SIW背腔缝隙天线

Wideband substrate integrated waveguide cavity-backed slot antenna in W-band

电波科学学报. 2018, 33(4): 404–410

一种低剖面宽带二维宽角扫描圆极化阵列天线

A low profile and wideband circularly-polarized array antenna with 2D wide-angle scanning

电波科学学报. 2017, 32(6): 694–701

一种波导窄边裂缝天线缝隙倾角的改进方法

An improved method of slot incline angle of waveguide narrow wall slot antenna

电波科学学报. 2018, 33(1): 21–26

宽角扫描的圆极化相控线阵

Wide-angle scanning circularly polarized phased array antenna

电波科学学报. 2019, 34(5): 552–557



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

姚华飞, 邱琳琳, 王安康, 等. 高增益低旁瓣宽扇形波束脊形波导缝隙天线阵列设计[J]. 电波科学学报, 2024, 39(3): 544-551. DOI: 10.12265/j.cjors.2023247

YAO H F, QIU L L, WANG A K, et al. Design of high-gain low-sidelobe wide-sector beam slotted ridge waveguide antenna array[J]. Chinese journal of radio science, 2024, 39(3): 544-551. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2023247

高增益低旁瓣宽扇形波束脊形波导缝隙天线阵列设计

姚华飞* 邱琳琳 王安康 马亚东
(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450047)

摘 要 提出了一种具有高增益低副瓣的脊形波导缝隙阵列天线, 中心工作频率为 24.125 GHz, 其包括一个八路馈电网络和一个尺寸为 400 mm×65 mm 的 8×40 辐射缝隙。通过波束合成方法提取天线阵列的期望激励分布, 采用截止模式功率分配器灵活控制功率比。使用三维电磁仿真软件 HFSS 综合仿真计算, 在中心频率处, 获得仰角平面上的旁瓣电平 (sidelobe level, SLL) 和半功率波束宽度 (half power beam width, HPBW) 分别为 -20.9 dB 和 54.5°、方位角平面上的 SLL 和 HPBW 分别为 -27.8 dB 和 2.5°、峰值增益为 23.2 dBi, 仿真结果与理论分析一致。此天线可以同时实现低旁瓣的宽扇形波束, 覆盖较宽的检测范围, 并减轻来自其他方向的干扰, 具有应用于空中探测、反无人机、气象雷达和成像雷达的潜力。

关键词 脊形波导阵列天线; 低副瓣; 宽扇形波束; 截止模式功率分配器; 空中探测

中图分类号 TN820

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2024)03-0544-08

DOI 10.12265/j.cjors.2023247

Design of high-gain low-sidelobe wide-sector beam slotted ridge waveguide antenna array

YAO Huafei* QIU Linlin WANG Ankang MA Yadong

(The 27th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Zhengzhou 450047, China)

Abstract In this paper, a slotted ridge waveguide antenna array (SRWAA) with high-gain and low-sidelobe and a center frequency of 24.125 GHz is proposed, consisting of an eight-way feeding network and an 8×40 radiating slot with a dimension of 400 mm×65 mm. The expected excitation distribution for the antenna array is extracted by beam synthesis method. By using a cut-off-mode power divider, the power ratio can be flexibly controlled. The sidelobe level (SLL) and half-power beam width (HPBW) in elevation plane are -20.9 dB and 54.5°, and the SLL and HPBW in azimuth plane are -27.8 dB and 2.5° respectively, and the peak gain is 23.2 dBi by using 3D electromagnetic simulation software HFSS. The simulation results are in good agreement with the theoretical analysis. The SRWAA can realize wide-sector beams with low-sidelobe at the same time, which covers a wide detection range and mitigate the interference from other directions. This work has the potential to be applied to air detection, antidrone, meteorological radar, and imaging radar.

Keywords slotted ridge waveguide antenna array (SRWAA); low-sidelobe; wide-sector beams; cut-off-mode power divider; air detection

0 引 言

随着通信技术的快速发展, 许多国家面临的空

中威胁也在不断增加, 军用和民用雷达对空中探测的需求与日俱增, 开发用于精确探测空中目标雷达的研究正在蓬勃兴起^[1-2]。作为整个雷达系统的收发

核心部件, 天线辐射能量并接收信号, 帮助系统检测和跟踪目标。因此雷达的工作环境和模式决定了天线的设计要求, 如带宽、波束宽度和增益; 反过来, 天线性能在一定程度上决定了雷达的整体性能。考虑到目标的分布是随机的, 在目标检测中, 宽扇形波束比笔状波束更有效^[3]。此外, 地面上物体的存在, 如汽车和人, 也会对接收信号产生干扰和杂波, 如图 1 所示。因此天线阵列应具有低旁瓣和高增益宽扇形波束。

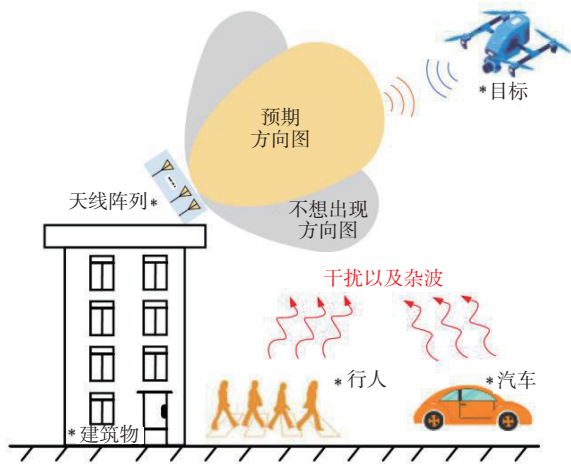


图 1 地面物体对接收信号产生的干扰和杂波

Fig. 1 Schematic of interference and clutter generated by ground objects on received signals

近年来, 宽扇形波束在障碍物探测^[4]、气象雷达^[5]、卫星通信^[6]、无线通信^[7]和成像系统^[8]中得到了广泛的应用。文献[4]为 24 GHz 的汽车雷达应用开发了增益为 11.1 dBi 的贴片天线阵列, 可以在 E 平面中实现 150° 的半功率波束宽度 (half power beam width, HPBW), 但其扇形波束的旁瓣电平 (sidelobe level, SLL) 仅为 -10 dB, 容易受到杂波和其他方向干扰的干扰, 因此不适合用于空中探测应用。

文献[9]提出了一种将泰勒方法和伍德沃德综合法相结合的方法, 可以在较低 SLL 的同时实现光束的任意形状, 该赋形波束理论清晰、应用方便、编程简单, 但由于激励幅度比大且互耦不可忽略, 很难实现低旁瓣宽扇形波束。

本文通过脊形波导缝隙天线阵列实现具有高增益和低旁瓣的宽扇形波束^[10-12]。基于文献[9]中提出的波束形成方法, 获得了宽扇形波束在仰角平面上的振幅和相位分布, 并通过位于脊形波导子阵列天线上壁的缝隙得到方位平面上的辐射方向图。通过八路截止模式功率分配器和连接到功率分配器每个端口移相器的馈电网络实现期望的功率比和相位分布。通过仿真结果对脊形波导缝隙天线阵列的整体

结构进行了仿真和设计。所采用的波束形成方法以及截止模式功率分配器设计思路, 有助于实现期望的宽扇形波束方向图。

1 赋形波束综合理论

阵列天线的辐射性能主要受阵元数目、间距、激励幅度和相位四个参数影响。对于具有 $2M$ 个单元的等距线性天线阵列, 如图 2 所示, 阵因子可以写成^[13]

$$f(\theta, \theta_0) = \sum_{m=1}^{2M} a_m e^{jkd(m-M-0.5)(\sin \theta - \sin \theta_0)} \quad (1)$$

式中: $(a_1, a_2, \dots, a_{2M})$ 为激励幅度, 可以根据所需的 SLL 通过泰勒综合来获得; $k = 2\pi/\lambda$ 为波在自由空间中的传播常数; d 为阵列两个相邻元素之间的距离。

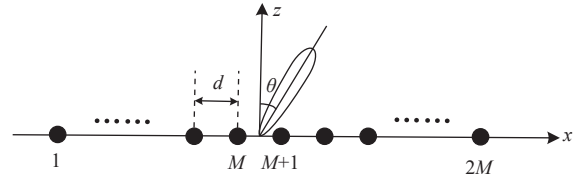


图 2 等间距直线阵列

Fig. 2 Linear array antenna with even elements

基于天线叠加原理, 可将赋形波束看作是由 $2M$ 个阵元合成的 N 个沿不同方向辐射的笔状波束的叠加。赋形波束方向图可以表示为^[9]

$$F(\theta) = b_1 f(\theta, \theta_1) + b_2 f(\theta, \theta_2) + \dots + b_N f(\theta, \theta_N) \quad (2)$$

式中: $b_1, b_2, \dots, b_N$ 为相应 N 个笔状波束的幅度加权; $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ 为不同的扫描方向。

为实现赋形波束, 应该确定扫描方向 θ_i 和系数 b_i 。为了简单起见, 采用等角度间隔采样原理, 采样点的数量 N 取决于天线阵列赋形方向图的波束宽度^[14], 可以使用以下公式获得:

$$N \geq \frac{\theta_{s0.5}}{\theta_{0.5}} + 1 \quad (3)$$

式中: $2\theta_{s0.5}$ 为赋形波束的 HPBW; $2\theta_{0.5}$ 为在式 (1) 中形成笔状波束的 HPBW。

通过式 (1) 和 (2), 新的阵列因子可以表示为

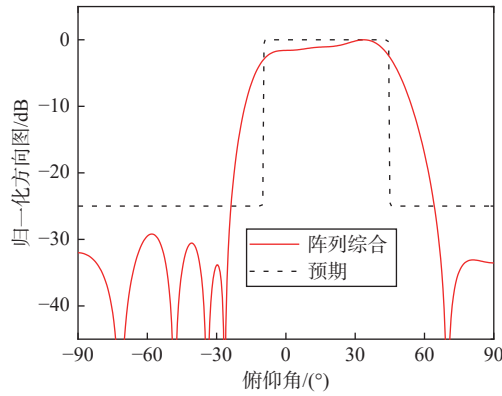
$$\begin{aligned} F(\theta) &= \sum_{n=1}^N b_n \sum_{m=1}^{2M} a_m e^{jkd(m-M-0.5)(\sin \theta - \sin \theta_n)} a \\ &= e^{-jkd(M+0.5)\sin \theta} \sum_{m=1}^{2M} \sum_{n=1}^N b_n [a_m e^{jkd(M-m+0.5)\sin \theta_n}] e^{jkd\sin \theta} \end{aligned} \quad (4)$$

则可以获得赋形波束的复数馈电激励 I_m 为

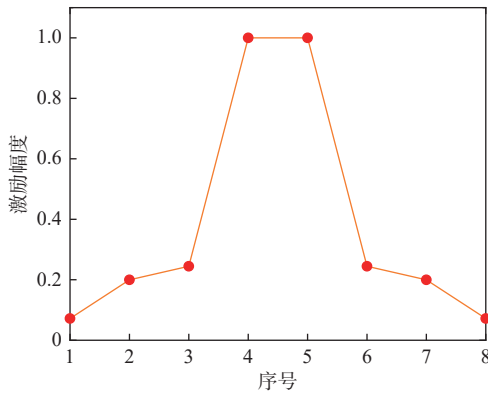
$$I_m = a_m \sum_{n=1}^N b_n e^{jkd(m-M-0.5)\sin \theta_n} \quad (5)$$

扇形波束也被广泛应用于微波中继通讯、远程雷达、射电天文、卫星接收等用途的天线, 特别是搜索雷达和警戒雷达要求天线方向图为扇形波束。

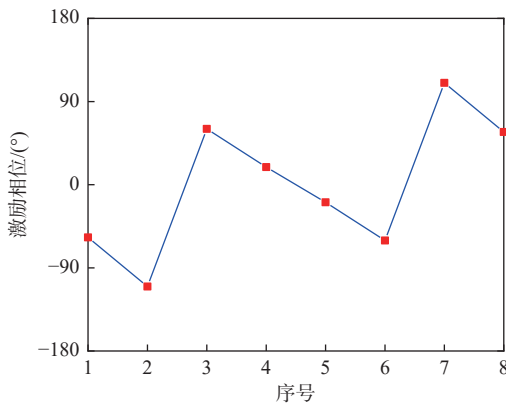
本设计中,需要一个 SLL 为 -20 dB 的从 -10° 到 45° ($2\theta_{s0.5}=55^\circ$) 的扇形波束。理论计算的 E 平面辐射方向图如图 3(a) 所示。对于沿 x 轴的等距线性阵列,元素数量 ($2M$) 为 8,相邻两个元素之间的间距为 0.5λ 。采用上述赋形波束综合方法,通过使用泰勒合成,获得激励振幅 ($a_1, a_2, \dots, a_{2M}$)。由八元线性阵列形成笔状波束,其 HPBW($2\theta_{0.5}$) 为 12.5° 。然后,根据式 (3) 得出采样点的数量 N 不小于 6,此处将 N 设置为 6。



(a) E 平面辐射方向图
(a) E-plane radiation pattern



(b) 八元阵列振幅
(b) Eight-element array amplitude



(c) 八元阵列相位
(c) Eight-element array phase

图 3 赋形波束综合方法得到的扇形波束性能

Fig. 3 Performance of sector beams obtained by the synthesis method of shaped beams

由公式 (4) 和 (5) 计算得到八元阵列的振幅和相位分布,如图 3(b) 和 (c) 所示。扇形波束的 HPBW 为 55° 、SLL 均小于 -25 dB,符合预期设计。

2 脊形波导阵列天线的设计与仿真

本设计中的脊形波导阵列天线采用驻波阵的形式(其中一端短路),底壁呈对称脊状,脊形波导使其结构紧凑^[15-16]。辐射纵向缝隙位于上部宽壁上,控制天线阵列的振幅和相位分布。所有缝隙的两端都有倒角,以最大限度减少尖锐不连续的影响,并避免制造复杂性。

脊形波导结构如图 4 所示。脊形波导的宽和高分别为 a ($a=a_1+a_3+a_1$) 和 b_1 ,对称脊的宽和高分别为 a_3 和 a_2 。 $2l$, w 和 x 分别为缝隙的长、宽和相对于中心线的偏移量。缝隙间距为 d ,短端在最后一个缝隙中心之外为 $L_s=d/2$, $L_p=d/2$ 为输入端口与第一个槽中心之间的距离,其中 d 为波导波长 λ_g 的一半。

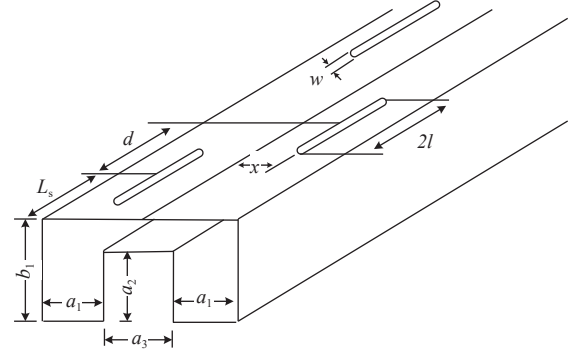
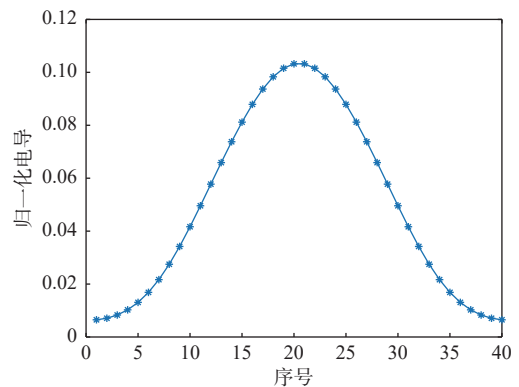


图 4 脊形波导结构示意图

Fig. 4 Schematic of ridge waveguide structure

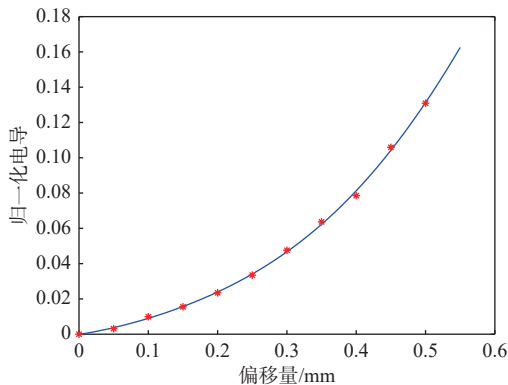
根据 SLL= -30 dB 的设定,40 个阵元的激励振幅 ($a_1, a_2, \dots, a_{40}$) 可以通过泰勒分布计算。归一化电导由式 (6) 推导可得,计算结果如图 5(a) 所示。

$$g_i = 2 \frac{a_i^2}{\sum_{i=1}^N a_i^2} \quad (6)$$



(a) 归一化电导分布图

(a) Plot of the normalized conductance distribution



(b) 归一化电导与偏移量之间的关系
(b) Normalized conductance versus offset

图 5 归一化电导的分布及其与偏移量的关系

Fig. 5 Distribution of normalized conductance and its relationship with the offset

缝隙的宽度 w 均为 1 mm, 通过改变缝隙的偏移量 x 来调整辐射电导, 并在 HFSS 中建立参数提取模型, 获得缝隙归一化电导 G/G_0 和缝隙的偏移量 x 之间的关系, 结果如图 5(b) 所示。通过优化缝隙的长度以最小化输入端口处的反射系数并加宽工作带宽。优化后的单根脊形波导缝隙阵的辐射方向图如图 6 所示, 辐射方向图副瓣电平为 28 dB, 辐射特性优异。

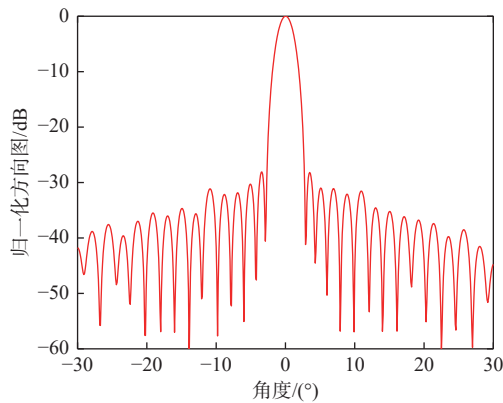


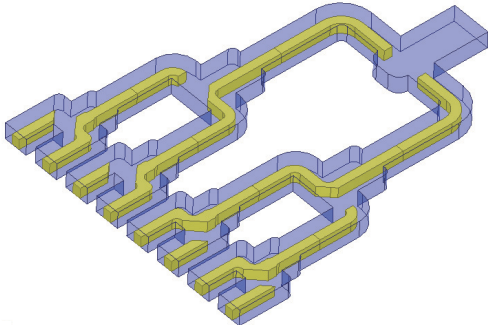
图 6 单根脊形波导缝隙天线的辐射方向图

Fig. 6 Radiation pattern for the proposed SRWAA

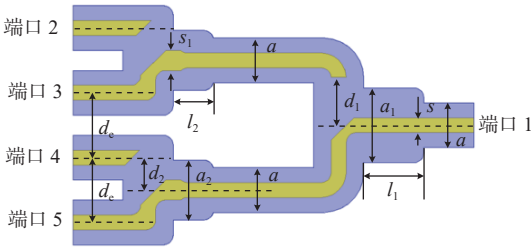
3 截止模式功率分配器的设计与仿真

根据第 1 节中的赋形波束理论分析, 可以得到期望功率比为 0.005 2:0.04:0.059 9:1, 其中八个单元之间的最大功率分配比为 192 倍。为实现期望的功率分配比, 本节提出一种截止模式功率分配器, 如图 7 所示, 详细参数见表 1。电磁波的传输在截止波

长以下的波导段中按照指数规律衰减^[17-18], 通过改变不同分路中脊形波导脊的尺寸可以自由灵活地控制功率分配比。该功分器设计相比于传统的设计, 可以实现大功率分配比, 结构更加紧凑。



(a) 三维视图
(a) 3D



(b) 俯视图
(b) Overhead view

图 7 四路脊形波导功分器仿真模型图

Fig. 7 Simulation model diagram of a four-way ridge waveguide power divider

表 1 四路脊形波导功分器优化后的参数值

Tab. 1 Parameter values of optimized four-way ridge waveguide power divider

参数	取值	参数	取值	参数	取值
a	4.5	l_1	6.00	a_2	6.00
s	1.5	d_1	4.83	d_2	3.25
a_1	7.5	s_1	2.00	d_e	6.50
b	3.0	l_2	4.00		

为满足赋形波束的相位要求, 通常通过改变电磁波行进路程获得需要的相位, 但会增加加工难度并占用空间。基于脊形波导的特性, 通过控制脊形波导脊的高度, 在较短的长度下获得所需的相位, 因此在功分器的输出端各接一个移相器, 来实现赋形波束所需的相位要求, 结果如图 8 所示, 馈电网络的最终尺寸见表 2。

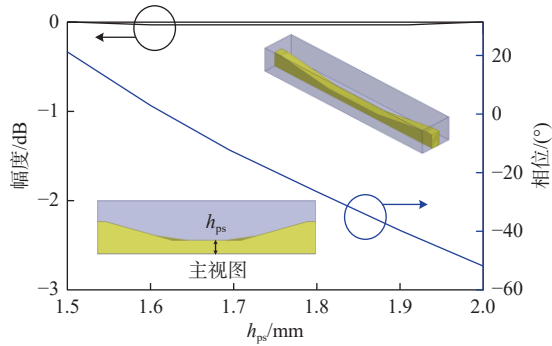


图8 脊高度变化引起的移相器传输幅度和相位变化

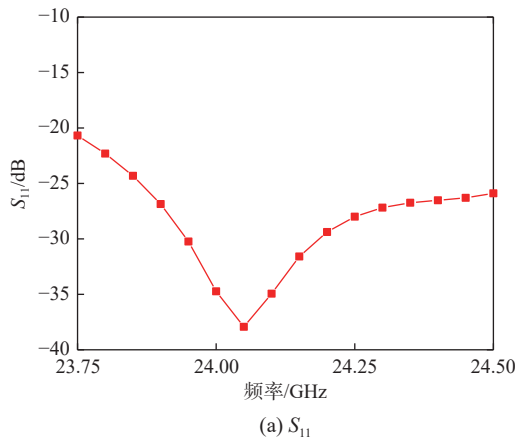
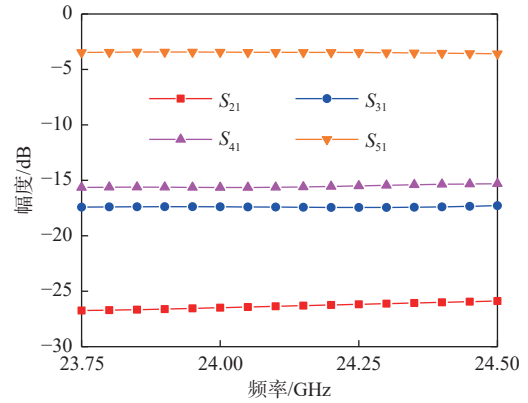
Fig. 8 Transmission amplitude and phase in terms of the height of phase shifter

表2 脊形波导缝隙阵列优化后参数

Tab. 2 Optimized parameters of ridge waveguide

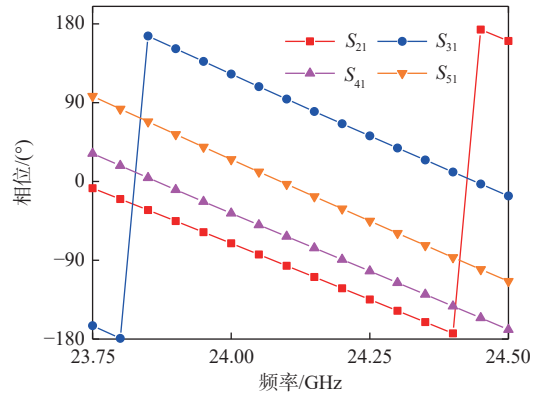
slot array			mm		
编号	x	$2l$	编号	x	$2l$
1	0.05	6.40	11	0.22	6.45
2	0.07	6.42	12	0.24	6.45
3	0.09	6.45	13	0.26	6.45
4	0.10	6.40	14	0.28	6.42
5	0.12	6.40	15	0.30	6.44
6	0.14	6.42	16	0.32	6.44
7	0.15	6.42	17	0.34	6.44
8	0.17	6.42	18	0.36	6.45
9	0.19	6.42	19	0.38	6.45
10	0.20	6.45	20	0.39	6.45

移相器馈电网络的仿真结果如图9所示。可以看出: 23.75~24.5 GHz 范围内, 反射系数优于-20 dB, 传输幅度满足预期要求的功率比(0.005 2:0.04:0.059 9:1)。截止模式功率分配器在设计分配比时牺牲了相位, 四个输出端口的相位存在一定相差(如图9(c)所示), 但脊形波导波长与脊的高度相关, 很容易实现获得预期相位分布。由以上设计及仿真结果可知, 所设计的馈电网络设计简便、功分比易调节、结构紧凑、性能良好。

(a) S_{11} 

(b) 传输系数幅度

(b) Transmission amplitude



(c) 传输系数相位

(c) Transmission phase

图9 移相器馈电网络仿真结果

Fig. 9 Simulation results of phase shifter feeding network

4 天线整体仿真结果

两个相同参数的脊形波导缝隙阵列, 其中缝隙若是镜像放置的, 在同一相位中被激励时, 可以产生相反的相位。利用这一特性, 八个波导缝隙阵列被专门布置, 由此确定了所提出的赋形波束波导缝隙阵列, 如图10所示。天线整体由八个脊形波导缝隙阵列组成, 通过八路馈电网络连接。注意, 馈电网络的脊形波导和天线阵列的宽度保持相同。为了改善阵列天线的口径效率, 把八路馈电网络和移相器这两个部分放置到脊形波导缝隙天线的背面, 增加了天线的剖面, 但提升了天线口径效率。

图11显示了所提出天线计算仿真的反射系数, 可以看出, 24~24.25 GHz 范围内反射系数小于-15 dB。

图12给出了低频(24 GHz)、中频(24.125 GHz)和高频(24.25 GHz)下仰角平面(E面)和方位角平面(H面)仿真辐射方向图。可以看出: 三个频率下E面的HPBW分别为55.4°、54.5°和54.2°, H面的HPBW分别为2.47°、2.5°和2.65°; H面的SLL分别为-27.1、-27.8和-25.3 dB, E面的SLL分别为-22.9、-20.9和-20.7 dB。

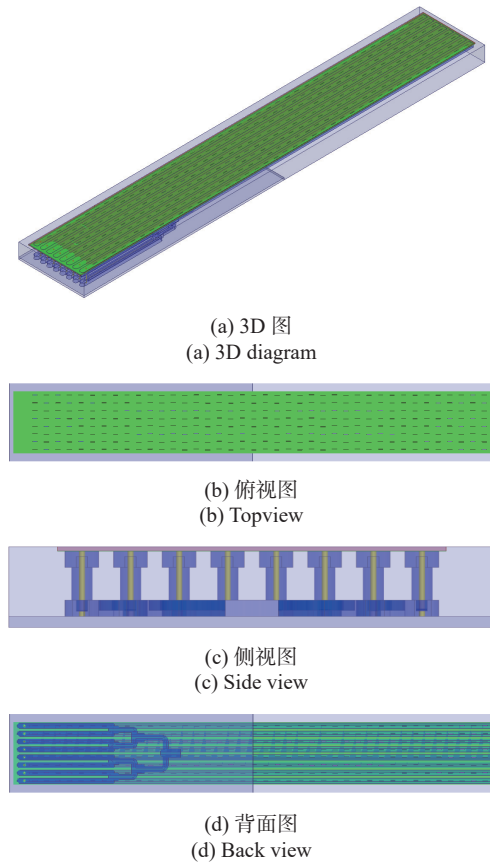


图 10 脊形波导缝隙天线整体模型图

Fig. 10 Configuration of the proposed SRWAA

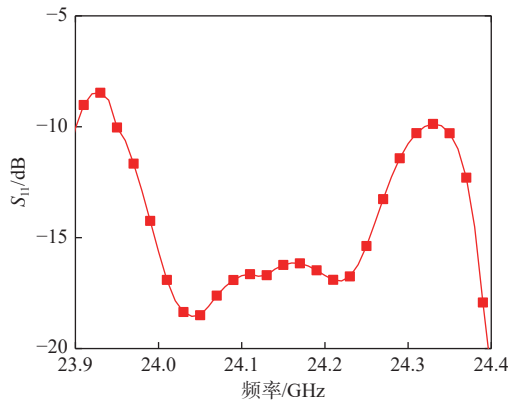


Fig. 11 Simulated reflection coefficient for the proposed SRWAA

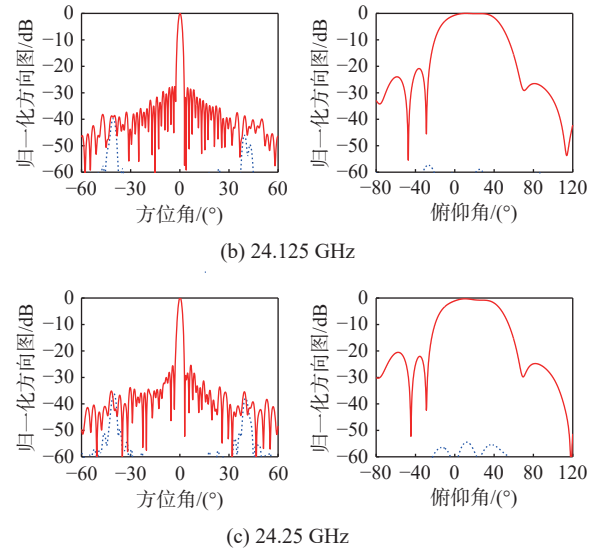
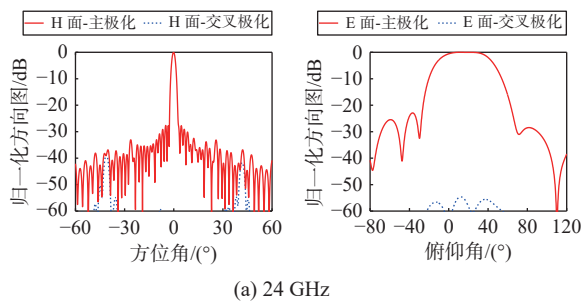
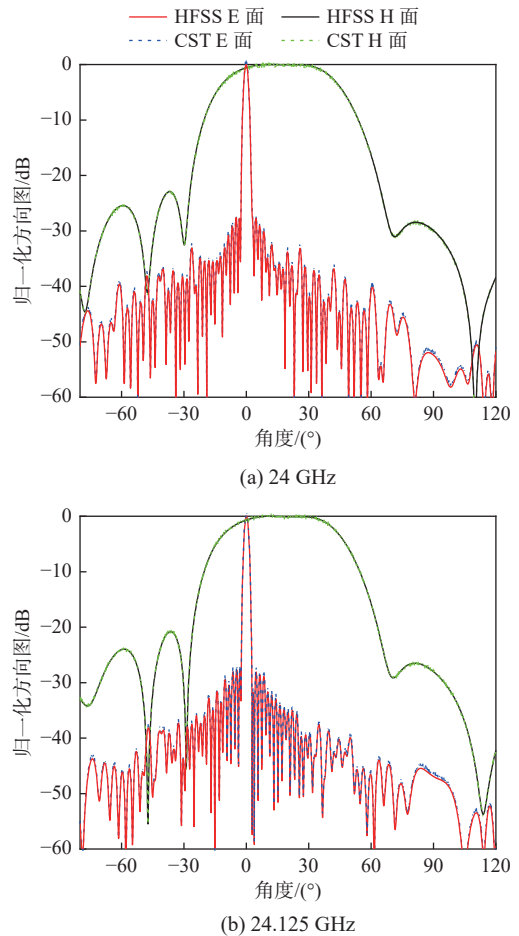


图 12 不同频点下 E 和 H 面仿真辐射方向图

Fig. 12 Simulated radiation direction maps of E and H planes at different frequency points

使用三维电磁仿真软件 HFSS 和 CST Studio Suite ®2019 分别对天线模型进行仿真计算, 结果如图 13 所示。由图可知, 仿真计算结果一致, 从而数值验证了所提出低旁瓣宽扇形波束天线设计方案的可靠性。



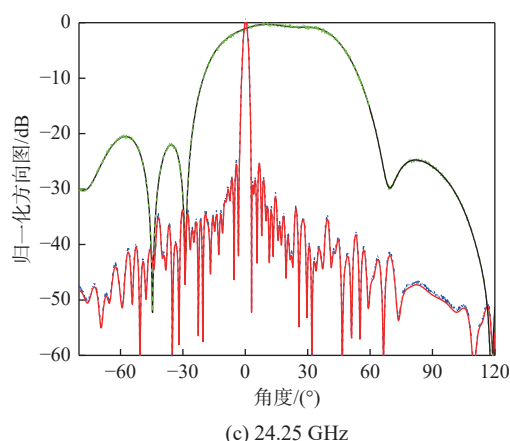


图13 不同软件仿真得到的不同频点下E和H面归一化方向图

Fig. 13 Normalized radiation pattern of E and H planes obtained from different software simulations at different frequencies

5 结论

本文基于文献[9]提出的波束合成方法,获得仰角平面中宽扇形波束的振幅和相位分布,并利用泰勒分布来设计方位平面辐射方向图,实现了具有高增益和低旁瓣的宽扇形波束。对包括八路截止模式功率分配器和移相器的馈电网络进行了理论分析与详细设计,实现了所需的功率比和相位分布。所采用的波束形成方法以及截止模式功率分配器设计思路,对实现期望的低副瓣宽扇形波束是非常有利的。所设计的高增益低旁瓣宽扇形波束天线是空中探测等应用的理想选择。

参考文献

- [1] 孙禾, 吴斌, 吴宏伟. 基于电子波束成形的跟踪技术研究[J]. 微计算机信息, 2008(1): 29-31.
SUN H, WU B, WU H W. Research on tracking technology base on electronic beam forming[J]. Microcomputer information, 2008(1): 29-31. (in Chinese)
- [2] ABHISHEK S J, JENA P, VEENA D S. Tracking targets using digital beamforming[C]// Proc. 11th Int. Conf. Comput., Commun. Netw. Technol. (ICCCNT), Jul. 2020: 1-5.
- [3] HAKIMI A M, KEIVAAN A, ORAZI H, et al. Wide-scanning circularly polarized reflector-based modulated metasurface antenna enabled by a broadband polarizer[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2021, 70(1): 84-96.
- [4] YU C A, LI E S, JIN H, et al. 24 GHz horizontally polarized automotive antenna arrays with wide fan beam and high gain[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2018, 67(2): 892-904.
- [5] QIN Y W, YOU Z G, ZHOU Y E, et al. Design and implementation of weather signal processing at low altitude surveillance radar[J]. Radio engineering, 2014, 10: 71-78.
- [6] EOM S Y, SON S H, JUNG Y B, et al. Design and test of a mobile antenna system with tri-band operation for broadband satellite communications and DBS reception[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2007, 55(11): 3123-3133.
- [7] NAGHSHVARIANJAHROMI M, GHORABNI A. Easy installation CPW-fed technique for fan-beam array antenna using grounded reflector for wireless applications[J]. Journal of electromagnetic waves and applications, 2014, 28(16): 1953-1965.
- [8] 郝宏刚, 李江, 张婷, 等. Ka波段被动成像天线系统设计与研究[J]. 电波科学学报, 2020, 35(5): 738-744.
HAO H G, LI J, ZHANG T, et al. Design and research of Ka band passive imaging antenna system[J]. Chinese journal of radio science, 2020, 35(5): 738-744. (in Chinese)
- [9] LI J Y, QI Y X, ZHOU S G. Shaped beam synthesis based on superposition principle and Taylor method[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2017, 65(11): 6157-6160.
- [10] KIM D Y, ELLIOTT R S. A design procedure for slot arrays fed by single-ridge waveguide[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 1988, 36(11): 1531-1536.
- [11] KUMAR P, KEDAR A, SINGH A K. Design and development of low-cost low sidelobe level slotted waveguide antenna array in X-band[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2015, 63(11): 4723-4731.
- [12] FANG X, WANG W N, HUANG G L, et al. A wideband low-profile all-metal cavity slot antenna with filtering performance for space-borne SAR applications[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2019, 18(6): 1278-1282.
- [13] 魏文元. 天线原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 61-91.
- [14] YANG X Q, JIAN Y L. Superposition synthesis method for 2-D shaped-beam array antenna[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2018, 66(12): 6950-6957.
- [15] JOSEFSSON L, RENGARAJAN S R. Slotted waveguide array antennas: theory, analysis and design[M]. SciTech Publishing Inc., 2016: 93-130.
- [16] LU X, GU S, WANG X C, et al. Beam-scanning continuous transverse stub antenna fed by a ridged waveguide slot array[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2017, 16: 1675-1678.
- [17] 杜勇. 消失模波导滤波器及正交模耦合器的设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
DU Y. Design of Evanescent mode waveguide filter and ortho-mode transducer [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2011. (in Chinese)

- [18] DANIEL S E, JESÚS R G, MARIANO B E, et al. Evanescent-mode ridge-waveguide radiating filters for space applications[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2019, 67(10): 6286-6297.

作者简介



姚华飞 (1983—), 男, 贵州人, 中国电子科技集团公司第二十七研究所高级工程师, 硕士, 主要研究方向为综合电子信息系统测评、天线设计技术和雷达相控阵天线设计技术。E-mail: liyang830427@sina.com



邱琳琳 (1992—), 女, 河南人, 中国电子科技集团公司第二十七研究所工程师, 硕士, 主要研究方向为特种飞机任务电子系统的试验测试与评估、机电一体化设计。E-mail: qiull1992@163.com



王安康 (1992—), 男, 河南人, 中国电子科技集团公司第二十七研究所工程师, 博士, 主要研究方向为天线辐射、散射测量技术、波导缝隙天线设计技术、反射面天线设计技术、雷达相控阵天线设计技术、测向天线系统设计技术、抗干扰天线系统设计技术和卫星通信天线设计技术。E-mail: kang1992boy@163.com



马亚东 (1988—), 男, 河南人, 中国电子科技集团公司第二十七研究所工程师, 硕士, 主要研究方向为任务电子系统试验测评。E-mail: 3486723991@qq.com