

圆环共形重叠阵发射多波束形成算法研究

赵柯 刘丽哲 梅立荣

(中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

摘要: 针对非重叠固定扇区波束形成指向模糊,主瓣增益低以及旁瓣较高等问题,设计了一种应用于圆环共形的重叠阵算法。该算法将圆阵划分为多个 120° 互相重叠的扇区,扇区数量和重叠区域可调整,同时采用有向阵元和 Taylor 加权,使得期望方向发射波束位于所划分扇区中心区域,获得最大增益。结果显示,与固定扇区非重叠圆阵相比,重叠圆阵发射单波束旁瓣抑制由 -10.16 dB 下降至 -21.2 dB;发射两波束旁瓣抑制由 -18.92 dB 下降至 -24.18 dB,主瓣增益由 10.76 dB 上升至 15.32 dB;发射八波束时各波束主瓣指向精准无偏移且副瓣较低。结果表明,相对于传统固定阵波束形成算法,重叠阵算法在主瓣指向、主瓣增益及副瓣抑制等方面表现更加优良。

关键词: 圆环共形;重叠阵;Taylor 加权;多波束

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015;510.1015

Research on multibeamforming algorithm of ring conformal overlapping array emission

Zhao Ke Liu Lizhe Mei Lirong

(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Aiming at the problems of fuzzy beamforming direction, low main lobe gain and high side lobe in non-overlapping fixed sector, an overlapping array algorithm for circular conformal was designed. In this algorithm, the circular array is divided into several 120° overlapping sectors, and the number of sectors and overlapping areas can be adjusted. At the same time, directed array and Taylor weighting are adopted to make the beam emitted in the desired direction located in the center of the divided sectors, so as to obtain the maximum gain. The results show that, compared with the non-overlapping circular arrays with fixed sector, the side-lobe suppression of the single-beam emitted by the overlapping circular arrays decreases from -10.16 dB to -21.2 dB. The sidelobe suppression decreased from -18.92 dB to -24.18 dB, and the main lobe gain increased from 10.76 dB to 15.32 dB. When transmitting eight beams, the main lobe of each beam points accurately without deviation and the side lobe is low. The results show that, compared with the traditional fixed array beamforming algorithm, the overlapping array algorithm performs better in main lobe pointing, main lobe gain and side lobe suppression.

Keywords: ring conformal; overlapping array; Taylor weighting; the multi-beam

0 引言

相较于传统机械扫描天线精度低、时延大的不足,相控阵天线通过改变各辐射单元的幅度、相位来控制天线波束指向在空中的转动,具有扫描速度快、目标数据率高、多目标跟踪能力强等优点^[1]。

相控阵天线按照阵列流型可以分为线阵、平面阵和共形阵等。共形天线阵列是指天线阵列的外形与给定的外形相匹配,其中给定的外形可以是飞机、汽车、舰船等。将天线阵列单元与载体表面共形的目的就是为改善飞行器的

空气动力学性能和达到隐身的效果,以及覆盖天线观测范围^[2]。

目前使用较多的共形相控阵天线为圆柱形共形相控阵和圆锥形共形相控阵两种,多应用于车载、机载和舰载等平台。相比于平面相控阵天线,共形相控阵天线的技术优势主要体现在如下几个方面。1) 可实现大角度范围波束扫描;2) 更优的结构稳定性使载体的机动过载性能进一步提高;3) 不破坏载体空气动力学性能;4) 有利于减小雷达散射截面(RCS);5) 有利于减少不同系统间的信号串扰,电磁兼容和抗干扰性进一步提高^[3-5]。因此,共形相控阵天线

的研究已经成为未来天线发展的方向,也是目前相控阵天线领域研究的热点之一^[6]。

在移动环境中多个节点之间相互通信时,需要阵列天线具有 360°的全向扫描特性,则圆环阵是可以优先考虑的共形阵列。圆环阵是一种重要的面阵,在阵面的法线方向上,既能形成全向波束覆盖全空间,也能形成定向波束并在全空间范围内进行波束扫描。然而传统圆环阵在发射多波束时存在旁瓣增益高、主瓣增益低且展宽的不足,在此情形下无法满足通信需求^[7-8]。

为了使每个波束都具备最优的天线性能,多波束形成时需要考虑阵列区域的阵元重叠对天线性能的影响,因此对整个阵列进行子阵划分,开展重叠子阵的波束形成算法研究具有重要的意义。

在子阵结构的划分中,子阵内的单元数量过少对于加权操作不利,而单元数过多又会增加子阵间距,引起阵元级方向图内出现过密的栅瓣^[9-10]。因此可以通过相邻子阵共享一部分天线单元,构成子阵重叠结构,在提供一定子阵单元数量的同时,减小子阵的间距^[11-13]。同时,通过在圆环阵列中设置不同数量的重叠单元建立不同结构的重叠阵列,可以使得需要的波束指向始终位于子阵的中心位置,从而获得较好的主瓣增益和旁瓣抑制^[14-16]。

1 圆环阵模型建立

设圆周半径为 R ,天线阵元沿圆周均匀分布,相邻阵元之间夹角为 $\Delta\varphi$,假设阵元的激励幅度相等、相位一致,天线单元在各自局部坐标系下方向图相等,忽略天线互耦影响,阵列模型如图 1 所示,则圆环阵方向图可表示为:

$$\vec{E}(\phi_m) = \sum_n V_n EL(\phi_m - n\Delta\varphi) e^{jkR[\cos(\phi_m - n\Delta\varphi) - \cos(\phi_0 - n\Delta\varphi)]} \quad (1)$$

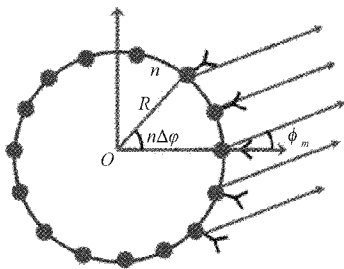


图1 圆环阵列模型

$EL(\phi_m - n\Delta\varphi)$ 是第 n 个阵元的单元因子,式中的相位参考点是圆心,相同阵列单元沿圆周间隔 $R\Delta\varphi$ 排列,每个单元均指向辐射方向,因此单位函数不一致。类比线性阵列给每个单元施加一个相移,使波束能够集中于 ϕ_0 方向,通过选择合理的相移 a_n ,可以获得对任意单元 n 都合适的相位激励(波束同相激励),此时相移表示为:

$$a_n = -kR\cos(\phi_0 - n\Delta\varphi) \quad (2)$$

综合式(2),第 n 个阵元馈入相应的相移 a_n 即可表征相控的圆环阵列,并且可以看出,圆环阵列天线方向图主要

跟圆环半径和单元间距 $R\Delta\varphi$ 相关。通过改变单元激励相位,即可实现圆环阵列固定朝向,其聚束圆环阵列辐射方向图如下:

$$\vec{E}(\phi_m) = \sum_n V_n EL(\phi_m - n\Delta\varphi) e^{jkR[\cos(\phi_m - n\Delta\varphi) - \cos(\phi_0 - n\Delta\varphi)]} \quad (3)$$

2 圆环阵子阵划分

2.1 非重叠圆环阵子阵划分

对于非重叠结构的圆环共形阵列,一般子阵划分的最大范围不超过 120°,此处以 120°为例,将圆环阵列划分为 3 个固定扇区,每个扇区包含 12 个子阵,共 36 个子阵阵元,如图 2 所示。

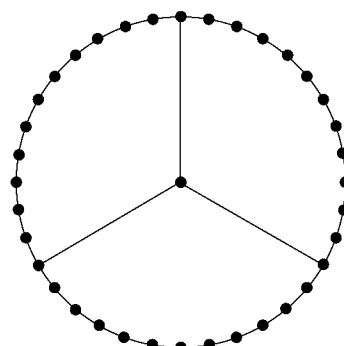


图2 非重叠圆环阵模型

类比均匀线阵的旁瓣电平在 -13.5 dB 左右,圆环阵列的旁瓣电平在 -8 dB 左右。如图 3 所示,在单个扇区 120°范围内发射单波束,圆环阵列的旁瓣电平在 -10 dB 左右,在算法中引入有向阵元 $(1 + \cos(\phi - \phi_n))/2$ 可以有效地降低旁瓣电平至 -12 dB 左右,同时可以使得非工作区域的电平有效降低至 -20 dB 以下。

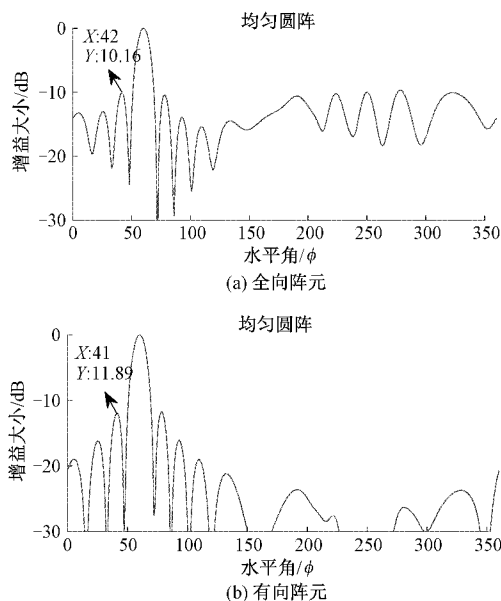


图3 圆环阵单波束形成

对有向阵元进行 Taylor 加权,权值为 $[0.27, 0.37, 0.57, 0.90, 0.98, 0.98, 0.90, 0.75, 0.57, 0.37, 0.27]$,可以进一步降低旁瓣。旁瓣降低的同时会使得主瓣展宽,根据实际需求平衡主瓣和旁瓣的关系。如图4所示,此处进行 Taylor 加权可以有效的将旁瓣抑制在 -20 dB 以下,非工作区域的电平有效降低至 -30 dB 以下。

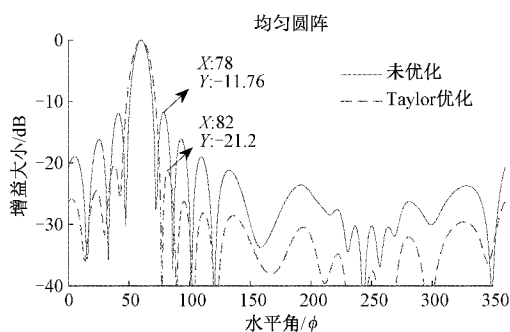


图4 圆环阵 Taylor 优化

2.2 重叠圆环阵子阵划分

非重叠结构的圆环阵列子阵扇区固定,发射单波束时,如果期望波束指向位于每个扇区的中心,则波束指标性能良好;如果期望波束指向偏向扇区边缘,则波束指标性能随偏向程度增加越来越差。

当圆环阵列发射多波束时,无法确保每个波束期望指向都位于扇区中心。针对圆环共形阵列的同时多波束形成,采用重叠阵列,使得任意方向的期望波束指向都可以位于所划分某一扇区的中心,从而形成良好性能的波束指向。本研究设计的重叠圆环阵列共采用36个子阵阵元,每12个子阵构成一个扇区,相邻两个扇区之间有11个子阵重叠,共有36个相互重叠的扇区,如图5所示。

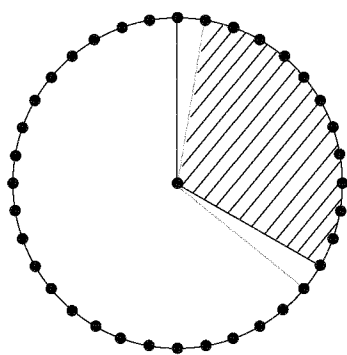


图5 重叠圆环阵模型

重叠圆环阵发射多波束时,根据发射波束数量与发射波束最佳指向位置确定各重叠子阵的权值,从而使得各波束均获得最大增益。以有向阵元与 Taylor 加权为基础,在优化权值之上进行能量的分配。

假设第 X 个重叠子阵的重叠数为 N ,在第 N_1 个重叠阵中所在位置为 x_1 ,在第 N_2 个重叠阵中所在位置为 x_2, \dots ,在第 N_n 个重叠阵中所在位置为 x_n ,12阵元6阶 Taylor 权值

为 $[T_1, T_2, T_3, \dots, T_{12}]$ 。

则第 X 个重叠子阵在第 N 个重叠阵中的权值为:

$$A_n = \frac{T_{x_n}}{T_{x_1} + T_{x_2} + T_{x_3} + \dots + T_{x_n}}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

若重叠子阵所处位置为扇区边缘,当 $A_n > T_{x_n}$ 时,取 $A_n = T_{x_n}$ 。

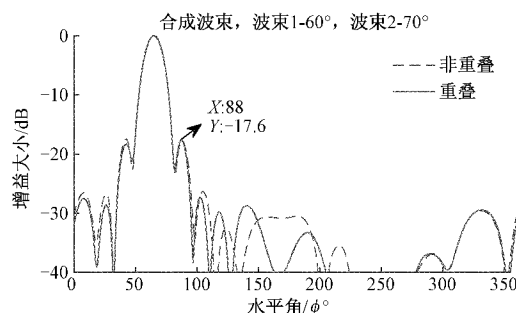
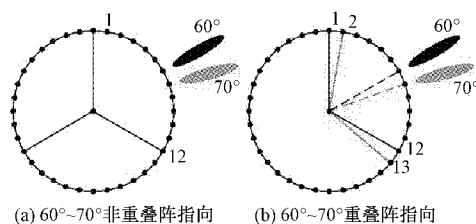
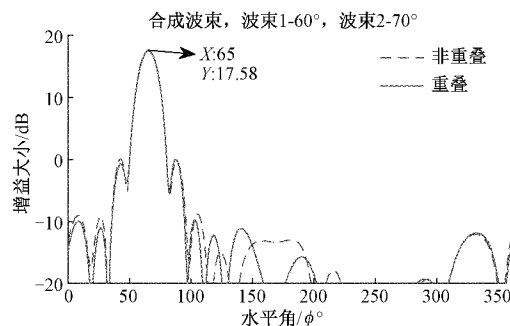
上述算法可保证重叠圆环阵在发射多波束时各波束均获得所在扇区最大能量汇聚,且各波束之间互不干扰、主瓣指向精准、旁瓣抑制好。

3 算法验证

3.1 圆环阵发射两波束

1)波束1指向 60° ,波束2指向 70°

非重叠阵波束1、2由1~12子阵合成,重叠阵波束1由1~12子阵合成、波束2由2~13子阵合成,如图6(a)、(b)所示,仿真结果如图6(c)、(d)所示。

(c) $60^\circ \sim 70^\circ$ 合成波束归一化增益(d) $60^\circ \sim 70^\circ$ 合成波束增益大小图6 波束1- 60° ,波束2- 70°

由于波束1与波束2期望指向相近,图6(a)、(b)可以看出,对于非重叠和重叠结构而言,此时两个波束均位于所

划分扇区中心位置,因此重叠与非重叠阵合成波束大致相当。图6(c)、(d)可以看出,两种结构的增益大小均在17.58 dB,而旁瓣抑制均在-17.6 dB左右,总体指标情况相当。

2) 波束1指向 60° ,波束2指向 110°

非重叠阵波束1、2由1~12子阵合成,重叠阵波束1由1~12子阵合成、波束2由5~16子阵合成,如图7(a)、(b)所示,仿真结果如图7(c)、(d)所示。

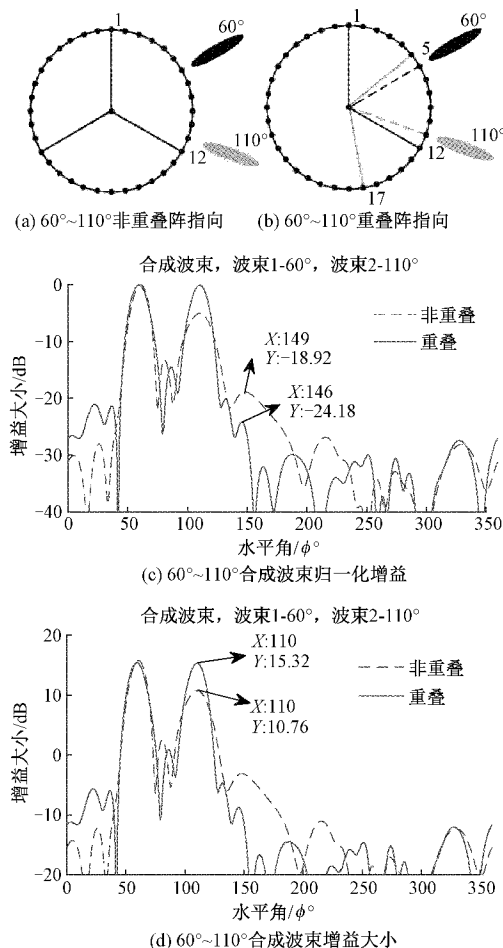


图7 波束1- 60° ,波束2- 110°

由图7(a)可以看出,对于非重叠阵列而言,此时波束1位于扇区1中心,而波束2位于扇区1的右侧边缘,由图7(c)、(d)可以看出,非重叠阵波束2增益为10.76 dB,相对于波束1的15.32 dB下降了4.56 dB,同时由于波束2靠近扇区边缘,其旁瓣为-18.92 dB。由图7(b)可以看出,对于重叠阵列而言,波束1、2均位于所划分扇区中心,波束2的旁瓣抑制相对于非重叠阵的-18.92 dB下降到了-24.18 dB,同时波束1、2的增益大小均在15.32 dB。

3) 波束1指向 60° ,波束2指向 150°

非重叠阵同一扇区,波束1、2由1~12子阵合成;非重叠阵不同扇区,波束1由1~12子阵合成、波束2由4~15子阵合成。重叠阵波束1由波束1由1~12子阵合成,波

束2由10~21子阵合成,如图8(a)、(b)所示,仿真结果如图8(c)、(d)所示。

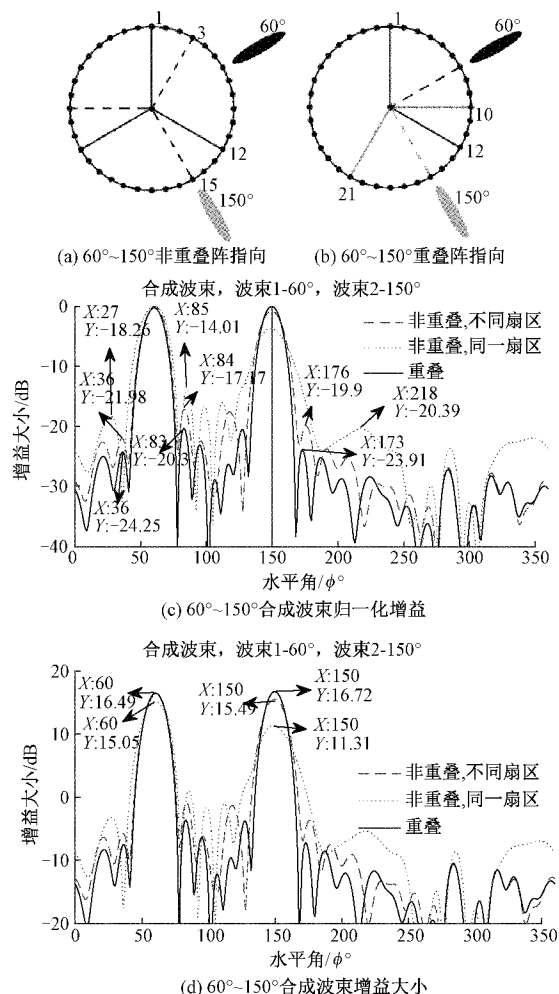


图8 波束1- 60° ,波束2- 150°

对于非重叠阵列而言,此时有两种情况,分两个波束是否位于同一扇区内。图8(a)中虚线划分扇区所示,当波束1和波束2位于同一扇区时,两波束间距较大,且都偏离扇区1中心区域。由图8(c)、(d)可以看出,波束1旁瓣为-18.26 dB,增益大小为15.05 dB,波束2旁瓣为-20.39 dB,增益大小为11.31 dB,此时两波束主瓣展宽明显;图8(a)中实线划分扇区所示,当波束1和波束2位于不同扇区时,此时波束1位于扇区1中心,波束2位于扇区2且偏离中心 30° ,由图8(c)、(d)可以看出,波束1旁瓣为-21.98 dB,增益大小为16.49 dB,波束2旁瓣为-19.9 dB,增益大小为15.49 dB;图8(b)所示,波束1和波束2均位于划分重叠阵中心,由图8(c)、(d)可以看出,波束1旁瓣为-24.25 dB,增益大小为16.49 dB,波束2旁瓣为-23.91 dB,增益大小为16.72 dB。同时可以从图8(c)中看出,非重叠阵同一扇区,栅瓣大小为-14.01 dB,非重叠阵不同扇区,栅瓣大小为-17.17 dB,重叠阵栅瓣大小为-20.3 dB。

由上述的仿真结果可知在圆环共形阵列中,发射两个波束,采用重叠阵列划分后,天线性能总是优于非重叠阵列,当发射两个以上的更多波束时,重叠阵列的灵活性和表现较之非重叠阵列更加优良。同时,在一个扇区内,重叠子阵的数量在一定范围内越多,对于不同方向的波束期望指向表现越灵活,但是相应的也会造成旁瓣的抬升。

为研究重叠子阵的数量对波束形成性能的影响,本研究以圆环阵列发射两波束为例,将波束 1 的角度固定在 60° 方向,移动波束 2 的最佳指向角度,研究在不同重叠子阵数量下波束 1 的性能变化,仿真结果如图 9 所示。

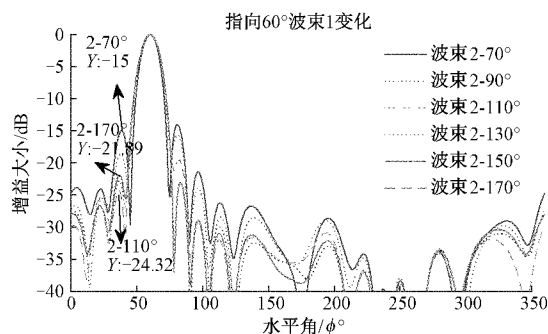


图 9 不同数量子阵重叠时波束 1 变化

由图 9 可以看出,当波束 2 指向 170° 时,即两波束所在扇区重叠子阵数量为 1,此时波束 1 旁瓣为 -21.89 dB。当波束 2 指向 70° 时,即两波束所在扇区重叠子阵数量为 11,此时波束 1 旁瓣为 -15 dB。当波束 2 指向 110° 时,即两波束所在扇区重叠子阵数量为 7,此时波束 1 旁瓣为 -24.32 dB,性能最优。同时,重叠子阵数量为 1 时相对于重叠子阵数量为 11 时主瓣宽度增加了 2° 左右。

3.2 圆环阵发射八波束

在实际的工程应用中,圆环阵列 360° 周向可能需要同时发射多个波束。如图 10 所示,圆环共形重叠阵列同时发射 8 个不同指向的波束情况(波束 1 指向 60° 、波束 2 指向 100° 、波束 3 指向 140° 、波束 4 指向 180° 、波束 5 指向 220° 、波束 6 指向 260° 、波束 7 指向 300° 、波束 8 指向 340°)。

波束 1 所在扇区为子阵 1~12,其中子阵 1~8 两扇区重叠,子阵 9~12 三扇区重叠;波束 2 所在扇区为子阵 5~16,其中子阵 5~8 两扇区重叠,子阵 9~16 三扇区重叠;波束 3 所在扇区为子阵 9~20,其中子阵 9~20 三扇区重叠;波束 4 所在扇区为子阵 13~24,其中子阵 13~24 三扇区重叠;波束 5 所在扇区为子阵 17~28,其中子阵 17~28 三扇区重叠;波束 6 所在扇区为子阵 21~32,其中子阵 21~32 三扇区重叠;波束 7 所在扇区为子阵 25~36,其中子阵 25~36 三扇区重叠;波束 8 所在扇区为子阵 29~36~4,其中子阵 29~32 三扇区重叠,子阵 33~36~4 两扇区重叠。

在对不同数量子阵以及不同数量扇区叠加的重叠阵进行 Taylor 优化时,其各个扇区对应子阵的优化权值应该考

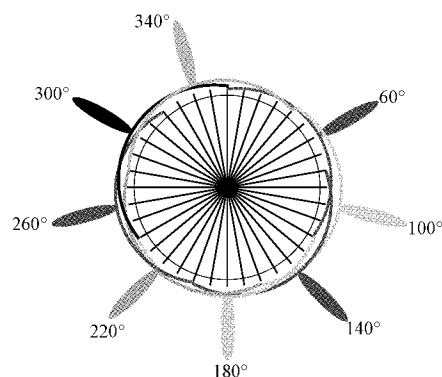


图 10 发射 8 波束重叠阵模型

虑相互之间的叠加影响。如图 10 所示同时发射 8 波束,波束 1 优化权值 $[0.183, 0.313, 0.513, 0.719, 0.829, 0.759, 0.657, 0.533, 0.401, 0.283, 0.172, 0.102]$ 、波束 2 优化权值 $[0.170, 0.240, 0.342, 0.446, 0.496, 0.544, 0.544, 0.496, 0.401, 0.283, 0.172, 0.102]$ 、波束 3 优化权值 $[0.102, 0.172, 0.283, 0.401, 0.496, 0.544, 0.544, 0.496, 0.401, 0.283, 0.172, 0.102]$ 、波束 4 优化权值 $[0.102, 0.172, 0.283, 0.401, 0.496, 0.544, 0.544, 0.496, 0.401, 0.283, 0.172, 0.102]$ 、波束 5 优化权值 $[0.102, 0.172, 0.283, 0.401, 0.496, 0.544, 0.544, 0.496, 0.401, 0.283, 0.172, 0.102]$ 、波束 6 优化权值 $[0.102, 0.172, 0.283, 0.401, 0.496, 0.544, 0.544, 0.496, 0.401, 0.283, 0.172, 0.102]$ 、波束 7 优化权值 $[0.102, 0.172, 0.283, 0.401, 0.496, 0.544, 0.544, 0.553, 0.446, 0.342, 0.240, 0.170]$ 、波束 8 优化权值 $[0.102, 0.172, 0.283, 0.446, 0.553, 0.657, 0.759, 0.829, 0.183, 0.313, 0.378, 0.202]$ 。

仿真结果如图 11 所示,其中指向 60° 的波束 1 与指向 340° 的波束 8 相邻且波束间距较大,增益为分别为 14.92 、 13.7 dB,其余 6 个波束的增益大小均在 12 dB 左右。8 个波束指向精准,且旁瓣和栅瓣增益大小均在 0 dB 以下。

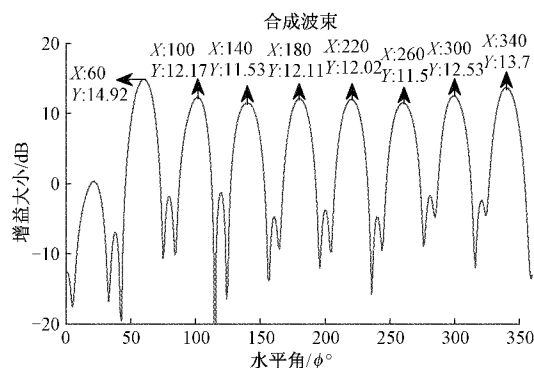


图 11 圆环重叠阵列同时发射 8 个波束

由圆环重叠阵多波束形成的仿真结果可以得出,当发射波束在两个及两个以上时,由于非重叠阵的扇区固定,多波束形成时主瓣增益低,旁瓣、栅瓣抑制较弱。重叠圆环阵

可以根据主瓣最佳指向确定相应的发射扇区,从而使得主瓣在所划分扇区内获得增益值最大,由上述仿真结果可以看出,在发射多波束时,相对于非重叠阵,重叠阵主瓣收窄,增益较大,旁瓣、栅瓣抑制效果明显。

4 结 论

本文提出一种基于圆环共形阵列的重叠发射同时多波束形成算法,针对扇区固定划分的圆环共形阵发射多波束时主瓣展宽,旁瓣抑制弱等缺点,提出基于重叠阵的同时多波束形成,通过仿真验证,可知在发射多波束时,重叠阵主瓣收窄,旁瓣抑制较好。

在圆环重叠阵中,所划分扇区包含重叠子阵的数量决定旁瓣抑制和主瓣展宽的程度,因此需要根据实际多波束形成的具体需求决定相应的权值大小和重叠子阵数量。

参考文献

- [1] 张艳君,梁晓嘉,赵波,等.圆柱共形全向圆极化天线的设计与实现[J].制造业自动化,2018,40(5):95-98.
- [2] ZOU L, LASENBY J, HE Z. Beamforming with distortionless co-polarisation for conformal arrays based on geometric algebra[J]. Iet Radar Sonar & Navigation, 2011, 5(8):842-853.
- [3] 刘元柱,肖绍球,唐明春,等.共形天线分析综合方法研究进展[J].航空兵器,2011(5):13-18.
- [4] 卢俊男,肖本贤.基于信道状态信息的后向散射信号检测[J].电子测量与仪器学报,2019,33(5):100-106.
- [5] RAHIMIAN A, ALFADHL Y, ALOMAINI A. Analytical and numerical evaluations of flexible V-band rotman lens beamforming network performance for conformal wireless subsystems [J]. Progress In Electromagnetics Research B, 2016, 71(1):77-89.
- [6] 杜欣,孙运强,杨瑞.圆形相控阵波束形成及干扰抑制[J].国外电子测量技术,2020,39(11):60-64.
- [7] RASEKH M, SEYDNEJAD S R. Design of an adaptive wideband beamforming algorithm for conformal arrays[J]. Communications Letters IEEE, 2014, 18(11):1955-1958.
- [8] 陈建锋,吴海.基于子阵重叠结构的子阵划分技术研究[J].舰船电子对抗,2016,39(1):95-98.
- [9] KARAMI P, ATARODI S M. Beamforming, null-steering, and simultaneous spatial and frequency domain filtering in integrated phased array systems [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2019, 110(12):152868.
- [10] TENNANT A. Numerical pattern synthesis of difference beams in conformal arrays[J]. Electronics Letters, 1995, 31(12):938-939.
- [11] 曹书华,江凌艳,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):39-44.
- [12] MOZAFFARZADEH M, MAHLOOJIFAR A M, OROOJI M, et al. Linear-array photoacoustic imaging using minimum variance-based delay multiply and sum adaptive beamforming algorithm [J]. Journal of Biomedical Optics, 2018, 23(2):1.
- [13] LU Y, XIONG K, LIU J, et al. Optimal coordinated beamforming with artificial noise for secure SWIPT in multi-cell networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018, 2018(1):60.
- [14] 苏江涛,郭庭铭,杨保国,等.基于回波替代的毫米波矢量网络测试校准方法[J].仪器仪表学报,2019,40(1):77-84.
- [15] ZURAKHOV G, TONG L, RAMALLI A, et al. Multiline transmit beamforming combined with adaptive apodization [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2018, 65(4):1-1.
- [16] SOW S M, CHIO T H. A small aperture direction finding system with beamforming and null steering capability[J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2019, 90:183-193.

作者简介

赵柯,在读研究生,主要研究方向为阵列信号处理、数字波束形成等。

E-mail:879785757@qq.com