

文章编号: 2095-4980(2014)04-0559-05

极化情况下高功率微波稀布阵计算模型

侯德亭¹, 邓朝平², 张 岩¹

(1.信息工程大学 理学院, 河南 郑州 450001; 2.中国人民解放军 95806 部队, 北京 100076)

摘 要: 建立了考虑极化情况下高功率微波稀布阵合成场的计算模型, 分析了阵列合成场大小与极化及阵元初相位关系。极化方向相同时, 二元线阵场分布为明暗相间的条纹, 三元面阵场分布为网状结构。阵元极化方向及阵元初相位共同影响合成场的叠加效果, 阵元的极化决定阵列合成场的最大值, 阵元初相位在此基础上对阵列叠加效果进一步调节。对于二元线阵, 极化方向夹角越小, 合成叠加效率越高; 对三元以上的多元面阵, 其极化方向组合方式复杂, 可通过阵元位置和目标位置模拟阵列合成场的叠加效率, 三元稀布面阵的合成场强归一化最大值在 2.22~2.43 之间, 与理想合成场最大值 3 有一定的差距。该模型提高了稀布阵列合成场强的计算准确度, 对阵列高功率微波进行天线阵列设计, 进一步提升目标区域的功率密度是一种比较有效的方法。

关键词: 高功率微波; 极化方向; 稀布阵; 合成场

中图分类号: TN821⁺.1

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201404.0559

Spatial powers combining of close-packed antenna array of high power microwave

HOU De-ting¹, DENG Chao-ping², ZHANG Yan¹

(1.Institute of Science, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450001, China; 2.95806 Troop, Beijing 100076, China)

Abstract: The resultant field calculation model considering the direction of polarization for high power microwave sparse array is built. The relationship of the resultant field value with the direction of polarization and the element initial phase about one dimensional array is analyzed. If the polarization direction of sparse array is parallel, the field distribution of two-element arrays is primarily presented as alternately dark and bright stripes, and that of three-element array is primarily presented as mesh structure. The polarization direction and initial phase of elements arrays greatly affect the superimposing efficiency of the resultant field. The polarization direction decides the amplitude of the resultant field; while initial phase of elements regulates the superimposing efficiency furthermore. The smaller of difference between the angles, the bigger of superimposing efficiency will be. For more than three-element array with complexly combined mode of polarization direction, the superimposing efficiency of the resultant field can be simulated by the positions of array and target. The normalized amplitude value of the resultant field is between 2.22~2.43, which shows a difference when compared with idealized max value. The field computational accuracy has been improved with this model. It is an efficient way to increase the power density about the target from High Power Microwave(HPM) antenna arrays.

Key words: high power microwave; direction of polarization; sparse array; resultant field

随着各种新型高功率微波源的出现, 高功率微波定向能传输、轨道碎片定位、大气臭氧层治理、人造电离层等实际或预期应用正在不断提出, 这些应用都需要在相应区域达到极大的功率密度。由于产生高功率微波的物理机制及器件工艺结构等原因, 各种源的输出功率都受到限制。另外, 当大气中传输的高功率微波超过某一强度时, 可能会发生大气击穿^[1]。这些因素都限制了目标区域的高功率微波的功率密度。为了突破这些限制, 人们正在探寻微波功率合成技术。现在已经提出的微波功率合成技术有通道功率合成技术和空间功率合成技术^[2-4], 其中空

收稿日期: 2013-05-17; 修回日期: 2014-01-26

基金项目: 国家 863 计划资助项目(803AA409D)

间功率合成的方法又分为相控阵、聚焦束及交叉波束法^[5]。文献[6]讨论了基于二元阵的空间功率合成,文献[7]研究了三元、五元及七元线阵合成增益与相位的关系,文献[8]分析了随机相位条件下,单元间耦合系数、极化方式及增益对空间功率合成的影响,文献[9]讨论了短波段稀布阵列、幅相误差对空间功率合成的影响。稀布阵空间功率合成场分布一般为网状结构,其网孔大小与阵元间距及目标高度有关,当阵元间距较大时网孔较密,此时合成场的最大场强是稀布阵合成主要关心的内容,而上述文献大多用简略的模型对阵列合成进行了定性的分析,模型中假设各阵元的极化方向一致,其计算结果不够准确,本文将阵列的极化情况引入到计算模型中,提高了模型的计算精确度,从而提供更准确的峰值场强,为空间功率合成的阵列设计提供依据。

1 一维线阵模型及仿真分析

图1是2个阵元的合成情况,假定电磁波的极化方式为线极化。在两束波极化方向平面内建立 $u-v$ 局部坐标系,见图2。阵元在目标点的电场瞬时值表达式为:

$$E_1 = a \cos(\omega t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1 + \varphi_1) \quad (1)$$

$$E_2 = b \cos(\omega t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_2 + \varphi_2) \quad (2)$$

式中: a 和 b 分别为 2 束电磁波的振幅; ω 为微波频率; $\mathbf{k}_1$ 和 $\mathbf{k}_2$ 为波矢; $\mathbf{r}_1$ 和 $\mathbf{r}_2$ 为两电磁波波源到合成点的距离; φ_1 和 φ_2 为初相位。如果阵列 1、阵列 2 的极化方向与 u 轴的夹角分别为 α 和 β , 在极化平面坐标中合成场强的 2 个分量为:

$$E_u = a \cos \alpha \cos(\omega t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1 + \varphi_1) + b \cos \beta \cos(\omega t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_2 + \varphi_2) \quad (3)$$

$$E_v = a \sin \alpha \cos(\omega t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1 + \varphi_1) + b \sin \beta \cos(\omega t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_2 + \varphi_2) \quad (4)$$

设阵列等幅馈电,并对其归一化,即 $a=1, b=1$ 。令阵列 1 的极化方向与 u 轴的夹角 $\alpha=0$, 阵列 1 的初相位 $\varphi_1=0$, 改变阵列 2 的极化方向和初相位,合成场强的计算结果见图 3。图 3 是阵列 2 的极化方向与 u 轴夹角 β 分别为 $0, \pi/5, \pi/2$, φ 从 $0 \sim 2\pi$ 改变时,得到的仿真结果。比较图 3 可得,当 $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ 和 $0 \leq \beta \leq \pi/2$ 时, α 与 β 相差越小,阵列叠加得到的峰值场强越大,当 $\alpha=\beta$ 时,两阵元的极化方向相同,阵列叠加满足相干条件,此时的合成峰值场强达到最大值,合成场叠加效率最高,如图 3(a)所示,此时的峰值场强为 2; α 与 β 相差越大,阵列叠加得到的峰值场强越小,当 $\alpha-\beta=\pm\pi/2$ 时,两阵元的极化方向相互垂直,此时两阵元互不干扰,得到的峰值场强最小,合成效率最低,仿真结果如图 3(c)所示,此时得到的峰值场强为 $\sqrt{2}$ 。当 α 与 β 的夹角介于 $0 \sim \pi/2$ 时,峰值场强为 $\sqrt{2} \sim 2$ 。分析图 3(b)和 3(c)可知,阵元 2 的初相位发生改变时,阵列合成场强的峰值发生改变,但不论阵元初相位如何改变,合成场强的最大值出现在阵元初相位相差 $k\pi$ 时。因此,阵元的极化方向决定阵列合成电场的幅值,阵元初相位在此基础上对阵列合成电场的幅值进一步调节。二元阵列是最简单的阵列,进行阵列合成时,尽可能使二者的极化方向及阵元初相位一致,从而得到较高的合成效率,随着阵列数目的增多,尤其是阵列维数的变化,阵列极化方向组合变得复杂起来。

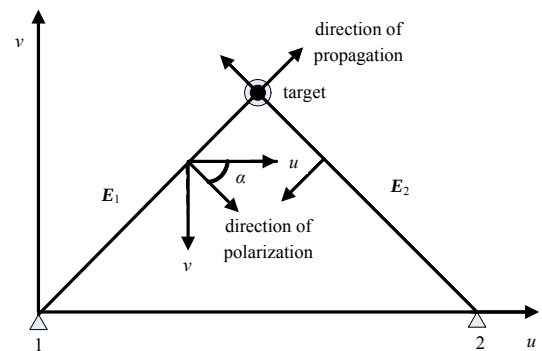


Fig.1 Two-element array

图1 二元阵列

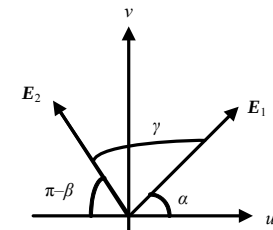


Fig.2 Intersection angle of direction of polarization of two-element array

图2 二元阵列极化方向间的夹角

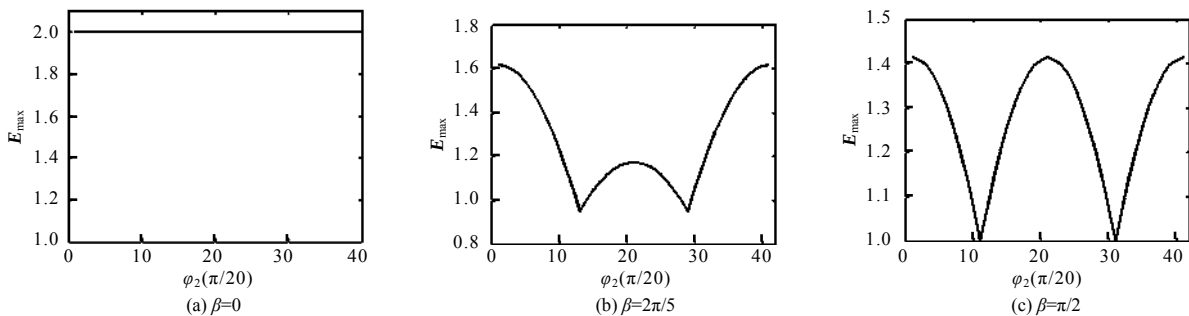


Fig.3 Maximum of combined field on different polarization directions for two-element array

图3 二元阵列不同极化方向下合成场的最大值

当阵列是由3个或3个以上的阵元组成的线阵时,若其极化方向都在同一平面,此时阵列合成场的计算方式与二元阵列类似,当极化方向不在同一平面时,极化方向位于三维空间,此时一维阵列与二维阵列相似,这种情况将在二维阵列中进一步分析。

2 二维面阵模型及仿真分析

对于由3个或3个以上阵元组成的线阵,如果极化方向不在同一平面内,对于阵列的合成场分布的研究,需建立三维直角坐标系,在三维空间中对其进行分析,而二维面阵阵元电场极化方向不在同一平面,对其合成分析也应建立在三维空间基础上,下面主要分析二维面阵合成。根据目标是否处于阵列中,二维面阵也有2种布阵方式,即目标处于阵列中和目标处于阵列外,不同布阵方式阵列在目标处的极化方向不同,图4是一个目标处于阵列正上方的三元二维阵列,各阵元的极化方向见图5。各阵元波束与坐标轴 w 的夹角为 θ_{n0} ,各阵元与坐标轴 u 的夹角为 φ_{n0} ,各阵元极化方向与坐标轴 w 的夹角 θ_n 在 $\pi/2 - \theta_{n0} \sim \pi/2 + \theta_{n0}$ 范围内,与坐标轴 u 的夹角 φ_n 在 $\varphi_{n0} \sim \varphi_{n0} + \pi$ 范围内。设阵元 n 的坐标为 (x_n, y_n, z_n) ,目标点的坐标为 (x, y, z) ,则阵元波束与坐标轴 w 的夹角 θ_{n0} 的表达式为:

$$\theta_{n0} = \arcsin \frac{\sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2}}{\sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + z^2}} \quad (5)$$

阵元与坐标轴 u 的夹角 φ_{n0} 的表达式为:

$$\varphi_{n0} = \begin{cases} \arctan \frac{y_n - y}{x_n - x}, & x_n - x > 0, y_n - y > 0 \\ 2\pi + \arctan \frac{y_n - y}{x_n - x}, & x_n - x > 0, y_n - y < 0 \\ \pi + \arctan \frac{y_n - y}{x_n - x}, & x_n - x < 0, y_n - y > 0 \\ \pi + \arctan \frac{y_n - y}{x_n - x}, & x_n - x < 0, y_n - y < 0 \end{cases} \quad (6)$$

设阵列各阵元电场在目标处电场的瞬时值表达式为:

$$E_1 = a \cos(\omega t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1 + \beta_1) \quad (7)$$

$$E_2 = b \cos(\omega t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_2 + \beta_2) \quad (8)$$

$$E_3 = c \cos(\omega t - \mathbf{k}_3 \cdot \mathbf{r}_3 + \beta_3) \quad (9)$$

式中: c 为电场振幅; $\mathbf{k}_3$ 为波矢; β_1, β_2 和 β_3 为阵元初相位。

阵列在各个坐标轴上合成场强的表达式为:

$$E_u = a \sin \theta_1 \cos \varphi_1 \cos(\omega t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1 + \beta_1) + b \sin \theta_2 \cos \varphi_2 \cos(\omega t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_2 + \beta_2) + c \sin \theta_3 \cos \varphi_3 \cos(\omega t - \mathbf{k}_3 \cdot \mathbf{r}_3 + \beta_3) \quad (10)$$

$$E_v = a \sin \theta_1 \sin \varphi_1 \cos(\omega t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1 + \beta_1) + b \sin \theta_2 \sin \varphi_2 \cos(\omega t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_2 + \beta_2) + c \sin \theta_3 \sin \varphi_3 \cos(\omega t - \mathbf{k}_3 \cdot \mathbf{r}_3 + \beta_3) \quad (11)$$

$$E_w = a \cos \theta_1 \cos(\omega t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1 + \beta_1) + b \cos \theta_2 \cos(\omega t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_2 + \beta_2) + c \cos \theta_3 \cos(\omega t - \mathbf{k}_3 \cdot \mathbf{r}_3 + \beta_3) \quad (12)$$

图6是目标距离阵列中心10 km,阵元坐标不同时合成场强最大值的仿真图。根据上面的分析知道,阵元位置改变时阵元的极化方向也将改变,图中横坐标表示极化方向的变化,纵坐标为相应极化方向下合成场的最大值, θ_n 变化的步长为 $2\theta_{n0}/N$, φ_n 的变化步长为 π/N 。由于在多元二维面阵中,初相位的组合方式极为复杂,但其对二维面阵合成的影响与一维线阵的影响一致,这里假设所有阵元初相位为0,仅分析考虑极化情况下的阵列合成。图6(a)是阵元坐标分别为 $(500, 750, 0), (-1000, 550, 0), (-500, 500, 0), \theta_{10}=5.15^\circ, \theta_{20}=6.511^\circ, \theta_{30}=4.045^\circ, \varphi_{10}=-28^\circ, \varphi_{20}=68^\circ, \varphi_{30}=139^\circ$ 时得到的仿真结果;图6(b)是阵元坐标分别为 $(1000, 1500, 0), (-2000, 1100, 0), (-1000, 1000, 0), \theta_{10}=10.216^\circ, \theta_{20}=12.858^\circ, \theta_{30}=8.051^\circ, \varphi_{10}=-22^\circ, \varphi_{20}=76^\circ, \varphi_{30}=76^\circ$ 时得到的仿真结果;图6(c)是阵元坐标分别为 $(1500,$

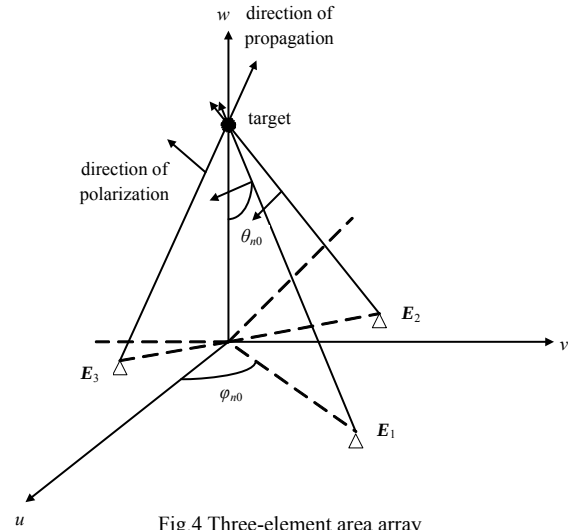


Fig.4 Three-element area array
图4 三元面阵

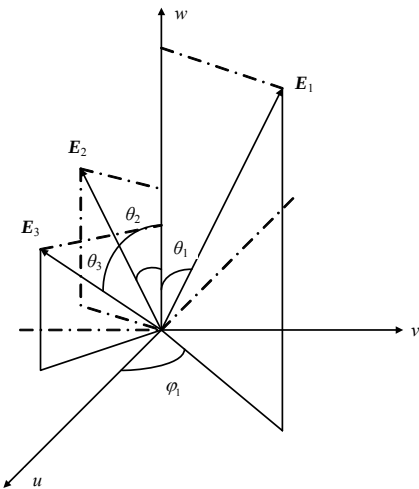


Fig.5 Intersection angle of polarization direction
for three-element area array
图5 极化三元阵的极化方向

2 250,0),(-3 000,1 650,0),(-1 500,1 500,0), $\theta_{10}=10.216\ 9^\circ$, $\theta_{20}=12.858\ 8^\circ$, $\theta_{30}=8.051^\circ$, $\varphi_{10}=-15^\circ$, $\varphi_{20}=85^\circ$, $\varphi_{30}=149^\circ$ 时得到的仿真结果。由图 6 可知,在上述坐标位置及目标位置情况下,三元稀布面阵合成场强最大值在 2.22~2.43 之间,与理想合成场最大值 3 相差较大。由此可知阵元极化方向不同时阵列合成场最大值不同;不同布阵方式阵列的合成场最大值也不同;多元二维面阵合成场最大值与理想最大值相差较大,其合成场功率远达不到与阵元数目成平方关系增长。

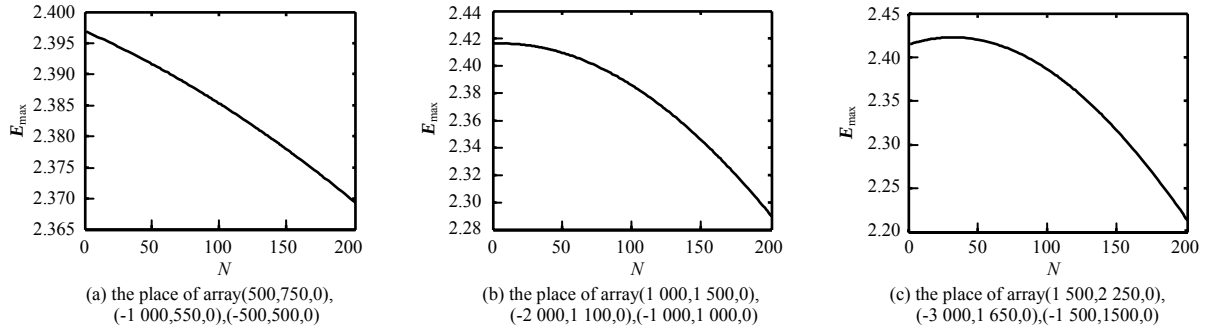


Fig.6 Maximum of combined field on different polarization directions for three-element area array

图 6 三元面阵不同阵元坐标在不同极化方向下合成场强最大值

3 结论

本文建立了考虑极化情况的高功率微波稀布阵计算模型,模拟了稀布阵合成的最大场强值,分析了阵元极化方向、阵元初相位以及阵列位置对阵列合成的影响。极化方向相同时,二元线阵场分布为明暗相间的条纹,三元面阵场分布为网状结构。阵元极化方向及阵元初相位共同影响合成场的叠加效果,阵元的极化决定阵列合成场的最大值,阵元初相位在此基础上对阵列叠加效果进一步调节。对于二元线阵,极化方向夹角越小,合成叠加效率越高;对三元以上的多元面阵,其极化方向组合方式复杂,极化方向与布阵方式、天线极化方式及天线布局有关。当极化方向与阵元位置和目标位置相对确定时,可通过阵元位置和目标位置得到阵列合成场的叠加效率,模拟结果表明,三元稀布面阵合成场强最大值在 2.22~2.43 之间,与理想合成场最大值 3 相差较大。该模型提高了稀布阵列合成场强的计算准确度,对阵列的布阵方式的设计具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 段耀勇,陈雨生. 高功率微波脉冲大气击穿及其对能量传输的影响[J]. 微波学报, 2000,16(9):261-264. (DUAN Yao-yong, CHEN Yu-sheng. Air breakdown of high power microwave pulse and its effect on transmitted energy[J]. Journal of Microwaves, 2000,16(9):261-264.)
- [2] Varian K R. Power combining in a single multiple-diode cavity[C]// IEEE, Micro. Theory and Techniques, 1978:344-345.
- [3] MA Y, SUN C. 1-W millimeter-wave Gunn diode combiner[J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 1980,28(12):1460-1463.
- [4] Hummer K A, Chang K. Spatial powers combining using active microstrip patch antennas[J]. Tech. Lett., 1988,1(1):8-9.
- [5] 赵荣,侯德亭,郭杰,等. 高功率微波空间功率合成方法研究[J]. 信息工程大学学报, 2007,8(4):443-445. (ZHAO Rong, HOU De-ting, GUO Jie, et al. Analysis of HPM spatial power combining methods[J]. Journal of Information Engineering University, 2007,8(4):443-445.)
- [6] 张嘉焱,舒挺,袁成卫. 高功率微波空间功率合成的初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2007,19(6):915-918. (ZHANG Jia-yan, SHU Ting, YUAN Cheng-wei. Primary study on spatial combining of parallel and intersectant beams of high power microwave[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007,19(6):915-918.)
- [7] 张嘉焱,舒挺,袁成卫. 空间功率合成中随机相位与增益关系的概率分析[C]// 第 10 届高功率粒子束学术交流会议文集. 长沙:[s.n.], 2006:471-474. (ZHANG Jia-yan, SHU Ting, YUAN Cheng-wei. Probability analysis about the influence of the stochastic phase on the gain in spatial power combining[C]// Tenth high-power particle beams academic conference proceedings. Changsha, China:[s.n.], 2006:471-474.)
- [8] 壬学尧,陈鑫. 随机相位微波功率的空间合成效率[J]. 强激光与粒子束, 2009,21(7):1041-1044. (REN Xue-yao, CHEN Xing. Efficient of microwave power spatial synthesis under random phase shift[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009,21(7):1041-1044.)