

相控阵天线的电磁环境分析

王 侃,朱瑞平

(南京电子技术研究所,江苏南京 230027)

摘 要: 本文基于相控阵天线的方向图综合原理,对天线辐射近、远场内的电磁环境做了准确而全面的分析;总结和归纳了相控阵天线,特别是大型相控阵天线辐射的一般特征和规律,从而为相控阵天线的电磁兼容设计提供准确的理论依据和高效的分析手段.

关键词: 相控阵天线;电磁环境;电场强度;功率密度

中图分类号: TN821.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 03-0571-04

电子学报 URL: http://www.ejournal.org.cn

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.03.026

Analysis of Electromagnetic Environment of Phased Array

WANG Kan, ZHU Rui-ping

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 230027, China)

Abstract: A new technique based on the pattern synthesis is proposed to analyze the electromagnetic environments of phased arrays. This article analyses the radiation properties of phase arrays, especially large phased arrays, to provide a precise and efficient method for the electromagnetic compatibility design.

Key words: phased array; electromagnetic environment; electric field intensity; power density

1 引言

相控阵天线是由许多天线单元排列而成的定向天线.它通过改变天线单元的激励相位来实现波束的快速扫描.与传统的机械扫描天线相比,相控阵天线具有波束扫描灵活快捷、工作方式多样、抗干扰能力强、可靠性高等优点,已成为雷达最主要的发展方向.

随着研究的不断深入,相控阵天线的电磁兼容设计也得到了越来越多的重视^[1~5].例如同一适装平台内,多个相控阵天线之间电磁信号的串扰和抑制;大功率基站对民航、各类飞行器以及地面人员的电磁防护等等都需要借助电磁兼容设计.而电磁环境分析则为电磁兼容设计提供着理论依据和分析手段.

2 理论与公式

如图1所示,相控阵天线位于XY平面内,由N个天线单元组成,水平和垂直的单元间距分别为dx和dy.第i个(i=1,2,...,N)天线单元在空间场点0处产生的电场强度E_{0i}可以表示为^[6]:

$$E_{0i} = K_i I_i e^{j\phi_i} f_i \left(\frac{\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|} \right) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|} \cdot (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|^2} \quad (1)$$

其中k是自由空间的传播常数,r_i和r₀分别为第i个

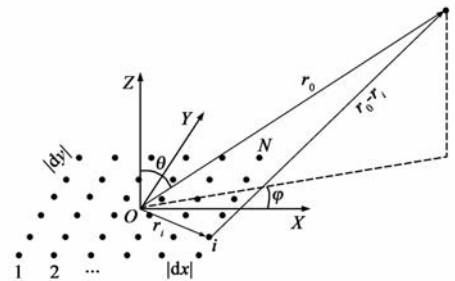


图1 相控阵雷达的电磁环境分析示意图

单元和场点0的位置矢量,I_i和φ_i分别代表第i个单元激励电流的幅度和相位,K_i是第i个单元辐射场强的比例常数,而f_i是第i个单元的归一化单元方向图.相控阵天线在场点0处产生的电场强度是所有天线单元在该点处电场强度的合成,即

$$E_0 = \sum_{i=1}^N E_{0i} = \sum_{i=1}^N K_i I_i e^{j\phi_i} f_i \left(\frac{\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|} \right) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|} (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|^2} \quad (2)$$

对于相控阵天线,特别是大型相控阵天线,各天线单元可认为是相似元,即它们的单元方向图和比例常数一致,则式(2)可以简化为:

$$\mathbf{E}_0 = K \sum_{i=1}^N I_i e^{j\phi_i} f\left(\frac{\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|}\right) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|} (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|^2} \quad (3)$$

其模值为:

$$E_0 = |K| \cdot \left| \sum_{i=1}^N I_i e^{j\phi_i} f\left(\frac{\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|}\right) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|} (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|^2} \right| \quad (4)$$

相控阵天线的辐射场区一般可分为辐射近场区 ($\lambda/2\pi \leq r_0 \leq 2D^2/\lambda$) 和辐射远场区 ($r_0 \geq 2D^2/\lambda$), 其中 D 和 λ 分别代表天线阵列的口径和工作波长. 如果场点 O 位于辐射远场区, 则式(4)可做如下近似:

$$\begin{aligned} E_0 &= |K| \cdot \left| \sum_{i=1}^N I_i e^{j\phi_i} f\left(\frac{\mathbf{r}_0}{r_0}\right) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|} \cdot \mathbf{r}_0}{r_0^2} \right| \\ &= \left| \frac{K}{r_0} f\left(\frac{\mathbf{r}_0}{r_0}\right) \right| \cdot |e^{-jkr_0}| \\ &\quad \cdot \left| \sum_{i=1}^N I_i e^{j(kdx\sin\theta\cos\varphi + kdys\sin\theta\sin\varphi + \phi_i)} \right| \\ &= \frac{|K|}{r_0} \left| f\left(\frac{\mathbf{r}_0}{r_0}\right) \right| \\ &\quad \cdot \left| \sum_{i=1}^N I_i e^{j(kdx\sin\theta\cos\varphi + kdys\sin\theta\sin\varphi + \phi_i)} \right| \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\theta \in (-90^\circ, 90^\circ)$ 和 $\varphi \in (0, 360^\circ)$ 分别代表 \mathbf{r}_0 与 Z 轴夹角和 \mathbf{r}_0 在 XY 平面内的投影与 X 轴的夹角. 不考虑常数项, 则式(5)变为:

$$E_0 = \left| f\left(\frac{\mathbf{r}_0}{r_0}\right) \right| \cdot \left| \sum_{i=1}^N I_i e^{j(kdx\sin\theta\cos\varphi + kdys\sin\theta\sin\varphi + \phi_i)} \right| \quad (6)$$

式(6)即为相控阵天线的方向图乘积定理.

在利用式(4)进行相控阵天线的电磁环境分析时, 比例常数 K 往往很难准确计算和测定. 为解决这一困难, 本文提出了如下的解决方法.

如果场点 O 位于辐射远场区内的最大辐射方向上 (即法线方向 \mathbf{n} , $\theta=0$, 归一化场强 $f(\mathbf{n})=1$), 则根据式(5), 该点处的电场强度为

$$E_0 = \frac{|K|}{r_0} \cdot \left| \sum_{i=1}^N I_i e^{j\phi_i} \right| \quad (7)$$

同时该点处的电场强度还可以用下式计算^[7]:

$$E_0 = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{r_0} \quad (8)$$

其中 P_t 和 G_t 分别是相控阵天线的发射总功率和发射增益. 联立式(7)和式(8), 可得

$$|K| = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{\left| \sum_{i=1}^N I_i e^{j\phi_i} \right|} \quad (9)$$

将式(9)代入式(4), 得

$$E_0 = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{\left| \sum_{i=1}^N I_i e^{j\phi_i} \right|} \left| \sum_{i=1}^N I_i e^{j\phi_i} f\left(\frac{\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|}\right) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|} (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|^2} \right| \quad (10)$$

上式中已经消去了比例常数 K 对电场强度的影响, 从而能够准确分析相控阵天线的电磁环境. 根据式(10), 场点 O 处的功率密度 P_0 为

$$P_0 = \frac{|E_0|^2}{\eta} \quad (11)$$

其中 η 是自由空间的波阻抗.

在进行相控阵天线的电磁环境分析时, 本文定义两个重要的参数: 场强极值和时间平均场强.

相控阵天线通过改变每个天线单元的激励相位来实现波束的快速扫描. 每个相控阵天线都有其固定的波束覆盖范围 Γ . 在波束扫描的过程中, 任意场点处的电场强度都在发生变化.

定义场点 O 处的场强极值 E_0^{\max} 为波束扫描过程中, 该点处出现的电场强度最大值, 即

$$E_0^{\max} = \max_{\Gamma} (E_0) \quad (12)$$

定义场点 O 处的时间平均场强 \bar{E}_0' 为波束扫描过程中, 单位时间内该点处的电场强度均值, 即

$$\bar{E}_0' = \frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=T} E_0 dt \quad (13)$$

其中 T 为采样时间. 对应于场强极值 E_0^{\max} 和时间平均场强 \bar{E}_0' 的功率密度极值 P_0^{\max} 和时间平均功率密度 \bar{P}_0' 分别为

$$\bar{P}_0^{\max} = \frac{(\bar{E}_0^{\max})^2}{\eta} \quad (14)$$

$$\bar{P}_0' = \frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=T} \frac{(E_0)^2}{\eta} dt \quad (15)$$

对于发射脉冲波的相控阵天线来说, 如果所有的脉冲都具有相同的宽度 σ 和周期 τ , 则在 M 个脉冲周期内

$$\bar{E}_0' = \frac{1}{M\tau} \int_{t=0}^{t=M\tau} E_0 dt = \frac{\sigma}{M\tau} \sum_{i=1}^M E_0^i = \frac{\alpha}{M} \sum_{i=1}^M E_0^i \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_0' &= \frac{1}{M\tau} \int_{t=0}^{t=M\tau} \frac{(E_0)^2}{\eta} dt = \frac{\sigma}{M\tau} \sum_{i=1}^M \frac{(E_0^i)^2}{\eta} \\ &= \frac{\alpha}{M} \sum_{i=1}^M \frac{(E_0^i)^2}{\eta} = \frac{\alpha}{M} \sum_{i=1}^M P_0^i \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $\alpha = \sigma/\tau$ 为发射脉冲的占空比, E_0^i 和 P_0^i 为第 i 个周期内场点 O 处的峰值场强和峰值功率密度.

本文的电磁环境分析是在自由空间进行的. 事实上, 电磁波都是在非自由空间中传播的. 媒质吸收、地貌地物的影响、多路径传输等都会使信号发生衰减. 因此, 实际上场点 O 处的电场强度表达式为

$$E = E_0 \cdot A \quad (18)$$

其中 A 被称为衰减因子, 它与工作频率、传播距离、媒质参数、地貌地物等因素有关. 特别是对于辐射远场区, 随着距离的增加, A 会有明显的衰落.

3 计算结果和数值分析

本章将利用第 2 章的理论公式进行相控阵天线的电磁环境分析.在分析过程中,单元方向图 f 用下式表示

$$f = \cos(\theta_{r_0-r_i}) \quad (19)$$

其中 $\theta_{r_0-r_i}$ 表示 $r_0 - r_i$ 与 Z 轴的夹角,如图 1 所示.相控阵天线的发射口径采用均匀权,每个天线单元辐射的峰值功率为 10W.

如图 2 所示为半波振子组成的相控阵天线.该天线水平、垂直方向的单元间距 d_x, d_y 均为 0.6λ ,水平、垂直方向单元数均为 20.该阵列天线的发射增益为 32.6dB.根据估算,该天线辐射近、远场区域的界限在 350m 左右.

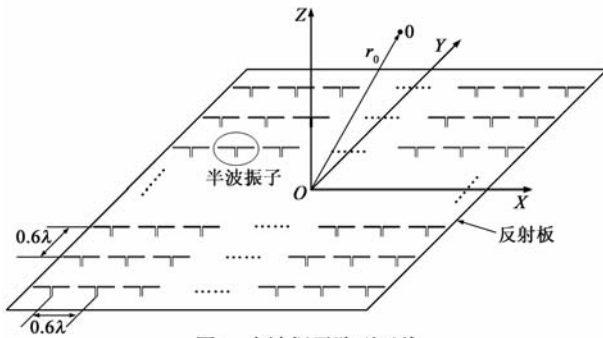


图2 半波振子阵列天线

当相控阵天线的波束指向阵面法向时,利用矩量法(MoM: Method of Moment)^[8]和本文方法分别计算 XZ 平面内距离阵面中心不同距离处的电场强度分布,其中 $r_0 = 20\text{m}, 100\text{m}$ 在阵列天线的辐射近场区内,而 $r_0 = 400\text{m}$ 在辐射远场区内.计算结果如图 3 所示.图中横坐标 $\theta \in (-90^\circ, 90^\circ)$ 代表 r_0 与 Z 轴的夹角;纵坐标为电场强度;实线和虚线分别代表矩量法和本文方法的计算结果.从中可以看到:不论是辐射近场区,还是远场区,两种方法所得结果较为一致,只在 $|\theta| > 70^\circ$ 以外的大角度区域稍有差异.造成这种差异的原因是在本文方法的计算过程中所使用的单元方向图表达式(19)在 $|\theta| > 70^\circ$ 以外区域未能与实际单元方向图很好的吻合.

图 4、图 5 和图 6 所示为大型相控阵天线的电磁环

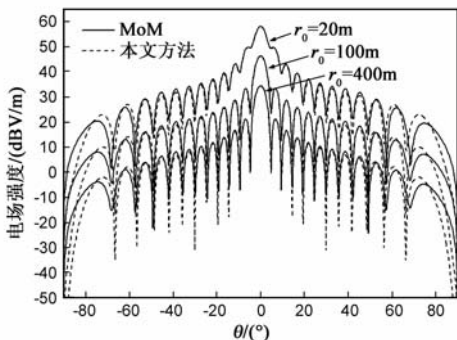


图3 相控阵天线辐射近、远场区电场强度的分布图情况1

境分析结果.该相控阵天线水平、垂直方向单元数分别为 90 和 120;水平、垂直方向的单元间距 d_x, d_y 均为 $\lambda/2$;每个天线单元发射脉冲信号,占空比为 10%.发射增益 45.3dB;波束覆盖范围 $\Gamma(\theta \in (0, 30^\circ)$ 和 $\varphi \in (0, 360^\circ)$),波位以 0.886 个波束宽度交叠.根据估算,天线辐射近、远场区域的界限在 3600m 左右.

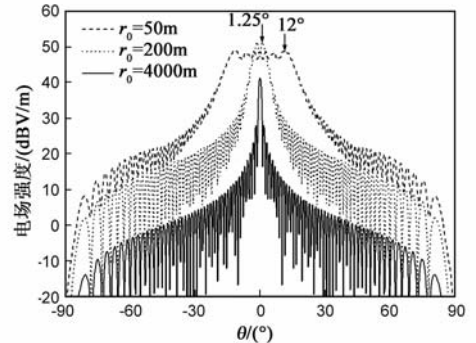


图4 相控阵天线辐射近、远场区电场强度的分布图情况2

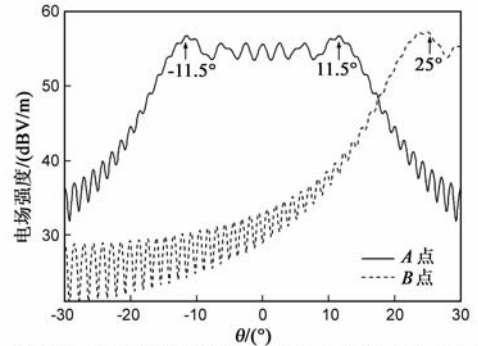


图5 相控阵天线扫描过程中同一场点电场强度的变化曲线

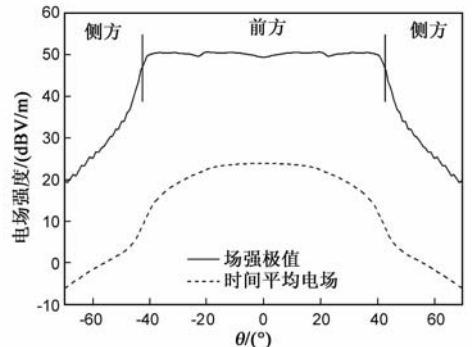


图6 相控阵天线扫描过程中前、侧向区域的划分

图 4 所示为相控阵天线的波束指向阵面法向时,在 XZ 平面内距离阵面中心分别为 50m、200m 和 4000m 处的电场强度分布.从中可以看到,天线辐射近、远场区内的电场强度分布存在着较大差异.在近场区内波束没有形成,能量也不集中.随着距离的增加,能量逐渐集中,并最终形成波束.在辐射远场区,电场强度的最大值都出现在波束指向上,而在辐射近场区并非如此.如图 4 中所示,在 $r_0 = 50\text{m}$ 和 200m 的区域上,电场强度的最大值 49.12dBV/m 和 51.47dBV/m 分别出现在 $\pm 12^\circ$

和 $\pm 1.25^\circ$ 的位置上,均不在波束指向上.

图5所示为在相控阵天线的波束扫描过程中,空间场点处电场强度的变化.分析时选取了A、B两点,其与阵列中心O的距离均为50m. A点位于阵面法向, $\theta_A = 0$,而B点位于波束覆盖范围 Γ 之外,其 $\theta_B = 35^\circ$. 图5中横坐标为相控阵天线的波束指向,纵坐标为电场强度.从中可以看到A点的场强极值56.80dBV/m没有出现在波束指向法向的时候,而是出现在波束指向 $\pm 11.5^\circ$ 的时候.而B点处场强极值57.33dBV/m也没有出现在波束扫描至 30° 时,而是 25° 的时候.计算结果表明:空间场点处的场强极值并非一定出现在波束指向场点方向,或与场点方向最近的时候;不同场点处出现场强极值的波束指向是不同的;因此在计算场强极值时,必须考虑所有波束指向上的电场强度,才能最终确定该点处的场强极值.

图6所示为相控阵天线的扫描过程中,近场区域内法线方向上离原点O距离500m处的场强极值与时间平均场强.图中横坐标 θ 代表了 r_0 与Z轴的夹角;纵坐标为电场强度.从图中可以看到:可将空域分为前方和侧方两个区域.在前方区域内,场强极值变化和时间平均场强变化不大,但在侧方区域,场强会急剧下降.大量的计算结果表明:前方的区域范围要大于雷达的波束扫描范围.

图7所示为相控阵天线的扫描过程中,法线方向上距离原点O不同距离处的电磁环境.图中横坐标 r_0 为场点距天线中心O的距离.实线和虚线分别代表波束扫描过程中的场强极值和时间平均场强.从图中可以看到,在 $r_0 < 1200\text{m}$ 的区域内(相当于近场区域的1/3),电场强度存在着振荡.在此区域之外,电场强度随着距离的增加呈单调递减的趋势.

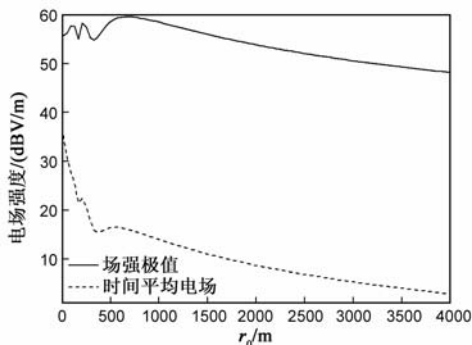


图7 相控阵天线扫描过程中不同距离处的电磁环境

4 总结

本文基于相控阵天线的方向图综合原理,提出了新的相控阵天线电磁环境分析的理论公式,并通过数值结果证明了新方法的正确性.利用该方法,文章分析了相控阵天线,特别是大型相控阵天线的电磁环境.结

果显示,相控阵天线辐射近、远场区内的电磁环境存在着明显差异.通过文中新定义的场强极值和时间平均场强的概念,文章总结和归纳了相控阵天线辐射的一般特点和规律,从而为相控阵天线的电磁兼容设计提供准确的理论依据和高效的分析手段.

参考文献

- [1] 苏东林,王东方,王明皓,等.机载天线电磁兼容分析[J].北京航空航天大学学报,2002,28(2):228-230.
SU D L, WANG D F, WANG M H, et al. Electromagnetic compatibility analysis of plane antennas[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(2): 228-230. (in Chinese)
- [2] 纪奕才,邱扬,陈伟,等.车载多天线系统的电磁兼容问题分析[J].电子学报,2002,30(4):560-563.
JI Y C, QIU Y, CHEN W, et al. Analysis of EMC problems of the vehicular multiple antennas system[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(4): 560-563. (in Chinese)
- [3] 张玉,王楠,梁昌洪,等.PC集群MPI并行矩量法分析复杂平台多天线特性[J].电子学报,2006,34(3):478-482.
ZHANG Y, WANG N, LIANG C H, et al. Study of MPI based parallel MoM on PC clusters for multiple antennas mounted on complex platforms[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3): 478-482. (in Chinese)
- [4] 赵勋旺,梁昌洪,张玉,等.机载多天线系统电磁兼容性研究[J].计算物理,2008,25(5):597-601.
ZHAO X W, LIANG C H, ZHANG Y, et al. EMC characteristics of multiple airborne antennas[J]. Chinese Journal of Computational physics, 2008, 25(5): 597-601. (in Chinese)
- [5] 赵勋旺,张玉,梁昌洪,等.舰载多天线系统电磁兼容性分析[J].电波科学学报,2008,23(2):252-256.
ZHAO X W, ZHANG Y, LIANG C H, et al. Fast EMC analysis of multiple shipborne antennas system[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(2): 252-256. (in Chinese)
- [6] 张光义.相控阵雷达系统[M].北京:国防工业出版社,1997.36-38.
- [7] 周朝栋,王元坤,杨思耀,等.天线与电波[M].西安:西安电子科技大学出版社,2001.
- [8] R F Harrington. Field Computation by Moment Methods[M]. New York: IEEE Press, 1993.

作者简介

王侃 男,1979年6月出生于江苏江阴.分别于2001年和2007年在中国科学技术大学电子工程与信息科学系获学士和博士学位.现为南京电子技术研究所高级工程师,主要从事电磁场数值算法、微波技术、天线设计、相控阵理论等方面的研究工作.

E-mail: jykanwang@gmail.com

朱瑞平 男,1961年12月出生于山东成武.1984年毕业于西北电讯工程学院(现西安电子科技大学).现为南京电子技术研究所研究员级高工,主要从事相控阵及各类天线与微波技术的研究.