

特邀文章

相控阵天线的耦合激励系数及盲点研究*

李建瀛 于绪景 张凌凯

(西北工业大学 电子信息学院, 西安 710072)

摘要: 为了深入探讨相控阵天线单元间的相互耦合,以阵列天线单元 S 参数为基础,分别分析了振子形式辐射单元和缝隙形式辐射单元组成阵列的辐射单元之间的耦合关系,并利用天线单元的耦合激励系数分析计算了阵中单元的有源辐射方向图。对阵列中每个单元的耦合激励系数的幅度和相位进行了分析,发现平行排列单元和轴向排列单元的耦合激励系数的相位存在差异,平行排列时激励单元与相邻单元间的相位相差较小,这种差异是阵列产生盲点的主要因素。

关键词: 相控阵天线,互耦,激励系数,盲点,有源方向图

Analysis of Excited Coefficient and Blindness Spot in a Phased Array Antenna

LI Jian-ying, YU Xu-jing, ZHANG Ling-kai

(School of Electronic and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: For analyzing the mutual coupling between the elements in a phased array deeply, a dipole array and a slot array are studied separately. The S -parameter of the element in an array antenna is applied to analyze the relationship between the elements. The active element patterns are simulated by using the coupling coefficient. The amplitude and the phases of the coupling coefficient are studied. It is found the phase of the coupling coefficient are different when the dipoles (or slots) are arranged in parallel format and tandem format. It is the main reason that blindness spot appears.

Key words: phased array antenna, mutual coupling, excited coefficient, blindness spot, active pattern

引言

阵列天线单元间的相互耦合会造成辐射单元的失配、阵中方向图的变形、以及出现盲点等问题^[1-3],因此单元间的互耦一直是阵列天线设计人员必须面对的问题^[2,4]。研究表明互耦导致相控阵波束扫描的失配与阵中方向图出现大的凹陷有着内在的联系^[1-2]。对阵列天线单元间的相互耦合的研究工作主要包括:降低天线单元之间的耦合,耦合对阵中单元匹配的影响,紧耦合阵列^[5],以及单元的阵中辐射特性等。

有许多文章对天线阵列的阵中单元方向图开展研究:文献[1]采用实验的方法得到单元阵中方向图;文献[2]利用矩量法计算了开口波导阵列的阵

中方向图;文献[3]分析利用天线阵 S 参数来计算单元阵中方向图,文中没有考虑单元的收/发状态对相位的调整。阵中单元方向图影响到整个天线阵列的方向图,因此在天线阵列方向图更精确综合时必须加以考虑^[6-7]。

计算单元方向图时可以利用低频方法直接计算^[2],文献[8]结合实验和 FFT 方法来计算耦合系数和阵中单元方向图;文献[9]提出了一种最小均方有源单元方向图展开方法,该方法将有源单元方向图近似为阵列中部分相邻单元辐射的叠加,并且用最小均方误差准则来求单元耦合以减少近似误差。文献[10]分析了有源方向图与阻抗之间的关系。

阵列天线本身也是一个多端口网络,该多端口网络的 S 参数体现了阵列单元间的相互耦合特性。

* 收稿日期:2023-09-01

基金项目:国家自然科学基金(61871324)

利用多端口网络的概念分析天线单元间的耦合系数,进而利用阵列天线理论分析天线单元的阵中辐射特性。文献[3]给出了利用天线阵 S 参数的计算公式,但没有深入探讨单元收发状态相位的关系,在计算单元的有源辐射时存在问题。本文从多端口网络的 S 参数出发分析了天线阵仅仅激励某一个阵中单元时所产生的耦合激励系数,利用耦合激励系数计算阵中单元方向图,对耦合激励系数的相位做了进一步分析,探讨了阵列单元不同排列方式下相位的变化规律。

1 阵中有源方向图

1.1 耦合激励系数

如图1所示,把 N 个单元的天线阵列看作一个 N 端口网络,利用 S 参数可以很好表现天线单元间的耦合。当阵列天线中某一个天线单元被激励时,由于天线单元间相互耦合的作用使得该单元的阵中方向图(有源方向图)与该天线单元孤立存在时的方向图相比发生了很大变化,同时天线单元在阵中时的有源驻波也发生很大改变,甚至出现不能良好匹配的状况。波束扫描到某一角度时反射系数会很大,甚至完全失配,即出现了扫描盲点。

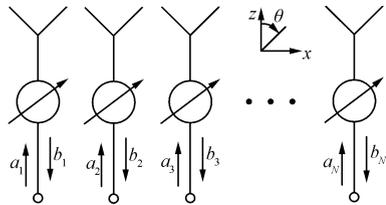


图1 阵列天线及等效 N 端口网络图

天线单元间的耦合激励系数 E 与 N 端口网络的 S 参数有着紧密的关系。从物理意义上讲 S 参数是从天线的端口获得的参数,实际上耦合到天线上的能量一部分传输到了天线的端口,还有一部分能量又散射到了自由空间,看作激励系数那部分能量就是散射到自由空间的那部分能量。

天线单元间的耦合系数与其对应的 S 参数之间在 $i \neq j$ 的情况下可以近似看作存在如下关系:

$$E_{ij} = S_{ij} \quad (1)$$

当 $i=j$ 时元素 E_{ii} 被称为自耦合激励系数,它与 S_{ii} 的物理含义不同, S_{ii} 表示在第 i 个单元激励系数为 1 的情况下第 i 个端口的反射系数, E_{ii} 表示实际施加到天线上的激励。鉴于第 i 个单元被激励时是从发射角度考虑而其它所有单元的 S 参数是从接收

角度考虑,不同的天线单元形式, E_{ii} 与 S_{ii} 的计算关系不同。

1.1.1 电对称振子(电流)

针对简单对称振子模型,把端口直接设置在对称振子的中间。计算第 i 个单元的阵中有源方向图时第 i 个振子处于发射状态而其他单元处于接收状态,因此需要考虑相位因子 $e^{j\pi}$, 自耦合激励系数与 S 参数的关系式为:

$$E_{ii} = S_{ii} - 1 \quad (2)$$

1.1.2 磁对称振子(缝隙,磁流)

磁对称振子对应的天线如开口波导辐射单元以及波导端头开缝辐射单元,如图2所示。

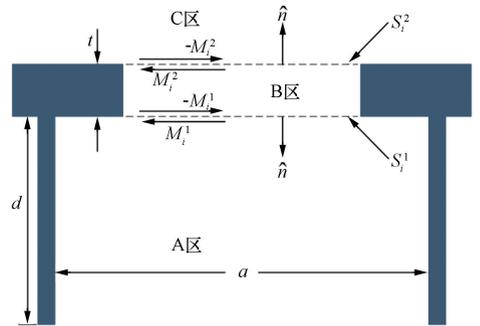


图2 磁流辐射单元

与对称振子不同,仅激励第 i 个缝隙(磁流)时除了需要考虑收发状态引起的相位因子 $e^{j\pi}$ 外还要考虑缝隙上下表面法线指向不同引起的内外表面的磁流方向不一样,上表面磁流用于计算辐射,下表面的磁流用于计算 S 参数,因此出现另外一个相位因子 $e^{j\pi}$ 。同时辐射磁流在 C 区域的缝隙表面,距离端口的距离是 d 和 t ,如图2。 d 和 t ,引起了另外的相位因子 $e^{jk'd}$ 和 $e^{jk't}$, $k' = 2\pi/\lambda_g$, λ_g 是波导波长, k'' 可以根据缝隙尺寸来计算,由于 t 比较小,可以近似用 k' 来取代 k'' 。参考面取在辐射缝隙外表面, $l = d + t$ 。总的相位因子为 $e^{-j2k'l}$ 。

则第 i 个单元的自激励系数为:

$$E_{ii} = (1 - S_{ii}) e^{j\pi} e^{j\pi} e^{-j2k'l} = (1 - S_{ii}) e^{-j2k'l} \quad (3)$$

根据 S 参数可以得到的耦合系数矩阵为:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1N} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ E_{N1} & E_{N2} & \cdots & E_{NN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对称振子上的电流分布以及波导端头缝隙上的磁流分布也可以用矩量法求得^[1]。

1.2 有源方向图

阵列天线中某一个天线的有源方向图是指仅有该单元激励阵列中其它所有单元端接负载情况下整个阵列天线的辐射方向图, 有源方向图包含了单元间的耦合信息。在计算阵列天线某个单元的有源方向图时耦合激励系数就是其它单元的激励系数。

公式(5)是阵列天线方向图的计算公式,

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^N a_n f_n(\theta) e^{jkd(n-1)\sin\theta} \quad (5)$$

其中, $a_n (n=1, 2, \dots, N)$ 为阵列天线中第 n 个单元的激励系数。 $f_n(\theta) (n=1, 2, \dots, N)$ 为阵列天线中第 n 个单元的有源方向图, d 为单元间的间距, $k=2\pi/\lambda$ 。

根据前面的分析我们可以得到第 n 个单元的有源方向图:

$$f_n(\theta) = f(\theta) \sum_{m=1}^N E_{nm} e^{jkd(m-1)\sin\theta} \quad (6)$$

其中, $f(\theta)$ 为阵列天线中天线的单元孤立放置情况下的方向图。

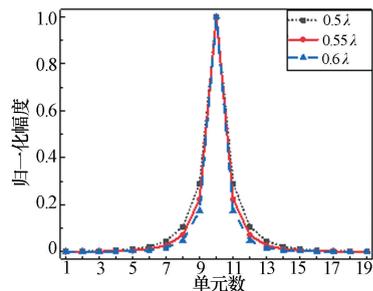
2 耦合系数的幅度及相位

对两个由振子组成的线阵和两个波导端头缝隙组成的线阵的幅度进行了计算, 线阵单元分别是平行排列和纵向排列, 4 个阵列都是 19 个单元等间距排列, 仅中间单元(第 10 号单元)被激励。

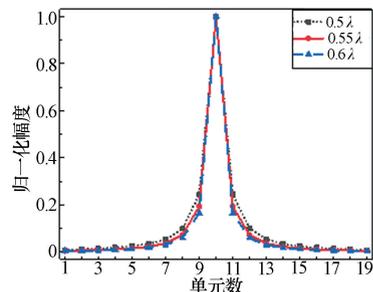
2.1 对称振子阵列的幅度及相位

对称振子的长度为 0.47λ 放置在地板上面, 距离地板高度 0.25λ 。

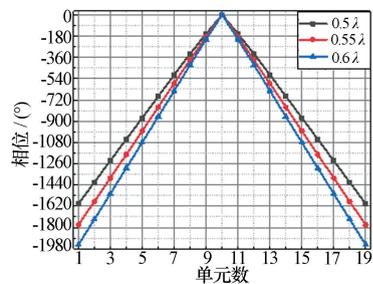
间距分别选 $d=0.5\lambda, 0.55\lambda$ 和 0.6λ , 激励幅度如图 3(a)、(b) 所示, 激励相位如图 3(c)、(d) 所示。从图 3(a)、(b) 中可以看到间距的变化对幅度的改变不明显, 两种不同的排列方式的耦合激励幅度的分布形状相似, 纵向排列阵列单元的耦合激励幅度低于平行排列单元的耦合激励幅度。从图 3(c)、(d) 中可以看到单元的耦合激励的相位分布出现有趣的现象, 激励的是第 10 号单元, 当阵列单元(振子)纵向排列时, 相对于激励单元, 临近的单元的相位连续滞后依次约 180° , 约等于 $-kd$, 这是由单元间距造成的; 当阵列单元平行排列时被激励的 10 号单元与最靠近的单元(第 9 号单元和第 11 号单元)的相位差不再可以利用距离估算, 其相位差约 50° , 其它更远的单元的耦合激励相位在最靠近的单元的相位的基础上依次滞后约 180° 。



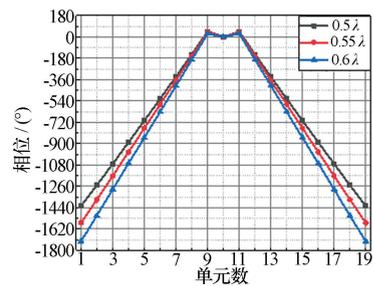
(a) 纵向排列阵列耦合激励幅度分布



(b) 平行排列阵列耦合激励幅度分布



(c) 纵向排列阵列耦合激励相位分布



(d) 平行排列阵列耦合激励相位分布

图 3 对称振子阵列的耦合激励系数

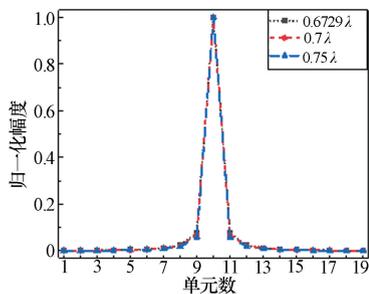
2.2 波导端头缝隙阵列的幅度及相位

矩形波导尺寸为 $a \times b = 0.618\lambda \times 0.588\lambda$ 。波导端头的短路上刻的缝隙长度为 0.48λ , 厚度为 0.04λ 。

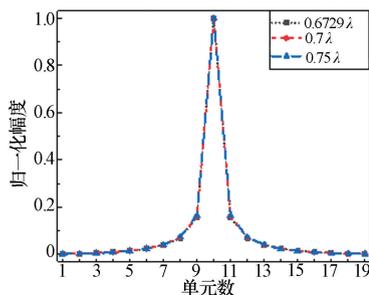
间距为 $d = 0.6729\lambda, 0.7\lambda$ 和 0.75λ , 激励幅度如图 4(a) 和图 4(b) 所示。同样从图中可以看到间距的变化对幅度的改变不明显, 两种不同的排列方式的耦合激励幅度的分布形状相似, 纵向排列阵列单元的耦合激励幅度低于平行排列单元的耦合激励幅度。

从图 4(c) 和图 4(d) 中可以看到而单元的耦合激励的相位分布则出现有趣的现象, 激励的是第 10 号单元, 当阵列单元(缝隙)纵向排列时相对于激励

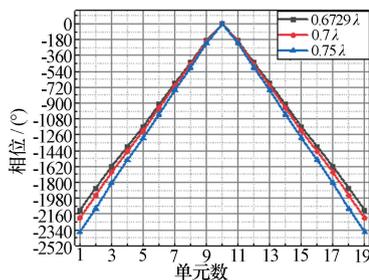
单元,临近的单元的相位连续滞后依次约 180° ,约等于 $-kd$,这是由单元间距造成的。当阵列单元平行排列时被激励的 10 号单元与最靠近的单元(第 9 号单元和第 11 号单元)的相位差不再可以利用距离估算,其相位差约 35° ,其它更远的单元的耦合激励相位在最靠近的单元的相位的基础上同样依次滞后约 180° 。



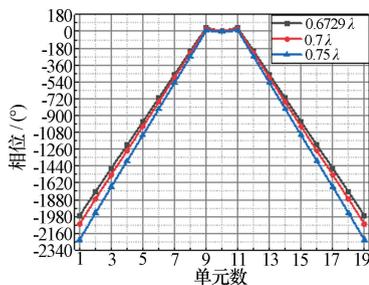
(a) 纵向排列缝隙阵列耦合激励幅度分布



(b) 平行排列缝隙阵列耦合激励幅度分布



(c) 纵向排列缝隙阵列耦合激励相位分布



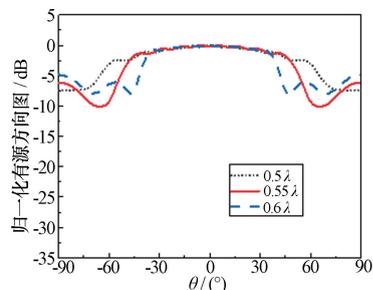
(d) 平行排列缝隙阵列耦合激励相位分布

图4 波导端头缝隙阵列的耦合激励系数

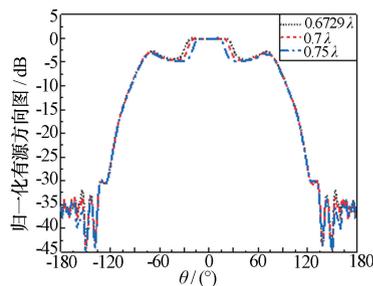
3 线阵的有源方向图

对于纵向线排列的对称振子阵列和纵向线排列的波导端头缝隙天线,他们都不存在盲点,体现在单元方向图上就是在阵列扫描的角域内单元方向图的

形状没有大的凹陷。而平行排列的对称振子阵列以及平行排列的缝隙阵列,则由于相互耦合的影响导致相控阵出现盲点,单元方向图出现凹坑^[1-2]。根据上节得到的耦合激励系数,计算了阵列的第 10 号单元(中心单元)的有源方向图,这里仅给出了平行排列情况下的单元方向图,如图 5。图 5(a)是 19 单元平行排列对称振子的第 10 号单元的有源方向图,存在明显的凹陷。图 5(b)是 19 单元平行排列缝隙阵列的第 10 号单元的有源方向图,同样存在显著的凹陷,而且单元间距越远,其凹陷出现的角度越靠近 0° 方向。



(a) 对称振子阵列中心单元 H 面有源方向图



(b) 波导端头缝隙阵列 E 面有源方向图

图5 19 阵元线阵中心单元有源方向图

结合耦合激励系数很容易发现阵列中第 10 号单元的有源方向图,如果出现凹陷,则其最临近的两个单元的耦合激励系数的相位与被激励单元的相位相差较小,仅有单元平行排列时才出现这种情况。这一现象造成相控阵天线出现了盲点,很明显耦合激励系数的幅度不会影响相控阵是否出现盲点。

4 总结

本文以对称振子以及波导端头缝隙为例分析了相控阵天线的耦合激励系数,计算了阵中单元的有源方向图,讨论了相控阵天线的盲点出现的原因。分别计算了两种单元形式组成的 19 单元线阵,包括纵向排列阵列和平行排列阵列两种情况。给出了两种单元形式的阵列中心单元被激励时阵列各单元的耦合激励系数的幅度和相位。利用耦合激励系数进一步分析了相控阵天线盲点产生的内在机理。

参 考 文 献

- [1] Amitay N, Galindo V, Wu C P. Theory and analysis of phased arrays[M]. New York: Wiley Interscience, 1972
- [2] 李建瀛. 有限单元相控阵天线研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 1999
Li J Y. Theory study on finite phased array antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 1999
- [3] Pozar D M. The active element pattern[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42 (8): 1176-1178
- [4] 束咸荣, 何炳发, 高铁. 相控阵雷达天线[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007
Shu X R, He B F, Gao T. Phased array radar antenna [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007
- [5] Munk B A, Talyor R, Durhurn T, et al. A low-profile broadband phased array antenna [A]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium [C], Columbus, USA, 2003. 448-451
- [6] Guo J L, Li J Y. Pattern synthesis of conformal array antenna in the presence of platform using differential evolution algorithm[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(9): 2615-2621
- [7] Bai J J, Liu Y H, Ren Y, et al. Efficient synthesis of linearly polarized shaped patterns using iterative FFT via vectorial least-square active element pattern expansion [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69: 6040-6045
- [8] Darwood P, Fletcher P N, Hilton G S. Mutual coupling compensation in small planar array antennas [J]. IEE Proceedings of Microwave and Antennas Propagation , 1998, 145(1): 1-6
- [9] You P, Liu Y, Huang X, et al. Efficient phase-only linear array synthesis including coupling effect by GA-FFT based on least-square active element pattern expansion method[J]. Electronics Letters, 2015, 51 (10): 791-792
- [10] Pozar D M. A relation between the active input impedance and the active element pattern of a phased array [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation , 2003, 51(9): 2486-2489



李建瀛 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 计算电磁学, 天线理论与工程设计, 电磁散射, 相控阵天线, 圆极化天线, 宽带天线阵列, 宽角扫描等。
E-mail: jianyingli@nwpu.edu.cn



于绪景 男, 1995 年生, 博士生。主要研究方向: 电磁场数值计算, 天线理论与工程设计, 相控阵天线, 反射面天线等。



张凌凯 男, 1997 年生, 博士生。主要研究方向: 天线理论与工程设计, 相控阵天线, 共口径天线阵等。