

渐变开槽天线阵列输入阻抗的矩量法分析

付云起, 袁乃昌

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 对 UHF 波段无限大渐变开槽阵列天线的输入阻抗进行了分析, 应用 Floquet 原理建立分析模型, 对天线阵列进行简化, 提取其中的一个单元进行分析, 并且根据单元的具体推导得到了合适的格林函数。同时结合矩量法进行数值仿真, 着重研究了开槽天线阵列作为相控阵应用时, 在频率和空间域上的扫描特性, 得到了数值计算结果, 给出了输入阻抗的曲线。结果证明, 渐变开槽天线本身具有宽带工作特性, 同时组成相控阵列时, 也可得到比较理想的宽带工作特性和比较大的空间扫描范围。

关键词 矩量法; 开槽天线; 输入阻抗; 相控阵

中图分类号 :TN821.8 文献标识码 :A

Input Impedance Analysis of Tapered Slot Antenna Arrays by the Moments Method

FU Yun-qi, YUAN Nai-chang

(Institute of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract In this paper, the input impedance of infinite arrays of UHF band tapered slot antennas (TSA) above a ground plane is analyzed. Only one array cell is extracted for numerical simulation by adopting the Floquet theorem. The Green's functions for the single element structure are easily obtained by partitioning the whole cell into three regions. Moments method is adopted in the numerical calculation. The scanning characteristics in the frequency and spatial domains as a phased array are studied. The curves of the input impedance of the array are given. The results prove that the TSA is an essential wideband antenna. When it is used in arrays, some good scanning characteristics in frequency and spatial domains can be achieved.

Keywords : Moments method; Tapered slot antenna; Input impedance; Phased array

1 引言

渐变开槽天线 (tapered slot antenna, TSA) 是一种印制天线, 它沿端向辐射, 在性能和应用方面具有很大的优势。TSA 阵列具有潜在的超宽带性能 (3:1) 或更高^[1], 因此广泛应用于航空、航天、舰船等领域。它可以形成共享口径, 完成诸如雷达、通信、导航等多种功能, 在焦平面成像系统中亦有很好的应用价值^[2,3]。实验表明, 通过改变天线的长度和开槽斜率, 其波瓣宽度可以达到成像系统的要求, 而且并不要求对单元的间距作如何改变。

开槽天线首先由 Lewis 在 1974 年提出^[4], 其模型是一个带线馈电的双开槽线, 在一个倍频程的范围内得到了小于 2 的驻波比。1979 年, Gibson 提出了 Vivaldi 天线结构^[5], 即指数渐变的开槽天线。单个开槽天线的辐射特性已经被深入地研究过, 比如 Janaswamy 和 Johansson 分别采用混合法和矩量法对线性渐变的开槽天线的远区方向图以及一些近场参

数进行了计算, 结果和实验测量的结果吻合得非常好, 另外还用不同的方法对天线的辐射特性进行了计算。但是以上的工作基本上是限于单个天线, 对于阵列来说, 忽略阵元之间的互耦效应来分析相控阵天线是不够确切的。到目前为止, 关于开槽天线阵列分析的文献还不是很多, D'Angleo 用混合二维有限元/边界元法分析了一个 8 元阵^[6], Catedra 采用共轭的梯度快速傅氏变换法分析了 4 元 Vivaldi 天线阵^[7]。

然而, 对于大型阵列并假设它们是周期的和无限大时, 就可能要对耦合作合理和精确的数值计算。现在采用得比较多的模型就是考虑无限大阵列结构, 然后应用 Floquet 原理提取一个单元作为分析计算区域, 可以大大提高计算效率。

本文即采用上述分析方法, 首先基于天线阵列的周期特性, 提取其中一个单元作为一个小室进行分析, 同时引入等效面的概念, 将一个单元小室分成两个区域, 从而可以比较方便地得到每个区域的格林函数表达式, 等效面上的等效激

励源展开时采用了 Floquet 形式的基函数,这样使广义阻抗矩阵的稀疏度大大提高,进而提高了计算效率,此种分析方法具有很强的扩展性。

2 天线结构及区域划分

TSA 阵列典型结构如图 1 所示,其开槽部分可以是等宽的,也可以是线性渐变或指数渐变的。基于此阵列天线在 X 和 Y 方向上的周期性,我们采用能够体现此种结构特点的格林函数+矩量法对其进行数值分析。一般地说,我们假定阵列为无限周期阵列,分析时只需要提取其中一个单元,其结构如图 2 所示。对于这种结构,其典型 Floquet 模式函数为

$$\mathcal{A}(r, r') = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} g_{mn} e^{-jU_m(x-x')} e^{-jV_n(y-y')} e^{-j\gamma_{mn}|z-z'|} \quad (1)$$

$$U_m = k_0 \sin \theta_0 \cos \phi_0 + \frac{2m\pi}{a}, V_n = k_0 \sin \theta_0 \sin \phi_0 + \frac{2n\pi}{b}$$

$$\gamma_{mn} = \sqrt{k_0^2 - U_m^2 - V_n^2}, k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

式中 (θ_0, ϕ_0) ——天线波束的空间扫描角。不难看出,当不同的电流之间的边界位于 z 为常数的平面上时(1)式是比较容易求解的,然而对于我们所讨论的此种结构形式的天线,因为天线是在 YZ 平面内,故在 $0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b$ 的空腔内, x 和 y 为自变量的模式函数将不再具有正交性。

为用矩量法进行数值分析,我们在 $z = d$ 处引入一个等效平面,如图 3 所示。同时采用在区域 1 内具有正交性的格林函数本征模式,这将有利于处理 Z 方向的电流源。等效面把所求解的问题划分为两个区域: $0 \leq z \leq d$ 平行板区域 1; $d \leq z$ 的自由空间区域 2,在 $z = 0$ 和 $z = d$ 处均是电壁。处理辐射散射问题,可以在问题解决后从等效面的数据求解。

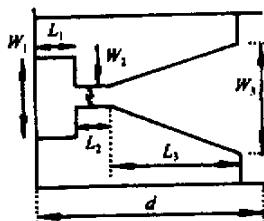


图 2 单个天线的几何尺寸

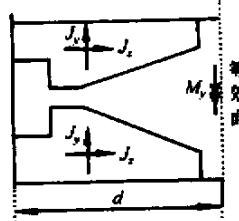


图 3 等效面及电流、磁流分布

3 求解公式

3.1 格林函数

对于此类结构的天线,所寻求的基于 Floquet 模式的格

林函数须满足下列条件。

- ① 在 Y 方向上具有周期性,并且在 $0 \leq y \leq b$ 上正交;
- ② 在 Z 方向上满足在 $0 \leq z \leq d$ 上正交;

X 方向上的特性暂时不考虑,将在公式推导过程中通过引入周期性的边界条件来满足。

从图 1 中可以看出,电流位于 $x = 0, \pm a, \pm 2a, \dots, y = y, z = z_0$ 。平行板区域内 Y 方向电流元所激励的场可以表示为 TM_x 模式,其磁矢量位函数为

$$A_y = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jV_n y} \sin\left(\frac{m\pi z}{a}\right) [A_{mn} e^{-j\beta_{mn} x} + B_{mn} e^{j\beta_{mn} x}] \quad (2)$$

其满足 $z = 0, z = d$ 处切向电场为零,亦体现了 Y 方向的周期性。另外在 X 方向上场分量须满足 $H(x=0) = H(x=a) e^{jU_0 a}$ 的周期性条件,由此可以得到展开系数

$$\begin{cases} A_{mn} = \frac{e^{jV_n y_0} \sin\left(\frac{m\pi z_0}{a}\right)}{jbd\beta_{mn}(1 - e^{-j\beta_{mn} a} e^{jU_0 a})} \\ B_{mn} = \frac{-e^{jV_n y_0} \sin\left(\frac{m\pi z_0}{a}\right)}{jbd\beta_{mn}(1 - e^{j\beta_{mn} a} e^{jU_0 a})} \end{cases} \quad (3)$$

同样对 Z 方向电流元, $z = d_{\pm}$ 处的磁流都是同样的。

3.2 矩阵元素的填充

用 J^y, J^z 分别检验金属表面的切向电场,电流展开时可以选择若干种不同的基函数,这里以脉冲基进行数值仿真

$$J^y = \sum_{i=1}^{P_y} c_i J_i^y \quad (4)$$

$$\text{其中 } J_i^y = \begin{cases} 1, & y \subset \Delta y_i \\ 0, & y \not\subset \Delta y_i \end{cases}$$

由某一个基电流激励起的场可以由前面得出的格林函数对激励区域积分得到。比如

$$Z_{yy, j} = \frac{1}{j\omega \epsilon_0} \sum_m \sum_n \left(k_0^2 - V_n^2 \right) [A_{mn}^0 + B_{mn}^0] \cdot \int \int e^{-jV_n y} \sin \frac{m\pi z}{d} dy dz \int \int e^{jV_n y_0} \sin \frac{m\pi z_0}{d} dy_0 dz_0 \quad (5)$$

$Z_{yy, j}$ 的意义是第 j 个基电流与第 i 个基的互阻抗。其它 Z_{yz}, Z_{zy}, Z_z 均可以类似得到。除了电流激励的电场之外, $z = d$ 处的磁流在金属表面也将激励起切向电场,前面已给出了对应的格林函数。

最后我们可以得到矩阵方程

$$\begin{bmatrix} Z_{yy} & Z_{zz} & Z_{zx} & Z_{zy} \\ Z_{yy} & Z_{zz} & Z_{yx} & 0 \\ T_{xy} & T_{xz} & Y_{xx} & Y_{xy} \\ 0 & T_{yz} & Y_{yx} & Y_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = [V] \quad (6)$$

列向量是待求的未知系数, V 代表的是激励项。在用矩量法进行求解时,需要对前面提到的位函数展开式进行截断,如果基函数选取得当,则可以大大减少展开项的数目。我们这里已经考虑到了电流的可能分布情况,所以可以提高计

算效率,所取的典型值为 $M = 71, N = 40$ 。然后求解此线性方程组,便可以得到贴片上的电流分布,从而进一步求出输入阻抗等参数。

4 数值结果

4.1 振子阵列模型

首先考虑振子阵列,建立简化的分析模型,如图 4 所示。振子宽度取得较小,仅有几十分之一个波长,因此电流只计及纵向的分量,在图 1 的坐标系中,即 y 方向。当然,本文中所讨论的方法对于具有 Z 方向电流的情况也是同样适用的。在求振子天线的输入阻抗时,我们采用比较简单的方法,即 $Z_{in} = V_i/J_i$, i 表示的是对应于激励电压的那段基。



图 4 振子激励模型

所考虑的是这样的阵列结构,其每一个单元所占的网格为 $a = b = 0.6\lambda$, $L_s = 0.25\lambda$, 对振子宽度分别为 0.3λ 和 0.45λ 两种情况进行了分析,所得到的输入阻抗的扫描特性在图 5 中给出。这也是作为振子天线阵列其扫描的一般特性,在很多文献中都有论述。从得到的结果来看,与文献[8]中所给的结果比较吻合,这可以说明我们采用的方法是有效的。

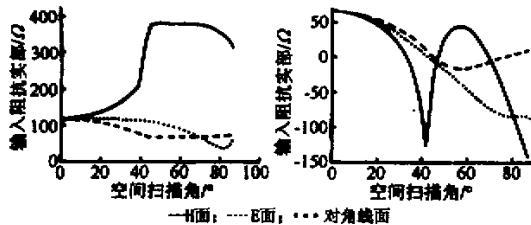


图 5 振子天线阵输入阻抗

4.2 TSA 阵列

从上一节可以看到,所采用的分析方法是有效的,下面将用该方法对开槽天线的特性进行分析,以期为天线阵列的设计提供一些基础的理解。单个天线的结构如图 2 所示,这属于线性渐变开槽天线(LTSA)。计算时激励源选为跨接的电压源形式。

由于我们所研究的天线工作在 UHF 频段(500MHz ~ 1GHz),所以对应的真空波长为 30cm(以频率高端计算),这样可以大致确定天线的尺寸。影响天线性能的因素主要是天线的长度以及天线的口径宽度。天线的口径宽度一般取 0.5 个波长,大约 15cm;长度大约 0.8 ~ 1.2 个波长,即 25cm ~ 36cm。所计算的天线输入阻抗的频率特性和在某个频率点的空间扫描特性如图 6 和图 7 所示。其中天线的两个方向的维度分别是 $a = 15\text{cm}$, $b = 15\text{cm}$ 。而等效口径面的位置一般取在距天线末端 0.25 ~ 0.5 个波长处。我们对下面的 3 种天线尺寸进行了数值计算(单位:cm)。

- ① 天线 1: $L_d = 15$, $W_{c1} = 5$, $W_{c2} = 0.2$, $W_{c3} = 12$, $L_1 = 3$, $L_2 = 1$, $L_3 = 23$
- ② 天线 2: $L_d = 15$, $W_{c1} = 5$, $W_{c2} = 0.2$, $W_{c3} = 9$, $L_1 = 3$, $L_2 = 1$, $L_3 = 23$
- ③ 天线 3: $L_d = 15$, $W_{c1} = 5$, $W_{c2} = 0.2$, $W_{c3} = 9$, $L_1 = 3$, $L_2 = 1$, $L_3 = 27$

可以看出,天线 1 是开口大且较短,天线 3 是开口大但比较长,天线 2 则是开口比较小。天线的输入阻抗的频率和空间扫描特性分别在图 6、图 7 中给出。

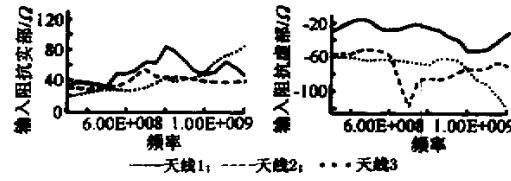


图 6 阻抗的频率特性

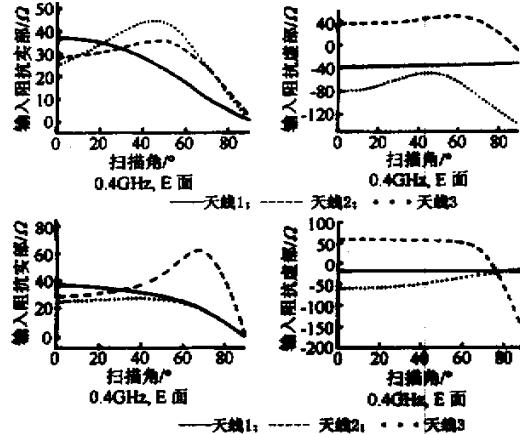


图 7 0.4GHz 时天线阵的空间扫描特性

从所得到的结果来看,天线 3 在整个频带内空间扫描特性都比较理想,几乎可达 60°以上。天线 2 的空间特性在频率低端比较好,但是在频率高端则性能变坏;天线 1 几乎在整个频率范围内都不够理想,无法达到空间扫描的要求,尤其是在频率的高端。对于 LTSA 天线阵列,较小的口径长度比(W_{c3}/L_3)将获得比较好的空间扫描性能,而针对工作频带所确定的天线单元的尺寸在保证有效辐射的前提下,口径长度比一般取为 0.3 左右较为适合。另外考虑天线的频率性能,可以发现天线 2 在频带内最为平缓,但和天线 1、天线 3 的差别并不是到了无法接受的程度,这亦是由于此种天线本身即具备宽带性能有关。特性影响天线性能的因素有很多,一般地说,可以通过数值仿真来研究它们对天线性能的影响,限于篇幅,本文不再过多叙述。

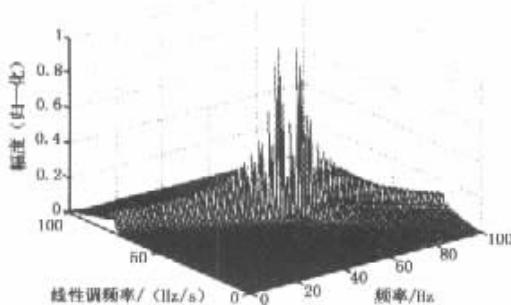


图 9 信号参数为 $k_1 = 55\text{Hz}$, $k_2 = 47\text{Hz/s}$ 的二步匹配傅里叶变换的三维谱

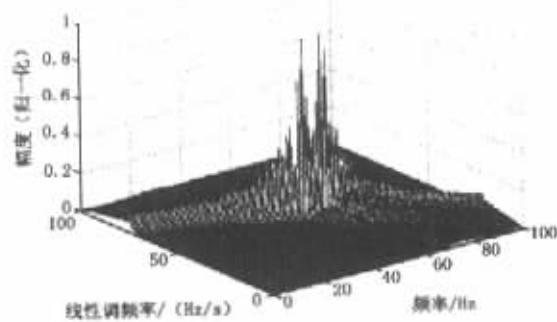


图 10 二阶匹配傅里叶变换的三维谱

参考文献：

- [1] Wang Shengli, Zhu Li. Changeable Sampling Processing for Chirp Signals in the SAR[C]. Fourth International Conference on Signal Processing, Beijing, 1998: 1473 - 1476.
- [2] 王盛利. 一种新的变换——匹配傅里叶变换[J]. 电子学报, 2001(3): 403 - 405.
- [3] Peebles, Peyton Z. Radar Principle[M]. John Wiley & Sons, Inc., 1998: 287 - 350.
- [4] Wehner, Donald R. High - Resolution Radar[M]. London: Artech House Boston, 1995: 239 - 339.
- [5] 黄顺吉, 赵志钦. 机载 SAR 运动目标的检测和成像处理[J]. 电子科技大学学报, 1995, 24(8): 161 - 165.
- [6] 王盛利. 一种改进变抽样率处理方法[J]. 信号处理, 1999, 15(4): 325 - 328.
- [7] 王盛利. 机载雷达从地杂波中检测运动目标[J]. 航空学报, 2000(5): 465 - 467.
- [8] 王盛利. 利用变采样率技术改进机载雷达的跟踪性能[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(8): 46 - 48.
- [9] 王盛利. 变抽样率处理技术检测反辐射导弹[J]. 电子对抗, 1999(1): 24 - 28.
- [10] 王盛利. 机载预警雷达应用变抽样率处理技术检测反辐射导弹[J]. 电子对抗, 1999(3): 54 - 60.

(上接第 28 页)

5 结论

本文利用矩量法分析了无限大渐变开槽阵列天线输入阻抗的频率和空间扫描特性, 将天线区域进行划分, 使计算

量减小, 同时在处理等效面上的磁流源时, 引用基于 Floquet 模的基函数展开。进行了部分数值仿真, 给出了辐射阻抗的扫描特性。

参考文献：

- [1] Armitage J L. Electronic Warfare Solid - State Phased Array[J]. Microwave Journal, 1986(2): 109.
- [2] Yngvesson K S. MMW Radio - Astronomical Imaging Instrumentation[J]. Microwave System News, 1988(12): 74 - 82.
- [3] Chang J, Scharbert D H, Yngvesson K S, et al. 32GHz Power Combining TSA Array with Limited Sector Scanning[C]. IEEE Antenna and Propagation Symp. Digest, Dallas, Tx, 1990(5): 1150 - 1153.
- [4] Lewis L R, Fassett M, Hunt J. A Broadband Stripline Array Element[C]. IEEE Antenna and Propagation Symp., 1974(5): 335 - 337.
- [5] Gibson P J. The Vivaldi Aerial[C]. 9th European Microwave Conference, Brighton, U K, 1979: 101 - 105.
- [6] D'anglo Povinelli M J, Palmo M A. Hybrid Finite Element/Boundary Element Analysis of a Stripline Notch Array[C]. IEEE Antenna and Propagation Symp., 1988(5): 1126 - 1129.
- [7] Catedra M F, Alcraz J A, Arredondo J C. Analysis of Arrays of Vivladi and TSA Antennas[C]. IEEE Antenna and Propagation Symp., 1989(5): 122 - 125.
- [8] Stark L. Radiation Impedance of a Dipole in an Infinite Planar Phased Array[J]. Radio Sci., 1966(3): 361 - 377.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>