

单口多模馈源单脉冲雷达天线差波束的仿真方法

庄建楼

(中国空间技术研究院, 北京 100094)

fonx@sina.com

摘要: 单口多模单脉冲馈源差波束可以等效为两个相位中心不重合、反相的波束的叠加, 本文采用口径积分法计算半口径的幅度方向图和相位方向图, 进而使用对相位方向图求导的方法得出了相位中心偏移量的解析解, 并把模拟的差波束与 HFSS 仿真结果、天线差波束仿真结果与实测结果作了对比, 表明对差波束的模拟方法是有效的。

关键词: 单脉冲 多模 口径积分 相位中心

the Simulation of Delta Beams for a Monopulse Antenna with a Multimode single Aperture Horn Feed

ZHUANG jianlou

(CAST, Beijing 100094)

Abstract: In this paper, a new method is given to simulate the delta beams of a monopulse antenna fed by a single aperture rectangular horn works under multimode condition. Because a delta beam could be equivalent to 2 identical beams in antiphase put on 2 defocused points, the phase pattern of half aperture of the rectangular horn is calculated by AI (Aperture Integral) approach, and then its phase center is deduced by differential technology. Finally, the simulation results are compared with HFSS and test results, which shows the efficiency of this simulation method.

Keywords: Monopulse; Multimode; AI; Aperture Integral; Phase Center

1 引言

单脉冲雷达天线可形成和、差波束, 用来测定目标的距离和方位, 一般采用正馈的 Cassegrain 天线形式, 其馈源本身即能够产生和、差初级照射波束。

对于馈源是单口多模喇叭的情况, 要计算天线的次级差方向图, 通常要采用 PO 方法, 即从喇叭口径场开始依次计算出天线副反、主反上的面电流分布, 最终得出辐射场^[1], 这种方法是相当费力的。

由于初级差波束可等效为两个相同、反相、偏焦的子波束的叠加, 所以只要知道了子波束的形状和偏焦量, 就可以采用通常的 GO-AI 方法来计算天线的次级差波束, 从而使计算量大大减少。子波束是由半口径辐射形成的, 而计算半口径的辐射场, 是 HFSS 等仿真软件难以实现的, 只有借助口径积分 (AI) 方法, 才能精确计算半口径的辐射场, 并且由于辐射场的表达式是解析的, 进而可以采用对相位方向图求导的方法来计算半口径辐射场等效相位

中心的位置。

本文采用把差波束分解为两个子波束的方法对某雷达天线馈源初级差波束进行了模拟, 并在此基础上结合 GO-AI 方法对天线次级差波束进行了仿真计算。通过本文方法与 HFSS 的仿真结果、实测结果的对比, 表明该方法是有用的。

2 馈源差波束的模拟

馈源差波束的模拟, 就是把馈源的差波束分解成两个子波束, 这里包括两部分计算, 一是计算子波束的相位中心位置, 二是计算子波束的 E 面、H 面方向图形状。

角锥喇叭辐射场的计算, 已经有相当精确的积分公式^[2], 只需要知道喇叭口径面上电场的幅度相位分布就足够了。

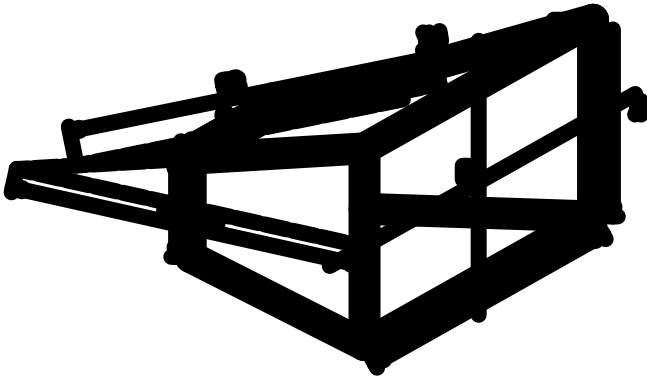


图1 角锥喇叭的几何参数

2.1 差波束的分解

设角锥喇叭几何尺寸如图1, 形成H面差波束时, 喇叭口径面上电场幅度分布近似为TE₂₀模(图2), 等相面近似为球面:

$$E_{TE20}^V = \hat{y} \sin \frac{2\pi x}{A} e^{-jk \frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{R_1} + \frac{y^2}{R_2} \right)} \quad (1)$$

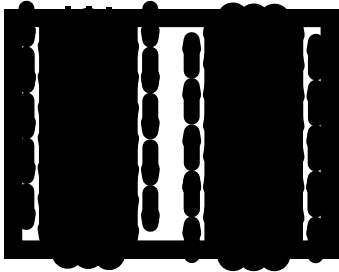


图2 H面差波束 TE₂₀模

形成E面差波束时, 喇叭口径面上电场幅度分布由TE₁₁模和TM₁₁模合成, 两者的比例恰好可以消除电场的x分量, 近似为EM₁₁模(图3), 等相位面也近似为球面:

$$E_{EM11}^V = \hat{y} \cos \frac{\pi x}{A} \sin \frac{\pi y}{B} e^{-jk \frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{R_1} + \frac{y^2}{R_2} \right)} \quad (2)$$

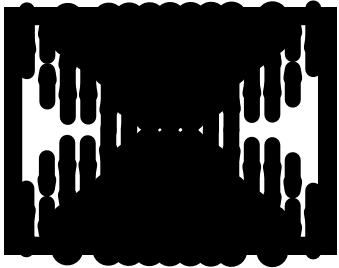


图3 E面差波束 EM₁₁模

在全部口径面上对口径电场分布积分, 就可以得出H面差波束方向图和E面差波束方向图, 并且两者可以写成统一的数学形式:

$$F(\theta) = (1 + \cos \theta) \int_{-W/2}^{W/2} \sin \frac{n\pi x}{W} e^{-jk \frac{x^2}{2R}} e^{jkx \sin \theta} dx \quad (2)$$

当 $W = A, R = R_1, n = 2$ 时, 上式代表H面差波束方向图, 当 $W = B, R = R_2, n = 1$ 时, 上式代表E面差波束方向图。注意到上面的积分可以改写成两个在半口径上积分的叠加, 并且可以简化成下面的形式:

$$F(\theta) = f(-\theta) e^{j\pi} + f(\theta) \quad (3)$$

其中:

$$f(\theta) = (1 + \cos \theta) \int_0^{W/2} \sin \frac{n\pi x}{W} e^{-jk \frac{x^2}{2R}} e^{jkx \sin \theta} dx \quad (4)$$

$$= g(\theta) e^{jp(\theta)}$$

因此可以把差波束等效为两个子波束的叠加。再做进一步合理的近似, 即子波束幅度方向图 $g(\cdot)$ 是关于 θ 的偶函数, 而相位方向图 $p(\cdot)$ 是关于 θ 的奇函数, 这隐含了子波束本身对称、相位中心关于口径面中心对称的假设条件。于是:

$$F(\theta) = g(\theta) e^{j\pi} e^{-jp(\theta)} + g(\theta) e^{jp(\theta)} \quad (5)$$

这清楚地表明, 差波束方向图可以用两个幅度完全相同、相位相反、相位中心不重合的子波束来等效。

2.2 相位中心的计算

子波束相位中心位置可以通过其相位方向图 $p(\cdot)$ 获得。 $p(\cdot)$ 可如下计算:

$$p(\theta) = \arctan \frac{\text{Im}(f(\theta))}{\text{Re}(f(\theta))} - p_0 \quad (6)$$

其中 p_0 是一个使 $p(0) = 0$ 的常数, 这反映了相位是一个相对量。设相位中心偏离坐标原点 d , 于是有:

$$kd \sin \theta = p(\theta) \quad (7)$$

从上式可看出, d 是 θ 的函数:

$$d(\theta) = \frac{p(\theta)}{k \sin \theta} \quad (8)$$

由于 $p(\cdot)$ 的表达式相当复杂, 因此难以直接应用(9)来求解 d 。基于相位中心的概念, 假设子波束相位中心在包含 z 轴方向在内的一个小的观察角域内是恒定的, 因此有:

$$d = d(0) = \frac{1}{k} \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{p(\theta)}{\sin \theta} \quad (9)$$

而当 $\theta \rightarrow 0$ 时, $\sin \theta$ 和 θ 是同阶小量, 因此求 d 最终转化为求 $p(\theta)$ 在 $\theta = 0$ 处的导数:

$$d = \frac{1}{k} \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{p(\theta)}{\theta} = \frac{1}{k} p'(0) \quad (10)$$

经过冗长的微分、积分运算, 最终得到:

$$d = \frac{K_1 I_2 - K_2 I_1}{I_1^2 + I_2^2} + K \frac{I_1 I_4 - I_3 I_2}{I_1^2 + I_2^2} \quad (11)$$

其中, $I_1 \sim I_4$ 可以用 Fresnel (菲涅耳) 函数来表示:

$$\begin{cases} I_1 = -K_3 (C(v_1) - 2C(v_0) - C(u_1)) \\ \quad - K_4 (S(v_1) - 2S(v_0) - S(u_1)) \\ I_2 = K_3 (S(v_1) - 2S(v_0) - S(u_1)) \\ \quad - K_4 (C(v_1) - 2C(v_0) - C(u_1)) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} I_3 = K_3 (S(v_1) + S(u_1)) \\ \quad - K_4 (C(v_1) + C(u_1)) \\ I_4 = K_3 (C(v_1) + C(u_1)) \\ \quad + K_4 (S(v_1) + S(u_1)) \end{cases} \quad (13)$$

涉及的系数如下 (给定已知量 k 、 W 、 R 、 n):

$$K = \frac{n\pi R}{Wk} \quad (14)$$

$$\begin{cases} K_1 = \frac{R}{k} \sin \frac{kW^2}{8R} \sin \frac{n\pi}{2} \\ K_2 = \frac{R}{k} \cos \frac{kW^2}{8R} \sin \frac{n\pi}{2} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} K_3 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi R}{k}} \cos \frac{Rn^2\pi^2}{2kW^2} \\ K_4 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi R}{k}} \sin \frac{Rn^2\pi^2}{2kW^2} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} u_0 = -\frac{n}{W} \sqrt{\frac{\pi R}{k}} \\ u_1 = u_0 - \frac{n}{2u_0} \end{cases} \begin{cases} v_0 = -u_0 \\ v_1 = u_1 - 2u_0 \end{cases} \quad (17)$$

特别当 $n = 2$ 时, 即对应 H 面差波束的情况, $K_1 = K_2 = 0$, 上述结果有较为简洁的形式:

$$d_x = \frac{\lambda R_1}{A} \frac{I_5}{I_6} \quad (18)$$

$$\begin{cases} I_5 = -C^2(v_1) + C^2(u_1) \\ \quad - S^2(v_1) + S^2(u_1) \\ I_6 = (C(v_1) - 2C(v_0) - C(u_1))^2 \\ \quad + (S(v_1) - 2S(v_0) - S(u_1))^2 \end{cases} \quad (19)$$

2.3 子波束的幅度方向图

子波束的幅度方向图更容易通过半口径的辐射积分获得, H 面差波束、E 面差波束的 H 面和 E 面方向图分别为:

$$f_{Hh}(\theta) = (1 + \cos \theta) \int_{-d_x}^{A/2-d_x} \sin \frac{2\pi(x-d_x)}{A} e^{-jk\frac{1}{2} \frac{x^2}{R_1}} e^{jkx \sin \theta} dx \quad (20)$$

$$f_{He}(\theta) = (1 + \cos \theta) \int_{-B/2}^{B/2} e^{-jk\frac{1}{2} \frac{y^2}{R_2}} e^{jky \sin \theta} dy \quad (21)$$

$$f_{Eh}(\theta) = (1 + \cos \theta) \int_{-A/2}^{A/2} e^{-jk\frac{1}{2} \frac{x^2}{R_1}} e^{jkx \sin \theta} dx \quad (22)$$

$$f_{Ee}(\theta) = (1 + \cos \theta) \int_{-d_y}^{B/2-d_y} \sin \frac{\pi(y-d_y)}{B} e^{-jk\frac{1}{2} \frac{y^2}{R_2}} e^{jky \sin \theta} dy \quad (23)$$

3 方法验证

一个典型角锥喇叭尺寸如下: $A = 47.5\text{mm}$, $B = 35\text{mm}$, $R_1 = 174.5\text{mm}$, $R_2 = 178\text{mm}$, 工作频率 13.5GHz 。按照式(12)和(19)计算其差波束的等效相位中心, 位置如图4所示。

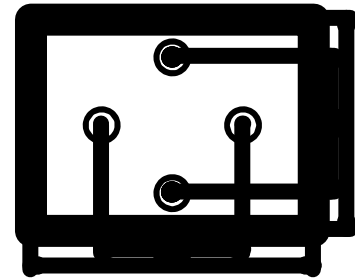


图 1 差波束相位中心位置示意图 (●: H 面差波束相位中心, •: E 面差波束相位中心)

为了验证以上的结论，按照式(21)-(24)分别计算H面、E面差波束子波束的方向图，然后按式(6)叠加，得出的结果与HFSS使用FEM方法计算出来的数值结果十分吻合，见图5~图8。将上述结果结合GO-AI方法，对雷达天线次级差波束进行了计算，也得出了和PO方法、实测相吻合的结果，见图9和图10。

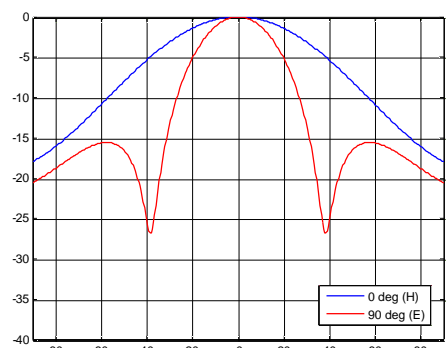


图 5 H 面差波束的子波束形状

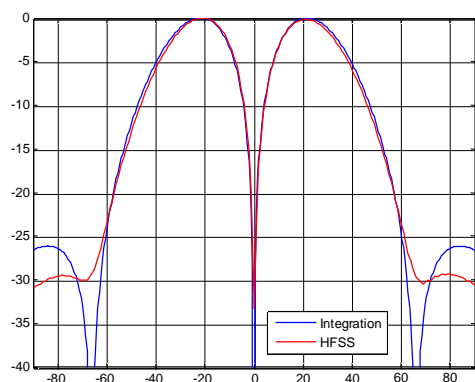


图 2 H 面差波束模拟效果

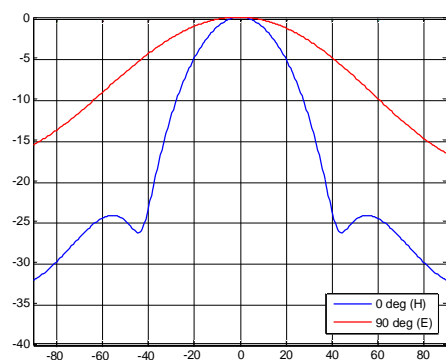


图 6 E 面差波束的子波束形状

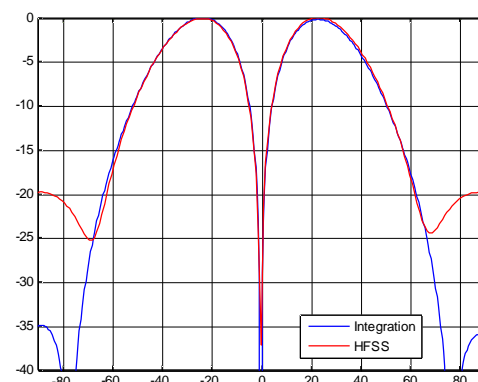


图 8 E 面差波束模拟效果

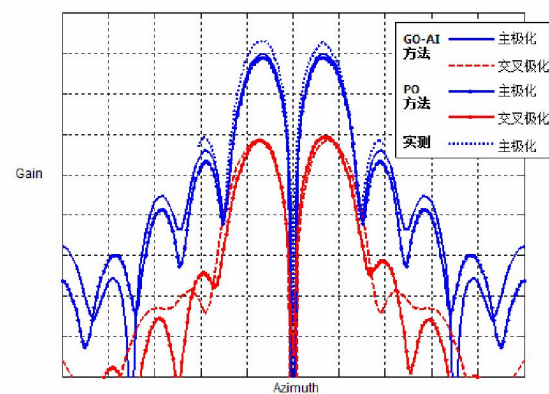


图 9 天线 H 面差波束对比

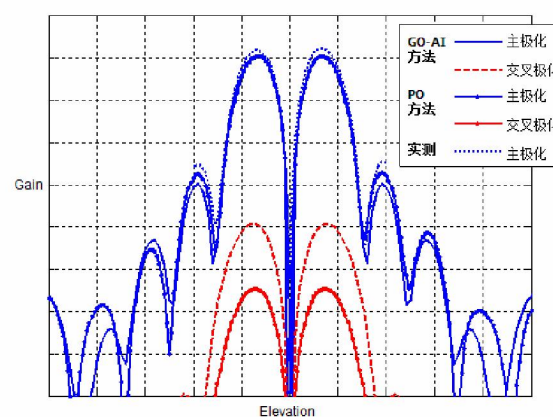


图 10 天线 E 面差波束对比

4 结论

目前在计算电大尺寸的反射面天线的方向图时，GO-AI方法仍然是一种快捷的方法，但仅适用于馈源具有确定相位中心的情况。单口多模馈源的差波束虽然从整体来看没有确定的相心，但是在等效为两个子波束反相叠加后，就可以直接应用于已有的成熟的GO-AI方法，简化了计算，提高了效率。本文方法和HFSS的仿真结果、实测结果的对比表

明，这种方法是有效的。

参考文献

- [1] Jingxiong Chen, Yansheng Xu, Analysis and Calculation of Radiation Patterns of Cassegrain Antennas, IEEE A.P. Trans. Vol. 38, No. 6, June 1990.
- [2] 魏文元，宫德明，陈必森．天线原理[M]．第一版．北京：国防工业出版社，1985 年 6 月：p213

作者简介：庄建楼(1978-)，男，硕士，主要研究领域为反射面天线和馈源设计。

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,一直致力和专注于微波、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>