

电磁场的空间相干性对均匀多波束影响研究

王建, 王永根, 谢渊, 徐风清, 张云祥

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】多波束反射面天线是无源毫米波成像系统接收前端, 通过对均匀多波束抛物反射面天线的计算和分析, 发现由于电磁场的空间相干性的存在, 当馈源间距较小时多馈源抛物反射面天线得不到多个波束而是一个相干波束。电磁场的空间相干性影响到波束间的均匀性和成像质量, 通过增加相邻馈源间距, 电磁场的空间相干影响减小, 独立波束开始出现, 该结论能够指导多波束反射面天线的馈源阵排列。用FEKO软件对多馈源反射面天线的仿真结果可以证明结论的正确性。

关键词 相干波束; 多波束; 无缘毫米波成像; 空间相干

中图分类号 TM15

文献标识码 A

doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2009.02.13

Spatial Coherence Effect on Uniform Multi-Beam

WANG Jian, WANG Yong-gen, XIE Yuan, XU Feng-qing, and ZHANG Yun-xiang

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The multi-beam reflector antenna is the front-end receiver of the passive imaging system. Due to spatial coherence effect of electromagnetic field, the uniform multi-beam parabolic reflector antenna is analyzed. The calculated results show that the beam generated by a multi-feeds parabolic reflector antenna is a coherent beam not a multi-beam when the distance of feeds reduced. It is proved that the effect of spatial coherence will reduce and the independent beam will arise when the distance of feeds is increased. The analysis is validated by FEKO soft.

Key words coherent beam; multiple beams; passive imaging system; spatial coherence

多波束体制是目前无源毫米波实时成像技术的主要发展方向, 采用多波束技术^[1-5], 多个接收通道并行工作, 无需大量的后期信号处理, 可实现实时成像。对于无源毫米波实时成像而言, 多波束天线的性能直接影响到毫米波无源实时成像系统的图像质量, 因此, 高质量无源实时成像要求多波束天线具有窄波束、高增益、高效率、低副瓣, 并要求波束密集排列(堆积多波束), 且保持良好的均匀性。均匀多波束反射面天线是无源毫米波实时成像系统的一种, 也是无源毫米波实时成像的关键技术之一。空间相干性研究主要集中在SAR领域^[6-7], 在多波束成像领域研究还较少。

为得到高质量的实时成像, 要求多波束堆积排列, 即要求馈源阵单元密集排列。但当馈源密集排列时, 用馈源阵照射反射面, 由于存在电磁场的空间相干性, 馈源阵反射面天线得不到多个独立波束, 而是一个相干波束, 对成像的空间分辨率造成了很

大影响。为减少电磁场的空间相干性对成像质量的影响^[8], 同时得到堆积多波束, 馈源间距应有一个最佳值。

1 偏置反射面天线远区辐射场计算

1.1 面电流法求反射面远区场

在用馈源阵照射反射面时, 为避免馈源阵的遮挡效应而采用偏置形式, 如图1所示。反射面所在坐标系为 (x, y, z) , 反射面的焦点和坐标原点重叠, 馈源阵所在坐标系为 (x', y', z') 。

图中 f 为反射面的焦距, ψ_1 为反射面下边缘对坐标原点 O 的张角, ψ_2 为反射面上边缘对坐标原点 O 的张角, ψ_x 为坐标轴 z 和 z' 之间的夹角。 ρ_1 为反射面下边缘到焦点的距离, ρ_2 为反射面上边缘到焦点的距离, R 为反射面上任意一点到远区观察点的距离, r 为坐标原点到同一远区观察点的距离, r' 为坐标原点到反射面上任意一点的距离。反射面在 xy' 平面

的投影为一个圆, 其直径为 D 。

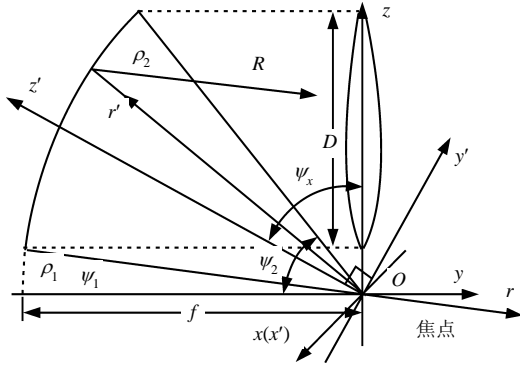


图1 偏置反射面坐标示意图
两坐标轴之间的关系为^[9]:

$$\begin{cases} x' = x \\ y' = y \cos \psi_x + z \sin \psi_x \\ z' = -y \sin \psi_x + z \cos \psi_x \end{cases} \quad (1)$$

矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi_x & \sin \psi_x \\ 0 & -\sin \psi_x & \cos \psi_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

反射面的等效面电流为 $\mathbf{J} = 2\hat{n} \times \mathbf{H}^i$, 其中 \mathbf{H}^i 为反射面的入射场; \hat{n} 为反射面单位法线。只要求得反射面的初级场, 代入上式即可得到反射面的面电流, 对电流进行面积分又可得到反射面远区场^[10]:

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iint 2\hat{n} \times (\mathbf{H}^i e^{-jkr} / R) ds \\ \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 反射面初级场分析

初级辐射场的分析在馈源坐标系中进行, 馈源单元选用微张喇叭, 其结构如图2所示。

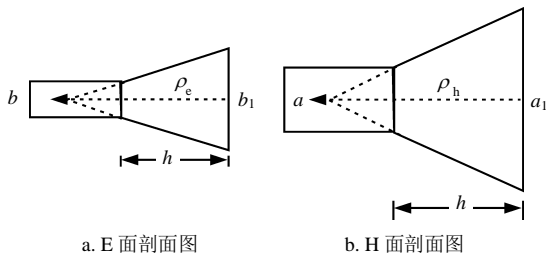


图2 馈源喇叭剖面示意图

图2中 a 为波导口的宽边, b 为波导口的窄边, a_1 为喇叭口的宽边, b_1 为喇叭口的窄边, ρ_e 为喇叭口面中心到喇叭E面虚顶的距离, ρ_h 为喇叭口面中心到喇叭H面虚顶的距离, h 为喇叭口的长度, 喇叭的E面和H面半张角都为 10° 。

用3个微张喇叭构成一个直线阵列作为反射面的初级辐射场, 如图3所示。图中 d 为相邻喇叭口的

中心间距, $P(x', y', z')$ 为馈源直线阵的远区观察点, R_1 、 R_2 、 R_3 分别为喇叭口1、2、3上任意一点到 P 点的距离, r'_1 、 r'_2 、 r'_3 分别表示喇叭口1、2、3上任意一点到坐标原点的距离, r 表示坐标原点到 P 点的距离。

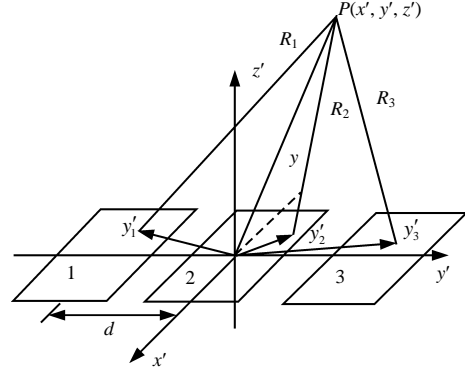


图3 三馈源阵坐标示意图

采用口径场法得到馈源阵的远区辐射磁场^[10], 也就是反射面的入射场。令 η 为空间波阻抗, 馈源阵的远区辐射磁场表达为:

$$\begin{cases} H_r^i = 0 \\ H_\theta^i = -jkE_0 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r \eta} I_1 I_2 \cos \varphi f(\varphi, \theta) \\ H_\phi^i = jkE_0 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r \eta} I_1 I_2 \sin \varphi f(\varphi, \theta) \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$f(\varphi, \theta) = (\cos \theta + 1)(1 + 2 \cos(kd \sin \theta \sin \varphi))$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{\pi \rho_e}{k}} e^{j\left(\frac{k_y^2 \rho_e}{2k}\right)} g(t_1, t_2)$$

$$g(t_1, t_2) = [C(t_2) - C(t_1)] - j[S(t_2) - S(t_1)]$$

式中 $C(x)$ 和 $S(x)$ 分别为余弦和正弦菲涅耳积分, 且有:

$$C(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt$$

$$S(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt$$

$$t_1 = \frac{1}{\sqrt{\pi k \rho_e}} \left(-\frac{kb_1}{2} - k_y \rho_e \right)$$

$$t_2 = \frac{1}{\sqrt{\pi k \rho_e}} \left(\frac{kb_1}{2} - k_y \rho_e \right)$$

式中 $k_y = k \sin \theta' \sin \varphi'$, 且:

$$I_2 = I'_2 + I''_2$$

$$I_2' = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi \rho_h}{k}} e^{j \left(\frac{k_x'^2 \rho_h}{2k} \right)} g(t_1', t_2')$$

$$I_2'' = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi \rho_h}{k}} e^{j \left(\frac{k_x''^2 \rho_h}{2k} \right)} g(t_1'', t_2'')$$

$$t_1' = \frac{1}{\sqrt{\pi k \rho_h}} \left(-\frac{ka_1}{2} - k_x' \rho_h \right)$$

$$t_2' = \frac{1}{\sqrt{\pi k \rho_h}} \left(\frac{ka_1}{2} - k_x' \rho_h \right)$$

$$t_1'' = \frac{1}{\sqrt{\pi k \rho_h}} \left(-\frac{ka_1}{2} - k_x'' \rho_h \right)$$

$$t_2'' = \frac{1}{\sqrt{\pi k \rho_h}} \left(\frac{ka_1}{2} - k_x'' \rho_h \right)$$

$$k_x' = k \sin \theta' \cos \varphi' + \frac{\pi}{a_1}$$

$$k_x'' = k \sin \theta' \cos \varphi' - \frac{\pi}{a_1}$$

将得到的反射面的初级场代入式(4)积分, 可得到反射面的远区场。

2 偏置反射面天线仿真建模

用Ansys公司的FEKO软件对反射面天线进行建模仿真, FEKO软件的核心是基于矩量法, 对于电大尺寸, 同时结合物理光学法进行仿真。在用FEKO仿真反射面天线时, 馈源阵用矩量法, 反射面用物理光学法进行仿真计算, 仿真尺寸和理论分析尺寸都完全一致。仿真模型如图4所示。

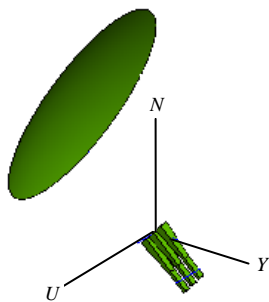


图4 直线馈源阵反射面天线FEKO仿真模型

反射面为旋转对称抛物面的一部分, 其口径面在UN平面内为一个圆, 馈源垂直极化, 中心馈源的等效相位中心^[11]和反射面的焦点重叠。改变馈源间距, 得到不同间距的反射面远区方向图。

3 计算结果

反射面焦距 $f = 50 \text{ mm}$, 反射面投影口面直径 $D_0 = 80.4 \text{ mm}$, $\psi_1 = 4^\circ$, $\psi_2 = 80^\circ$, 反射面张角 $\psi_{\text{op}} = 76^\circ$; 喇叭口径 $a_1 = 3.91 \text{ mm}$, $b_1 = 3.27 \text{ mm}$,

喇叭长度的 $h = 15 \text{ mm}$, 工作频率 $f_0 = 94 \text{ GHz}$ 。由于馈源阵为线阵, 馈源阵照射反射面后只在E面方向图为多波束, 下面主要讨论空间相干性对E面方向图的影响。

当用单馈源照射反射面时, 其放置位置和馈源阵对应单元位置相同, 3个不同的馈源位置得到3个波束, 如图5所示。其中馈源的位置中心间距 $d = 1.33\lambda$, λ 为天线的工作波长。

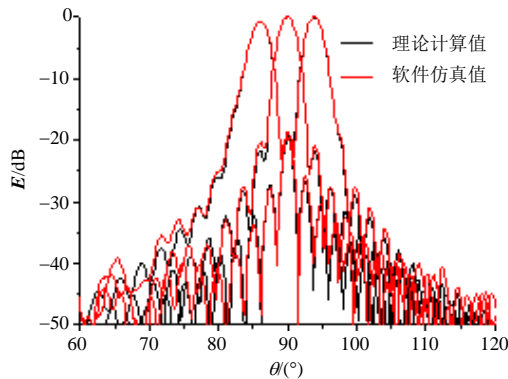


图5 单馈源偏馈反射面E面方向图

当直线馈源阵照射反射面时, 馈源间距 $d = 1.33\lambda$, 反射面天线得到一相干波束, 如图6所示。

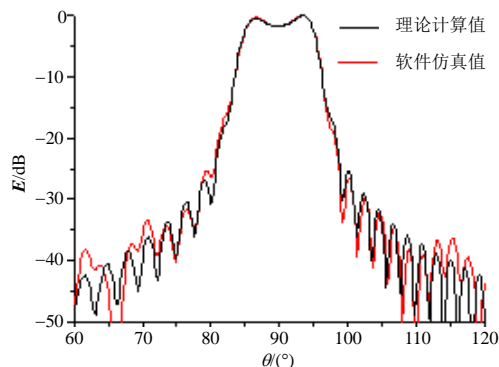


图6 相干波束E面方向图(馈源间距 $d = 1.33\lambda$)

从图6可以看出, $3WH$ 馈源阵列反射面天线的方向图并没有出现3个分裂的波束, 而是一个较平坦的R波束。增加馈源间距, 使 $d = 1.49\lambda$ 时, 得到方向图, 如图7所示。

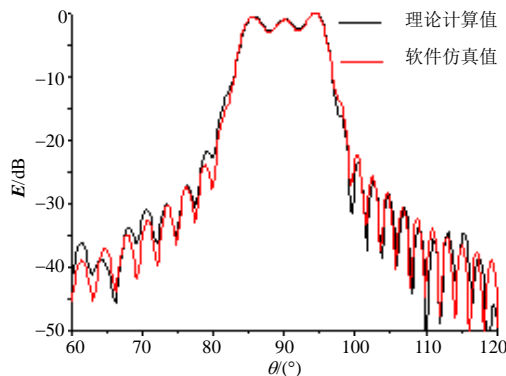


图7 相干波束E面方向图(馈源间距 $d = 1.49\lambda$)

从图7中,可以看出,随着馈源间距的增大,3个馈源阵列反射面天线的方向图开始分裂并出现3个波峰。当馈源间距 $d=1.65\lambda$ 时,得到的方向图,如图8所示。

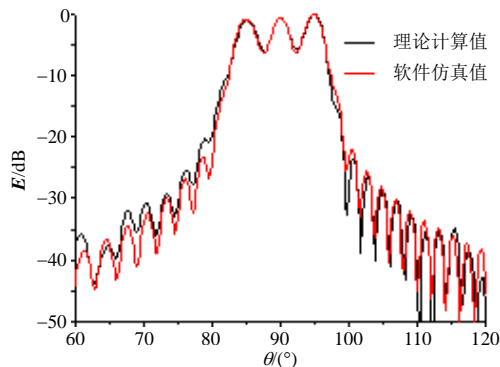


图8 反射面相干波束E面方向图(馈源间距 $d=1.65\lambda$)

从图8中可以看出,当馈源单元间距较大时,3个馈源阵列反射面天线的方向图出现3个明显的波峰,空间相干性对波束形成的影响减小。

4 结束语

由于电磁场的空间相干性的存在,当馈源间距较小时,多馈源抛物反射面天线得不到多个波束,而是一个相干波束;增加馈源间距,馈源阵反射面天线的主波束开始分裂,得到一组比较明显的多波束,说明增大馈源间距可以避免相干波束的形成。对于本文给出的结构尺寸,当馈源间距 $d=1.65\lambda$ 时,空间相干性影响已经很小。

参 考 文 献

- [1] GOLDSMITH P F, HSIEH C T, HUGUENIN G R, et al. Focal plane imaging systems for millimeter wavelengths[J]. IEEE Trans MTT, 1993, 41(10): 1664-1675.
- [2] 章 勇, 李兴国, 王华力. 毫米波焦平面阵列成像技术[J]. 制导与引信, 1998, 19(3): 38-41.
ZHANG Yong, LI Xing-guo, WANG Hua-li. MMW FPA imaging technique[J]. Guidance & Fuze, 1998, 19(3): 38-41.
- [3] LETTINGTON A H, BLANKSON L M, ATTIA MF, et al. Review of imaging architecture[J]. SPIE, 2002, (4719): 327-340.
- [4] 钱嵩松, 李兴国. 被动毫米波成像综述[J]. 制导与引信, 2003, 24(4): 29-36.
QIAN Song-song, LI Xing-guo. Overview of passive millimeter wave image[J]. Guidance & Fuze, 2003, 24(4): 29-36.
- [5] GORISHNYAK V, DENISOV A Kuzmin s, 8 mm passive imaging system with 32 sensors[C]//European Radar Conference 2004. Amstcrdam: [s. n.], 2004: 333-336.
- [6] TOUZI R, LOPES A, BRUNIQUE J, VACHON P WM, et al. Coherence estimation for SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(1): 135-149.
- [7] ABDELFAH R, NICOLAS J M. Interferometric SAR coherence magnitude estimation using second kind statistics[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(7): 1942-1953.
- [8] BLANCHARD P M, GREENAWAY A H, HARVEY A R, et al. Coherent optical beam forming with passive millimeter-wave arrays[J]. Journal of Lightwave Tchenology, 1999, 17(3): 418-425.
- [9] 杨可忠, 杨智友, 章日荣. 现代面天线新技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1993.
YANG Ke-zhong, YANG Zhi-you, ZHANG Ri-rong. Modern aperture antenna technology[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 1993.
- [10] BALANIS C A. Antenna theory-analysis and design[M]. Second Edition. New York: John Wiley & Sons INC, 1997.
- [11] WANG Y G, WANG J, ZHAO Z Q, et al. A novel method to calculate the phase center of antennas[J]. J of Electromagn Waves and Appl, 2008, 22(2): 239-250.

编辑 熊思亮