收发分离偏馈单反射面紧缩场静区评估方法

王 辉 白 明 赵 鑫 苗俊刚

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 根据 Lorentz 互易定理,提出了一种对收发分离偏馈单反射面紧缩场静区评估的方法. 两个馈源与反射面分别构成独立的、互为测量关系的天线系统,在相同静区位置构成各自的天线口面. 对这两个等效天线系统在该平面产生的电磁场进行测试,得到收发系统在静区位置各自的电磁特性. 根据收发天线各自的电磁场分布,按照天线接收原理可以得到双站合成的等效静区. 双站等效静区呈对称分布,但相对于单站静区分布,双站等效静区范围变小,波动更小,边缘下降更平缓. 采用物理光学法对上述等效静区进行了仿真,并进一步通过实验测试对此静区评估方法的有效性进行了验证.

关 键 词: 天线; 电磁场; 物理光学

中图分类号: TN 820

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)08-0953-04

Quiet zone evaluation method for offset single reflector CATR of separated transmitting-receiving feeds

Wang Hui Bai Ming Zhao Xin Miao Jungang

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the Lorentz reciprocity theorem, an evaluation method was proposed for the quiet zone of offset single reflector compact antenna test range (CATR) with separated transmitting-receiving feeds. Two feeds and reflector compose two separate and measured-mutually antenna systems, and there are two antenna apertures in the same quiet zone position. The electromagnetic characteristics of transmitting-receiving systems can be obtained respectively after the electromagnetic fields in the plane of two equal antenna systems were tested. The equal quiet zone fields can be obtained based on antenna acceptance theorem by transmitting-receiving antennas respective electromagnetic fields. The bistatic equal quiet zone is symmetrical and has narrower ranges, less ripple and less taper than those of monostatic. The equal quiet zone electromagnetic fields were calculated by physical optics. And this quiet zone evaluation method was verified with experiment test.

Key words: antennas; electromagnetic fields; physical optics

1 问题的提出

紧缩场是采用反射面或透镜,将位于反射面或透镜焦点处的馈源产生的波在近距离内转化为平面波,从而满足远场测试对接近理想平面波的要求. 紧缩场有多种形式,其中较普遍采用的偏馈单反射面紧缩场是用一个偏置旋转抛物面作反射面,而馈源位于反射面的前下方.

紧缩场近场中适于放置被测物体的平面波照射区称为静区,静区内尽量满足理想平面波的要求. 理想平面波的波前应满足等幅、等相条件. 但由于边缘绕射、馈源直漏和反射面加工误差等不可避免的因素的影响,静区中的波前平面存在一定的振幅和相位的不平度. 根据振幅和相位的平

收稿日期: 2008-07-02

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2007AA12Z122)

作者简介: 王 辉(1981—),男,山东泰安人,博士生,hwang@ee.buaa.edu.cn.

整度可以确定静区尺寸.

静区的评估是对紧缩场产生的静区电磁波的平整程度进行分析或测量.静区的评估方法有多种[1-3],其中较普遍采用的是探头扫描法[2,4-5].

对于单馈源情况下(图1,采用单馈源A,馈源轴线与反射面竖直平分线共面,馈源轴线指向反射面中心)静区的评估,可以采用探头扫描法,直接在静区进行扫描测量,得到扫描区域内馈源发出的电磁波被反射面反射到静区各点的电场幅度和相位.

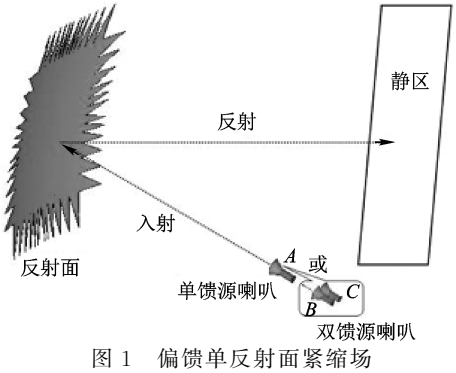

图1 偏馈单反射面紧缩场

通常采用的单馈源的测量系统对发射、接收信号的隔离度要求比较高.尤其是对弱信号的检测会有一些困难.因此可以考虑采用收发分离的形式,即用两个馈源,分别负责信号的发射和接收.这样发射、接收信号由不同的馈源天线和波导系统完成,能有效避免因单馈源收发隔离的困难而产生的信号泄露问题,从而易于接收弱信号.另一方面,双馈源的配置在实现交叉极化等方面的测量也有明显的优势.不同于单馈源情况,双馈源时馈源之间的互耦是信号泄漏的主要途径(如图1馈源B和C之间).但是针对互耦的仿真和测试都表明,两个并列的馈源互耦满足$\leqslant -50$ dB,因此这样的双馈源之间互耦较小可以忽略.

对于双馈源情况下(图1,馈源B、C,两馈源对称分布在反射面竖直平分线所在平面两侧,馈源轴线都指向反射面中心)静区的评估有其特殊性.不能通过对单个馈源产生的电磁波分布来作为系统的静区.尽管有研究表明[6-7],在小双站角($<10°$)条件下,目标的双站雷达散射截面(RCS, Radar Cross Section)与在双站角平分线上测量的单站RCS近似相等.也即表示,在测量目标散射的情况,对于双馈源在小角度情况,对目标的散射测量可以近似将收发等效为同一个位置的单馈源收发.对于大型紧缩场上述条件容易成立,但是对于电小尺寸的紧缩场上述近似则很难满足.另一方面,当需要对静区较精确的评估时,单馈源近似结果不能准确反映实际静区电磁场的幅度和相位分布情况.

本文对收发分离偏馈单反射面紧缩场的静区进行了研究,根据Lorentz互易定理,提出了一种对收发分离单反射面紧缩场静区评估的方法.采用物理光学法对等效静区的合成方法进行了仿真,并进一步通过实验测试对此静区评估方法的有效性进行了验证.

2 双站静区评估方法

紧缩场作为相干测试系统,在收发分离情况下,可以把其中一个馈源和反射面视为一个相干的整体,即两个馈源各自与反射面分别构成独立的、互为测量关系的天线系统,在相同静区测量位置构成各自的天线口面.因此可以分别对这两个等效天线系统在该平面产生的电磁场进行测量,通过这样的测量可以严格地得到收发系统在静区位置各自的电磁特性.对上述得到的收发系统在静区的分布,根据天线接收原理在每一点处进行计算得到各点处收到的电磁波的分布,根据这个分布可以得到等效静区,即等效的该处单馈源时接收到的发射电磁波的分布和平整程度.

对于通过自由空间的电磁场分布求得接收天线系统接收发射天线系统的发射,可以由Lorentz互易定理得到.Lorentz互易定理可以表述为

$$\oint_S \boldsymbol{E}_1 \times \boldsymbol{H}_2 \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{s} = \oint_S \boldsymbol{E}_2 \times \boldsymbol{H}_1 \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{s} \qquad (1)$$

其中S为包括此无源场的封闭曲面.$\boldsymbol{E}_1$,$\boldsymbol{H}_1$和$\boldsymbol{E}_2$,$\boldsymbol{H}_2$为封闭曲面上的无源场,由发射和接收天线系统分别发射所产生.

设天线分别为B'和C',相互间的位置如图2所示.天线C'口面在$x=x_0$平面上.设$\boldsymbol{E}_{B'}$,$\boldsymbol{H}_{B'}$和$\boldsymbol{E}_{C'}$,$\boldsymbol{H}_{C'}$分别是天线B'和C'发射时的场.V是由闭合面S_0+S_∞和$\sum_E$所限定的区域(图中虚线包围区域).

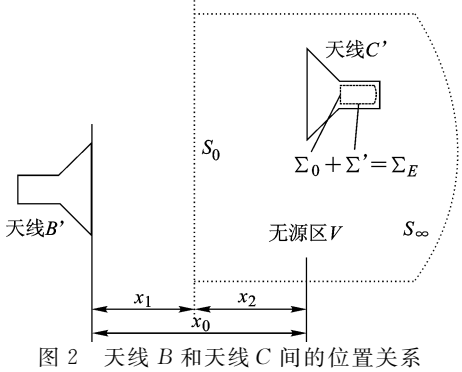

图2 天线B和天线C间的位置关系

在区域 V 内应用 Lorentz 互易定理可得天线 C' 的接收为[8]

$$P_{C'B'}=\oint_{S_0}(\boldsymbol{E}_{B'0}\times\boldsymbol{H}_{C'0}-\boldsymbol{E}_{C'0}\times\boldsymbol{H}_{B'0})\cdot\boldsymbol{n}\mathrm{d}s \tag{2}$$

$P_{C'B'}$ 正比于天线 B' 发射时天线 C' 的接收电压. $\boldsymbol{E}_{B'0}$,$\boldsymbol{H}_{B'0}$ 和 $\boldsymbol{H}_{C'0}$,$\boldsymbol{H}_{C'0}$ 分别为天线 B' 和 C' 发射时 S_0 面上的场. 式(2)中的积分可写为

$$\boldsymbol{p}_{C'B'}=\boldsymbol{E}_{B'0}\times\boldsymbol{H}_{C'0}-\boldsymbol{E}_{C'0}\times\boldsymbol{H}_{B'0} \tag{3}$$

利用关系式 $\boldsymbol{H}=\frac{1}{2}\boldsymbol{e}_n\times\boldsymbol{E}$,由式(3)得

$$|\boldsymbol{p}_{C'B'}|=\frac{2}{Z}|\boldsymbol{E}_{B'0}\cdot\boldsymbol{E}_{C'0}| \tag{4}$$

假设单个馈源天线 A' 发射时,在 S_0 面上的场为 $\boldsymbol{E}_{A'0}$ 和 $\boldsymbol{H}_{A'0}$,发射、接收都由天线 A' 完成,且处在同一位置. 此时式(4)在单馈源的情况可写为

$$|\boldsymbol{p}_{A'A'}|=\frac{2}{Z}|\boldsymbol{E}_{A'0}|^2 \tag{5}$$

若使式(4)和式(5)各自反应天线相同位置的电磁波耦合情况,即相应的双馈源接收天线的接收电压等效于单馈源的接收电压,则 $|\boldsymbol{p}_{C'B'}|=|\boldsymbol{p}_{A'A'}|$,从而可得

$$|\boldsymbol{E}_{A'0}|=(|\boldsymbol{E}_{B'0}|\cdot|\boldsymbol{E}_{C'0}|) \tag{6}$$

在图 1 所示紧缩场中,将单馈源时馈源 A 和反射面视为天线 A';双馈源时馈源 B 和反射面视为天线 B',馈源 C 和反射面视为天线 C',测试面视为 S_0 面. 在单馈源时馈源 A 馈电时,得到的测试面处的电场为 $\boldsymbol{E}_A$;在双馈源时馈源 B 和 C 分别馈电情况下,得到的测试面处的电场分别为 $\boldsymbol{E}_B$ 和 $\boldsymbol{E}_C$. 若使双馈源时馈源 B 发射时馈源 C 的接收电压与单馈源时馈源 A 的接收电压进行等效,则有:

$$|\boldsymbol{E}_A|=(|\boldsymbol{E}_B|\cdot|\boldsymbol{E}_C|^{0.5} \tag{7}$$

所以在测到 $|\boldsymbol{E}_B|$ 和 $|\boldsymbol{E}_C|$ 后,可以得到在相同接收时单馈源时测试面处的电场幅值 $|\boldsymbol{E}_A|$,即得到对于单馈源时的等效静区电场幅度 $|\boldsymbol{E}_{\mathrm{equal}}|$,即:

$$|\boldsymbol{E}_{\mathrm{equal}}|=(|\boldsymbol{E}_B|\cdot|\boldsymbol{E}_C|)^{0.5} \tag{8}$$

3　数值仿真

针对上述的分析结果,结合图 1 的装置,采用数值方法计算静区场分布,对于金属面的反射可以用物理光学法计算. 计算频点为 9 GHz,采用电场水平极化方式. 在图 1 中馈源 A,B 和 C 分别馈电情况下,计算得到的沿静区中心水平方向的电场幅度分布如图 3 所示.

对于馈源 A 馈电时,中间区域幅度波动较小,边缘处迅速衰减,中间区域为可以接受的静区. 而且静区有较好的对称特点.

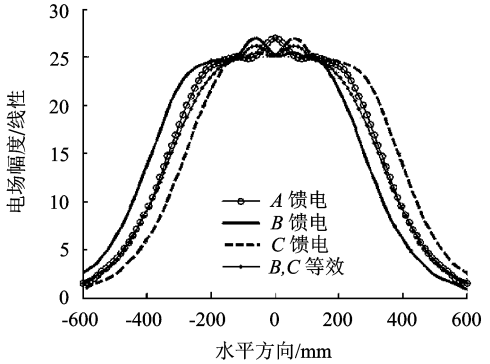

图 3　沿静区中心水平方向电场幅度计算分布图

对于偏馈情况,馈源 B 和 C 分别馈电,由于馈源不在系统的轴线,因此不可避免造成其产生的电磁场分布不对称,并偏离轴线;其相位分布(未列出)更显示出倾斜的效果. 尽管这样的电磁场分布是待测目标在静区实际被照射的电磁波情况,但是考虑到另一接收馈源从另一对称方向接收反射,因此整个发射接收的等效效果应该是对称的. 具体的分布则由第 2 节的计算方法给出细节.

把发射馈源 B 的电场数据以及接收馈源 C 的电场数据(在理想情况下与发射馈源 B 在静区产生的电场分布为镜像)代入式(8),得到等效静区电场分布图(图 3 所示). 由图可知,不同于单偏馈计算得到的不对称分布,由双馈源情况计算得到的等效静区呈对称分布,这与实际情况相吻合,因为在静区对称位置的点目标散射应该得到完全相同的结果. 相对于单站静区分布,双站等效静区范围变小,波动更小,边缘下降更平缓.

4　实验测试

为验证第 2 节所述等效静区的分析方法,采用探头扫描法对实际设计出的双馈源小型紧缩场进行实验测试,测试频点为 9 GHz,采用电场水平极化方式.

在图 1 中馈源 A 馈电,测试得到沿静区中心水平方向的电场幅度分布. 把测试得到发射馈源 B 的电场数据以及接收馈源 C 的电场数据代入式(8),得到等效静区电场沿静区中心水平方向的电场幅度分布如图 4 所示,等效静区电场幅度二维图(dB)如图 5 所示.

由图 4 可知,与仿真结果相同,双站等效静区呈对称分布,但相对于单站静区分布,双站等效静区范围变小,波动更小,边缘下降更平缓.

由图5可知,不同于单偏馈得到的不对称分布(图3所示),由双馈源情况测试得到的等效静区呈对称分布,与实际目标测量的信号对称分布相符合.中间区域电场幅度起伏在3 dB的范围,边缘处迅速衰减,边缘的起伏为反射面截断引起的衍射效果.中间区域为可接收的静区,即在测量中满足远场近似.

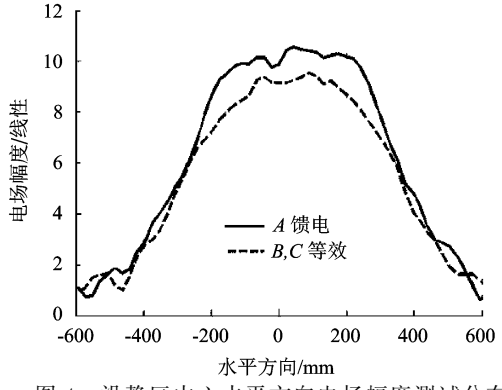

图4 沿静区中心水平方向电场幅度测试分布

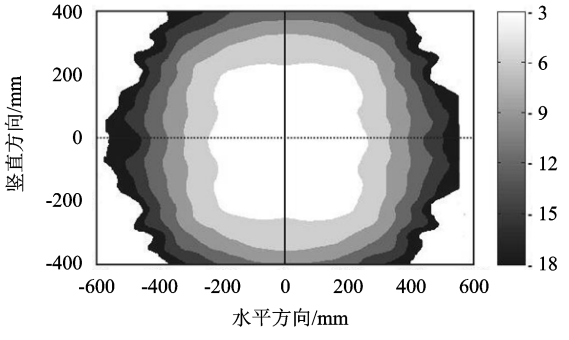

图5 等效静区电场幅度测量分布图(dB)

5 结束语

本文对收发分离偏馈单反射面紧缩场的静区进行了研究,根据Lorentz互易定理,提出了一种对收发分离单反射面紧缩场静区评估的方法.采用物理光学法对等效静区的合成方法进行了仿真,并进一步通过实验测试对此静区评估方法的有效性进行了验证.仿真计算和测试都表明,不同于单偏馈测试得到的不对称分布,由双馈源情况测试得到的等效静区呈对称分布.中间区域电场幅度起伏在3dB的范围,边缘处迅速衰减.中间区域为可接收的静区,即在测量中满足远场近似.相对于单站静区,双站等效静区比单站静区范围变小,波动更小,边缘下降更平缓.

参考文献(References)

[1] Birtcher C R, Balanis C A, Vokurka V J. RCS measurements, transformations, and comparisons under cylindrical and plane wave illumination[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1994, 42(3): 329－334

[2] Sarabandi K, Zahn D, Bistatic scattering measurements using near-field scanning[C]// IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001, 3(1), 1359－1361

[3] 全绍辉.紧缩场设计、检测与应用研究[D].北京:北京航空航天大学电子信息工程学院, 2003
Quan Shaohui. Studies on compact range design, evaluation and applications[D]. Beijing: School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003(in Chinese)

[4] Repjar A G, Kremer D P. Accurate evaluation of a millimeter wave compact range using planar near-field scanning[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, AP-30(3):419－425

[5] Paris D T, Leach W M JR, Joy E B. Basic theory of probe-compensated near-field measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1978, AP-26(3):373－379

[6] 何国瑜,卢才成,洪家才,等.电磁散射的计算和测量[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006:478－484
He Guoyu, Lu Caicheng, Hong Jiacai, et al. Electromagnetic scattering computations and measurements[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2006:478－484(in Chinese)

[7] Kell R E. On the derivation of bistatic RCS from monostatic measurements[J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(8): 983－988

[8] 毛乃宏,俱新德.天线测量手册[M].北京:国防工业出版社, 1987:232－233
Mao Naihong, Ju Xinde. Antenna test manual[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1987: 232－233(in Chinese)

(责任编辑:娄 嘉)