

CINRAD/ SA 雷达天线的辐射特性分析及其支持双线偏振升级的可行性研究^{*}

梁海河¹ 徐宝祥¹ 刘黎平¹ 高玉春² 张建云³ 梁赞明⁴

1 中国气象科学研究院, 北京, 100081

2 中国气象局大气探测技术中心, 北京, 100081

3 北京敏视达雷达有限公司, 北京, 100085

4 中国电子科技集团第 54 研究所, 石家庄, 050068

摘 要

文中较全面地测量了 CINRAD/ SA 天线的水平和垂直共极化和交叉极化辐射数据, 分析了 CINRAD/ SA 天线的主瓣、旁瓣、交叉极化电平等天线辐射特性, 并与美国 WSR-88D 雷达双线偏振改造前后的辐射特性进行了比较, 提出了 CINRAD/ SA 双线偏振升级后降低旁瓣电平的几个措施, 讨论了同时发射和同时接收双线偏振收发体制下, 由天线水平和垂直偏振辐射不平衡产生的 Z_{DR} 误差和偏振交叉耦合项 ICPR 值。结果表明: (1) CINRAD/ SA 雷达天线具有较好的辐射性能, 主瓣波束较均匀, 旁瓣和交叉极化电平优于设计指标值; (2) CINRAD/ SA 的天线辐射性能接近于 WSR-88D, CINRAD/ SA 天线经调整后旁瓣电平应可以满足双线偏振升级要求; (3) Z_{DR} 误差和 ICPR 值足够小且在统计误差范围内, 能满足 CINRAD/ SA 双线偏振改造对测量精度的要求; (4) 现用天线的辐射性能可支持 CINRAD/ SA 双线偏振升级。

文中还讨论了天线馈源支撑杆对辐射特性的影响, 建议 CINRAD/ SA 天线的偏振改造仍采用三杆支撑方式, 由此产生的水平和垂直偏振与高旁瓣脊间的不匹配, 可计入系统误差, 通过定标予以消除。

关键词: CINRAD/ SA, 雷达天线, 辐射特性, 双线偏振。

1 引 言

经过近 30 年的研究试验, 双线偏振雷达探测理论和技术已有了重大的进展。最近的研究试验表明, 双线偏振多普勒天气雷达在解决气象业务和科学研究的一系列问题上具有很大的应用潜力^[1]。如双线偏振雷达能提高定量估测强降水的精度, 加强对强天气系统的预警和监测能力; 识别水成物粒子的形态、相态, 判断粒子谱和过冷水区, 提高人工影响天气的作业效率; 为数值模式提供初始条件和必要的约束, 提高预报准确率。目前, 美国正进行 WSR-88D 雷达的双线偏振改造试验和外场观测对比试验^[2-3], 并计划在近年实施布网雷达 WSR-88D

的升级改造。英国、德国、加拿大等也正在积极发展新的双线偏振雷达技术。中国曾于 20 世纪 80 年代在 713C 数字化雷达上实现了双线偏振雷达改造, 并开展了相应的探测应用研究^[4-5]。现阶段中国正在实施新一代多普勒天气雷达网(CINRAD)建设, 为进一步提升 CINRAD 的探测能力和水平, 加速发展基于 CINRAD 的双线偏振多普勒技术, 已是十分紧迫和必要的工作。按照“中国新一代天气雷达发展规划(1994—2010)”的要求以及实际业务和技术发展的需要, CINRAD/ SA 雷达已开展了双线偏振多普勒技术的预研究工作。

由于双线偏振雷达比单一的线偏振雷达具有更高的天线性能要求, 但目前还没有对天线辐射特性

^{*} 初稿时间: 2005 年 8 月 30 日; 修改稿时间: 2005 年 11 月 25 日。

资助课题: 国家自然科学基金“新一代天气雷达监测沙尘暴的能力和 method 研究(40475011)”项目和北京敏视达雷达有限公司“CINRAD/ SA 双线偏振升级预研究”项目。

作者简介: 梁海河, 男, 1966 年生, 博士, 研究员, 主要从事多普勒天气雷达探测技术和方法研究。

进行过较为系统的分析研究,因此在 CINRAD/SA 的偏振升级预研究中特别重视对天线辐射特性分析和技术改造。这也是美国国家强风暴实验室对 KOUN(WSR-88D)雷达进行偏振升级改造中极为重视的工作。双线偏振雷达天线水平和垂直偏振波辐射状况不匹配、波束形状变坏、旁瓣和交叉极化电平偏高都有可能对导致双线偏振变量测量精度降低,甚至失去本身的含义。由于现有雷达天线是为单一线偏振雷达设计的,因此它的辐射状况和双线偏振特性能否支持双线偏振升级是一个首要解决的问题。

本文作为 CINRAD/SA 双线偏振升级预研究工作的内容之一,较全面地测量了 CINRAD/SA 天线水平和垂直偏振的共极化和交叉极化辐射方向图,获得了珍贵的第一手资料。文章分析了雷达的天线性能和辐射方向图的匹配状况,计算了天线产生的双线偏振变量的误差,通过与 WSR-88D 雷达对比初步估计了 CINRAD/SA 双线偏振升级后的旁瓣电平大小,并提出了降低旁瓣的措施,为双线偏振天线改造和偏振数据处理提供了所需的理论依据。由于天线馈源和支撑杆的阻挡作用,会使天线辐射性能变差,本文还讨论了三杆和四杆馈源支撑方式对天线辐射的影响,并认为 CINRAD/SA 仍采用三杆支撑方式为好。

2 天线辐射理论模型

雷达天线的作用是在自由空间传播和导行波(传输线)传播之间作换能器,它具有发射能量和接收能量两方面的作用。天线增益是衡量天线把能量集中到某一特定方向的能力的参数,天线增益与波瓣宽度之间的关系决定于口径上的电流分布。在天线辐射远场区由口径上的电流分布运用傅立叶变换理论可计算出辐射方向图或电场强度方向图^[6]。

对于圆口径天线的照射函数可采用极坐标 (r, θ) 来描述,其中 r 是离圆口径中心轴线的径向距离, θ 是投影在口径的平面上对一个参考轴测得的角度。对于均匀分布的圆口径,其电场强度正比于

$$E(\phi) = \int_0^{\pi} d\theta \int_0^{\pi} \exp(j2\pi \frac{r}{\lambda} \sin\phi \cos\theta) r dr = \pi r_0^2 2J_1(\xi)/\xi \quad (1)$$

式中 r_0 是圆口径的半径, $\xi = 2\pi(r_0/\lambda) \sin\phi$, λ 是波长, ϕ 是点 (r, θ) 与天线反射体原点的连线和中心

轴线的夹角,而 $J_1(\xi)$ 是一阶贝塞尔函数。对于均匀分布的圆口径天线第1旁瓣电平比主瓣低17.5 dB,波瓣宽度为 $58.5 \lambda/D$ (D 是口径直径)。

通常天线口径分布函数是不均匀的,其分布函数形式为 $[1 - (r/r_0)^2]^p$,式中 $p = 0, 1, 2, \dots$,其辐射方向图具有 $J_{p+1}(\xi)/\xi^{p+1}$ 的形式(当 $p = 0$,即为均匀分布)。实际工作中,为了使照射均匀和提高口径效率,存在着最佳馈源照射角度的问题,因此馈源对反射体边缘的照射强度是不为零的,这时口径分布函数改写为 $[1 - (r/r_0)^2]^p + b$ (b 是系数,由馈源对反射体边缘的照射强度大小确定)。对于 CINRAD/SA 天线反射体直径 $D = 8.54$ m,焦距 f 与 D 的比值为 $f/D = 0.375$,取 $p = 2$,对应的 $b = 0.16$,则依据 p 和 b 确定的天线口径归一化功率密度的辐射函数 $S(\xi)$ 为^[7]

$$S(\xi) = 20 \lg \left[\frac{\frac{48J_3(\xi)}{\xi^3} + \frac{0.32J_1(\xi)}{\xi}}{1.16} \right] \quad (2)$$

式中, $\xi = 2\pi(r_0/\lambda) \sin\phi$, $2r_0 = D = 8.54$ m, $\lambda = 0.105$ m。由此计算的理论值可以和实际测量的辐射方向图数据进行对比分析。

通常位于抛物面前方的馈源和支撑杆会产生口径阻挡,这种作用会产生两种效果:在所期望的辐射分布上增加遮蔽,并把所截获的能量进行再次散射。前向辐射方向图上的凹陷的影响可以由未受影响的辐射方向图减去馈源形状大小来估计。对旁瓣的影响依赖于阻挡区域的大小,因此大的馈源和多支撑杆都会产生较大的影响。支撑杆引起的二次辐射和遮挡会产生一个高旁瓣脊,该脊位于支撑杆在反射体口径上的投影互相垂直的平面内。当采用不同的馈源支撑方式时,高旁瓣脊的取向也会发生变化。如图1所示,3个支撑杆产生3个高旁瓣脊,而4个支撑杆产生两个脊。三杆支撑方式产生的旁瓣脊比较宽,但是比四杆方式偏低6 dB^[8]。

CINRAD/SA 馈源位于抛物面反射体前方,由3个支撑杆固定。这种阻挡作用会降低增益,增加副瓣,填充波瓣间的零点,因此降低了天线辐射性能。另外,影响天线辐射性能的因素还有衍射和溢出、反射体表面泄漏,反射体位相不均匀以及制造工艺等。雷达附近的地面建筑物等其他障碍物,由于产生口径阻挡效应,均能使辐射方向图变差。

CINRAD/SA 天线的设计参数与美国 WSR-

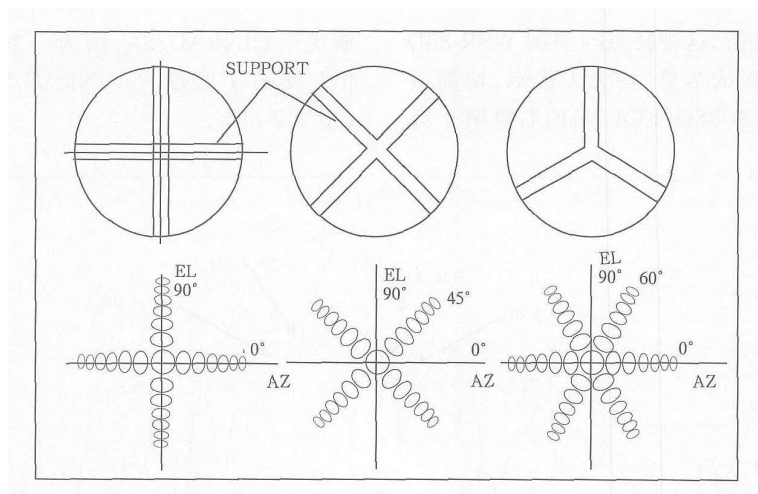


图1 3个和4个支撑杆产生的高旁瓣脊示意图

Fig. 1 Feed support configuration and their sidelobes produced

88D 雷达天线参数是一致的,如天线直径为 8.54 m,焦距直径比 f/D 为 0.375,口径分布函数中的系数 p 取为 2。WSR-88D 雷达是世界上最先进的一种天气雷达,因此通过对比 CINRAD/ SA 和 WSR-88D 天线的旁瓣电平,主瓣宽度,交叉电平等有利于说明 CINRAD/ SA 天线的辐射性能和技术水平。文中的 CINRAD/ SA 天线辐射数据是在无天线罩时测量的,通常天线罩对主瓣的影响可以不计,但会使旁瓣有所增加,对于近瓣电平可增加 1 dB 左右。由于无法完全获得无天线罩的完整的辐射数据,文中引用了 WSR-88D 在有或无天线罩时的两种测量数据。本文对比了 3 部 CINRAD/ SA 的辐射数据,结果表明天线辐射数据差异不大,辐射方向图中的近瓣电平轮廓线的差异约 1 dB,这与 WSR-88D 的近瓣电平轮廓线具有相类似的情形。如无特别指明,文中所引用的 CINRAD/ SA 天线数据为武汉雷达,WSR-88D 为美国国家强风暴实验室的 KOUN 雷达在双线偏振改造时的测量数据。

3 CINRAD/ SA 天线辐射方向图分析

CINRAD/ SA 双线偏振雷达改造要求天线由单通道发射和接收水平偏振波改为双通道发射和接收水平和垂直偏振波^[9]。双线偏振测量要求双线偏振天线辐射模式相互匹配,并具有低旁瓣,低交叉极化电平和波束对称的特性。因此,为了确定现有天线是否符合双线偏振的改造要求,对 CINRAD/ SA 雷达现有天线的水平和垂直偏振的辐射匹配状况和

天线性能进行综合分析是十分必要的。

天线辐射方向图测试均采用扫描信号源的方法。本文除测量了水平极化在 (2.7—3.0 GHz) 区间的 4 个频率,5 个切割面 (0°, 30°, 45°, 60°, 90°) 的天线辐射数据 ($\pm 90^\circ$ 内) 外,还测量了天线垂直极化的辐射方向图 (2.85 GHz; 0°, 90° 切割面)。这些数据为 CINRAD/ SA 雷达的双线偏振分析和升级提供了重要依据,通过分析天线辐射方向图,就可以确定天线的波束宽度、功率增益、旁瓣电平、交叉极化电平等。

3.1 天线旁瓣和主瓣

天线旁瓣是雷达系统中引起测量误差的一个重要来源。在发射模式中旁瓣会浪费很多辐射能量从而减少主瓣辐射方向的能量,在接收模式中又会导致主方向以外的能量进入雷达系统。在雷达应用中一般要求天线具有较低的辐射旁瓣,但是对一个给定尺寸的天线降低旁瓣意味着减小增益和增大波束宽度。因此,综合分析天线旁瓣、增益和波束宽度是考查天线辐射性能的重要依据。

图 2 给出了 CINRAD/ SA 水平极化在测试频率 $f = 2.85$ GHz、切割面为 0° 时的共极化天线辐射方向图。天线右侧第 1 旁瓣在 1.9° 处为 -27.4 dB,第 2 旁瓣为 -31.4 dB,在 4.7° 处迅速下降到 -51.2 dB。天线左侧第 1 旁瓣很低,达到了 -34.8 dB,但第 2 和第 3 旁瓣高于第 1 旁瓣,分别为 -33.1 dB 和 -32.9 dB,在 -5.87° 处下降为 -54.7 dB。对比左、右两侧的方向图,右侧旁瓣整体偏高,水平极化

左侧旁瓣优于右侧旁瓣,这种特点与美国 WSR-88D KOUN 雷达的出厂测试结果(均无天线罩,切割面为 0°)非常相似。WSR-88D(KOUN)的右侧第 1 旁

瓣优于 CINRAD/SA,约为 -28.8 dB(差 1.4 dB);但左侧第 1 旁瓣比 CINRAD/SA 差,为 -32.6 dB(差 2.2 dB)。

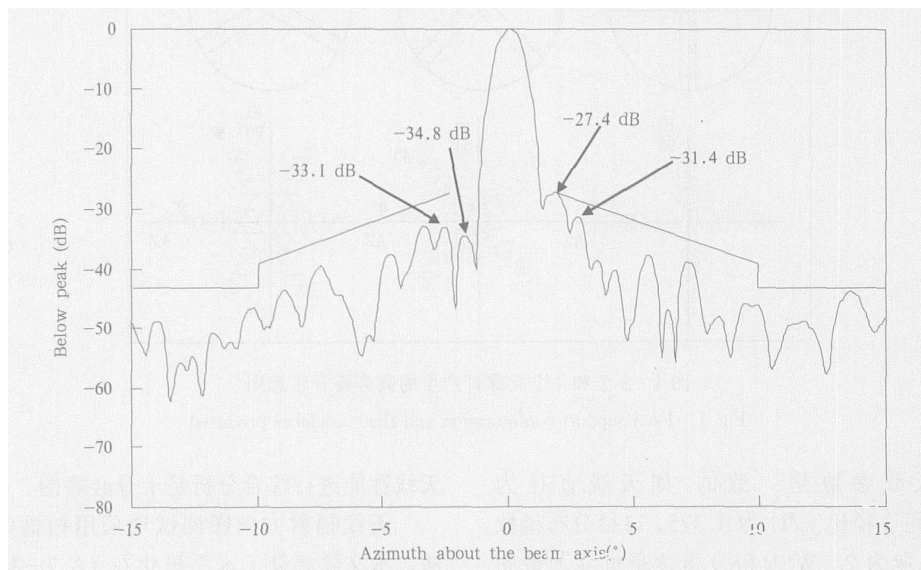


图2 CINRAD/SA 雷达水平共偏振(HH)天线辐射方向

Fig2 The copolar horizontally polarized radiation (HH) patterns of CINRAD/SA
(0° cut, $f = 2.85$ GHz)

图 3 是垂直极化在测试频率 $f = 2.85$ GHz、切割面为 0° 时的共极化天线辐射方向图。右侧第 1 旁瓣在 1.8° 处也为 -27.4 dB,第 2 旁瓣为 -31.9 dB。天线左侧第一旁瓣很低,达到了 -31.0 dB,第 2 瓣为 -30.8 dB,分别优于 SA 天线 1.7 和 3.0 dB。从

左、右两侧的方向图来看,远瓣对称性非常好。虽然 CINRAD/SA 垂直共极化的旁瓣比 WSR-88D(KOUN)略差,但限定在 CINRAD 的技术指标内(第 1 旁瓣电平指标值为 -27.0 dB,如图 2 和 3 中廓线所示)。

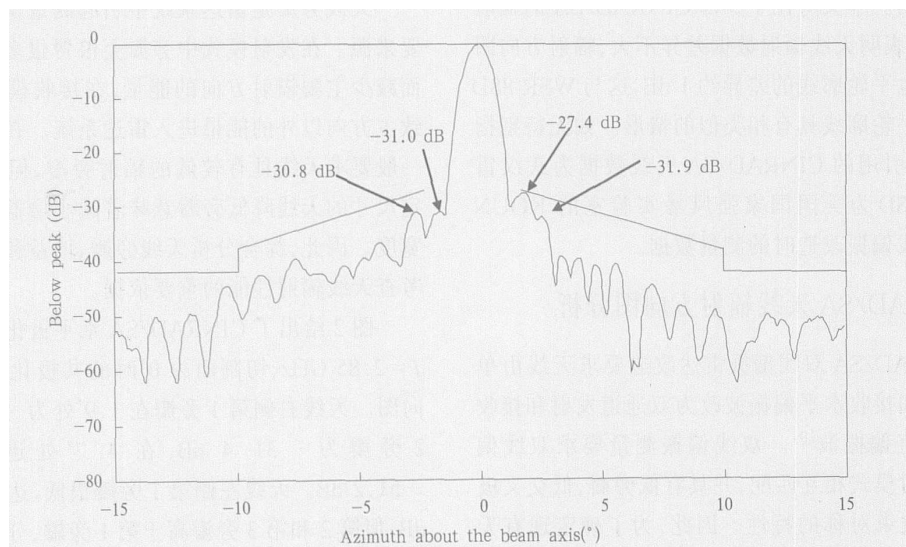


图3 CINRAD/SA 雷达垂直共偏振(VV)天线辐射方向

Fig3 The copolar vertically polarized radiation (VV) patterns of CINRAD/SA(0° cut, $f = 2.85$ GHz)

图 4 给出了水平共极化 (HH)、垂直共极化 (VV) 分别在 $0^\circ, 90^\circ$ 切割面上的主瓣和近瓣图。由图可知, 4 个方向图曲线右侧第 1 旁瓣电平非常接近, 第 2 旁瓣电平略不同, 90° 切割面的第 1 波谷电平好于 0° 切割面。左侧第 1 旁瓣和第 2 旁瓣电平差别较大, 以 VV 在 90° 时为最大 (第 1 瓣 - 27.1 dB), HH 在 0° 时最小 (第 1 瓣 - 34.6 dB)。 90° 面的 HH 和 VV 近瓣大于 0° 面近瓣。

为了考查天线主瓣, 可假定天线功率方向图为 Gauss 分布 $\exp(-2.78\theta/\theta_b)$ (其中 θ 是偏离波束中心的角度, θ_b 是半功率点波束宽度)。图 4 (见封三) 中水平偏振 0° 和 90° 的半功率点 3 dB 波束宽度基本一致 (为 0.98°)。与 Gauss (取 $\theta = 0.90^\circ$) 分布相比, 主旁左侧在 -15 dB 以上二者吻合较好, 右侧主旁略差一些, 在 3 dB 处相差约 0.1 dB (为 1.0°)。彩图 4 中垂直偏振的半波束宽度在 0° 和 90° 的切割面上的值分别为 0.9 和 1.1° , 主瓣左右对称性不如水平偏振, 与 Gauss 分布的差别略大。WSR-88D (KOUN) 的水平极化和垂直极化在 0° 切割面上的波束宽度分别为 0.93 和 0.90° , 比 CINRAD/SA 小。

图 5 (见封三) 是不同切割面 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 和 60° (测试频率为 2.85 GHz) 上的主瓣和近瓣辐射方向图。在不同的切割面上右侧第 1 旁瓣电平以 0° 面旁瓣为最高 (-27.4 dB), 60° 面的旁瓣为最低 (-33.7 dB), 30° 面和 60° 面分别为 -27.9 和 -28.6 dB。即随着角度的增加, 第 1 旁瓣在减小, 但前 3 个面上变化不够明显, 而在 60° 面上突然比 45° 面降低 5.1 dB。在 30° 面上的第 2 旁瓣和第 3 旁瓣明显高于其他 3 个面, 且第 2 旁瓣 (-28.3 dB) 高于 45° 和 60° 面上的第 1 旁瓣电平。在图 5 的左侧第 1 旁瓣以 60° 面旁瓣为最高 (-27.4 dB), 0° 面明显偏低 (-34.5 dB) 约 7 dB, 另 2 个面上相差不大 (-27.5 和 -27.6 dB)。不同切割面上, 旁瓣电平的差异主要是由馈源支撑杆的遮挡引起的。

通过以上分析, CINRAD/SA 天线水平和垂直共极化第 1 旁瓣和近瓣的测试结果均优于 CINRAD/SA 天线技术设计指标值 (图 2 和图 3 中黑粗线), 并且小于指标值 $0.4\text{—}4.0\text{ dB}$ 。左侧第 1 旁瓣电平总体上与右侧旁瓣电平匀称, 水平偏振旁瓣好于垂直旁瓣。天线主瓣水平偏振对称性较好, 波束宽度小于 1° , 垂直共极化略差。造成垂直共极化略差的可能原因是在测量中, 为了放置电缆而将馈源

扭转后所产生的阻挡引起的。与 WSR-88D 雷达相比, CINRAD/SA 的旁瓣电平、波束宽度总体上略差于 WSR-88D, 其中水平共极化辐射优于 WSR-88D, 而水平交叉极化辐射和垂直共、交叉极化辐射比 WSR-88D (未计天线罩影响) 差。

3.2 交叉极化

天线交叉极化电平是双线偏振雷达最重要的指标之一, 直接关系到 Z_{DR} 的测量精度。彩图 6 是水平偏振和垂直偏振波的交叉极化信号在 0° 和 90° 切割面的辐射方向图。在 0° 面上, 水平交叉极化电平最大值为 -35.5 dB, 该值位于离波束中心 0.65° 处, 右侧电平整体高于左侧值, 在 $-1^\circ\text{—}+1^\circ$ 内电平变化平缓, 而在该范围以外交叉电平迅速下降到 50 dB 以下。在 90° 面上, 交叉极化电平不如 0° 面, 最大值为 -33.0 dB, 但两条曲线变化趋势很一致。垂直偏振交叉电平在 0° 和 90° 面最大值分别为 -29.2 和 -30.7 dB, 垂直交叉极化的 0° 面的最高电平较大。从整体来看, 垂直交叉极化在两个切割面的电平比水平交叉极化要高, 但在 $-1^\circ\text{—}+1^\circ$ 内波束变窄。

在波束轴中心处, 图中交叉极化电平曲线出现了不连续, 这可能与地物影响有关。因为测试天线座马达只能驱动天线在仰角 $0^\circ\text{—}90^\circ$ 内作俯仰运动, 如当完成从 -90° 到 0° 的测试后 (天线由指向天顶转为指向信号源), 需要将天线手动旋转 180° 后再从 0° 测试到 90° (天线由指向信号源转为指向天顶)。这样地物就可能因天线辐射不均匀而引起数据测量不连续。

从图 6 (见封三) 的分析可知, 水平和垂直交叉极化最大电平值在 -29.2 — -35.5 dB, 小于 CINRAD/SA 的指标值 (-27.0 dB)。WSR-88D (KOUN) 雷达的水平交叉极化电平 (无天线罩、双通道) 为 -36.5 dB, 垂直交叉极化电平为 -31.4 dB。如果扣除地物影响 (取波束轴中心不连续处的 4 个低值点分别为 -40.2, -35.7, -34.5, -33.4 dB), 两种雷达的交叉极化电平基本一致。

3.3 频率变化对天线参数的影响

CINRAD/SA 天线选取的 4 个测试频率为 2.7, 2.84, 2.85 和 3.0 GHz。以阳江 CINRAD/SA 雷达水平偏振在不同的 4 个测试频率下的天线辐射参量表明, 除 2.7 GHz 的波束宽度较大外 (0.95°), 另外 3 个频率下的波束宽度差别很小 ($0.898^\circ, 0.888^\circ$ 和 0.894°)。天线增益以 3.0 GHz 时为最大 46.05 dB,

2.7 GHz 时最小 45.14 dB。第 1 旁瓣和交叉极化也以 3.0 GHz 时为最好 (-32.56, -31.98 dB), 2.7 GHz 时较差 (-28.64, -29.8 dB)。比较 4 个频率下的各个变量的平均值, 可将各频率按“好”、“差”排列为 3.0, 2.85, 2.84, 2.7 GHz。在 2.85 GHz 和 2.84 GHz 测试频率下, 各量都很接近, 表明频率变化不大时, 天线参量没有明显跳跃性变化。

从 CINRAD/SA 天线在 2.7—3.0 GHz 频率范围内的阻抗失配 (VSWR) 测量结果知, 图中 (图略) 有 3 个明显的低谷, 分别在 2.713, 2.853 和 2.949 GHz, 而 3.0, 2.85 GHz 对应的 VSWR 为 1.22 和 1.07, 处在较好的位置上。

比较而言, 天线在 2.85 和 3.0 GHz 频率下工作状况较好, 2.7 GHz 与前者相比略差, 在各测试频率下均满足 CINRAD 的技术指标。

4 实测辐射方向图与理论模型的对比和对馈源支撑的考虑

为了进一步分析 CINRAD/SA 天线辐射性能, 并较清晰地说明由馈源、支撑杆以及反射体表面不规则所产生的阻挡和散射对近瓣电平的作用, 本文给出不计这些影响时的理论辐射方向图。该理论值是 CINRAD/SA 天线双线偏振技术改造所能达到的最小极限值, 如改变馈源支撑杆结构, 检查反射表面容差, 调整反射体平面等。

图 7 给出了 CINRAD/SA (测试频率为 2.85 GHz、切割面为 0°) 的水平偏振辐射方向、WSR-88D KOUN 雷达 (测试频率为 2.705 GHz、切割面为 0°) 与理论辐射方向。图中下部的实粗线是理论辐射方向, 细实线是 CINRAD/SA 的辐射方向图 (0°切

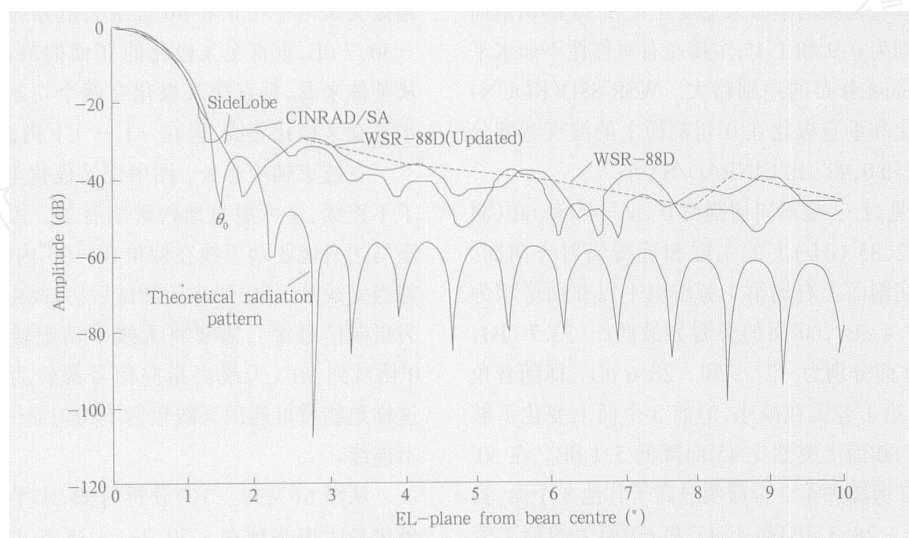


图 7 CINRAD/SA (测试频率为 2.85 GHz、切割面为 0°) 的水平偏振辐射方向、WSR-88D KOUN 雷达 (测试频率为 2.705 GHz、切割面为 0°) 与理论辐射方向

Fig. 7 CINRAD/SA H radiation pattern (0° cut, $f = 2.85$ GHz), WSR-88D KOUN and theoretical radiation patterns (0° cut, $f = 2.705$ GHz)

剖面)。从图可知, CINRAD/SA 的第 1 旁瓣电平与理论值基本吻合, 说明该高旁瓣主要是由照射函数引起的。随着离开波束轴中心的角度增加, 理论和实测旁瓣电平快速下降, 但实测值明显高于理论值, 这主要是由于阻挡而产生的。

主瓣的 3 dB 波束宽度 θ_1 的简化公式是 $\theta_1 \approx 1.4 \frac{\lambda}{D}$, 天线波束 (或主瓣) 的第 1 低谷圆直径 θ_0 约为 $4 \frac{\lambda}{D}$ 。将波长 (0.105 m) 和直径代入后, 得 $\theta_1 =$

0.987°, $\theta_0 = 2.82^\circ$ 。实测的波束宽度 (如 0.98°) 与理论值非常接近。实测的低谷半径为 1.3°, 小于理论值 1.41° 以及 WSR-88D 的实测值 1.8°。根据理论模型 (取 $p = 2$, $b = 0.16$), 能量的 99% 应集中在天线主瓣, 通过累加主瓣 (0°—1.3°) 和旁瓣 (1.3°—10°) 在 5 个切割面上的能量, 约 96.9% 的能量集中在主瓣, 而 WSR-88D 为 97.0%。主瓣发射能量比理论值偏小, 应与馈源和支撑杆的阻挡和散射有关。

从图 1 可知由于 0° 和 60° 切割面正好位于高旁

瓣脊中, 30 和 45 切割面位于两个高旁瓣脊的中间。在图 5 中右侧第 1 旁瓣电平以 0 切割面旁瓣为最高、以 60 切割面旁瓣为最低, 左侧第 1 旁瓣电平以 60 切割面旁瓣为最高、以 0 切割面旁瓣为最低。因此, 在 0 和 60 切割面、30 和 45 切割面上的旁瓣电平具有相类似的情形, 这与支撑杆阻挡产生高旁瓣脊的理论模型是一致的。

为了估算 CINRAD/ SA 天线改造后旁瓣电平的高低, 我们选用旁瓣电平最大的 0 切割面进行类比分析。图 7 中的虚折线是 KOUN 雷达在双线偏振改造前的旁瓣廓线, 粗实线是改造后的辐射方向图 (0 切割面)。从方向图形状和分布来看, 改造前后近瓣的差别是很小的。但是, 改造后的旁瓣电平值在一些位置上有所增加或减小, 其中第 1 或第 2 旁瓣约增加 1 dB。CINRAD/ SA 天线除第 1 旁瓣电平 (-27.4 dB) 比 WSR-88D (-28.8 dB) 略高外, 其他旁瓣电平均低于 WSR-88D (KOUN)。由此推测, CINRAD/ SA 改造后的第 1 旁瓣电平有可能出现在 -27 dB 左右, 但第 2 或远瓣电平仍然会比较低。另外, 由于受测试条件的限制, 现有天线辐射数据是在无天线罩情况下测得的, 即忽略了天线罩对旁瓣的影响, 通常这个增量累计在 1 dB 左右。

通过对比天线辐射方向图的理论模型和实际测量值, 表明要进一步减小旁瓣电平仍然存在很大的空间。改造后的馈源为 H 和 V 双通道馈源, H 和 V 波导分别沿着下部两个支撑杆与馈源的两个接口相接, 因此可以将上部的一个支撑杆做细, 这样可以使垂直于该杆的高旁瓣脊 (即切割面为 0) 降低几个 dB^[9]。另外, 把波导和支撑杆用薄的吸收材料包裹后可以减少散射, 以进一步降低天线旁瓣。在必要时, 检查反射表面容差, 调整反射体平面等以降低旁瓣。通过这些必要措施, 将改造后的 CINRAD/ SA 天线第 1 旁瓣降低在 -27.0 dB 以下是可能且可行的。

美国科罗拉多州立大学 (CSU)、国家大气研究中心 (NCAR) 和国家强风暴实验室 (NSSL) 的偏振雷达选择了四杆馈源支撑方式。在 WSR-88D 雷达的改造计划中, 则采用了三杆支撑方式。采用四杆支撑方式的优点是使水平和垂直辐射可以做到尽可能地匹配, 符合双线偏振雷达为提高差分反射率测量精度的要求。但是这种支撑方式使得旁瓣比采用三杆支撑方式要偏高, 如 CSU 雷达的旁瓣电平比

WSR-88D KOUN 高出 12—16 dB, 甚至超过美国 NEXRAD 指标值 6—8 dB。为了降低旁瓣对偏振变量测量的影响, 本文建议 CINRAD/ SA 双线偏振雷达采用三杆支撑方式, 这样虽然在水平和垂直方向的对称性降低了, 但是可明显降低天线旁瓣的影响。对于支撑杆阻挡的不对称问题, 则可以通过定标予以消除。

5 天线辐射能量分布对偏振变量造成的误差估计

理想情况下的 H 和 V 辐射方向图应该是完全匹配的, 交叉极化耦合影响可以忽略不计。但在实际工作中, 完全匹配的天线辐射方向图是不可能做到的, 另一方面, 大多数的双线偏振雷达系统是由单偏振雷达改造的, 并非直接为双偏振雷达而设计, 这就有可能使天线匹配状况变差。由于 H 和 V 偏振天线辐射特性的不匹配会对偏振测量参数 (如 Z_{DR}) 产生重要影响。因此, 本文采用了天线辐射理论模式来计算 CINRAD/ SA 天线对有关偏振测量参数所产生的误差, 由此可进一步评估 CINRAD/ SA 的天线性能, 确定对天线不匹配状况的技术改造要求。

5.1 目标后向散射和天线辐射模式

按照 Chandrasekar^[10] 的表示方法, 线性偏振天线的模式场可由 4 个天线模式完整地描述, $f_{HH}(\theta, \phi)$, $f_{HV}(\theta, \phi)$, $f_{VH}(\theta, \phi)$ 和 $f_{VV}(\theta, \phi)$ 组成了一个天线模式矩阵

$$f(\theta, \phi) = \begin{pmatrix} f_{HH} & f_{VH} \\ f_{HV} & f_{VV} \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, f_{HH} 是水平通道对水平偏振信号的响应, f_{VH} 是水平通道对垂直偏振信号的响应 (水平通道接收到的垂直发射信号), f_{HV} 是垂直通道对水平偏振信号的响应, f_{VV} 是垂直通道对垂直偏振信号的响应, θ, ϕ 表示球坐标系下通常的方位角和仰角。

雷达波束照射在单个的散射粒子上将会产生后向散射信号, 返回信号在雷达天线输入端产生的电压值可表示为

$$E_r = C f^T S f \exp(-2\gamma_0 r_l) E_i \quad (4)$$

式中, E_i 是发射电压, 常数 $C = (\hat{j}\sqrt{4\pi r^2})$, S 是后向散射矩阵, T 表示矩阵的转置, $\gamma_0 = jk_0$ 是传播常数, 指数项 $\exp(-2\gamma_0 r_l)$ 是信号到达散射粒子并返回的传播影响。对于弥散的随机分布的气象目标散射粒子, 使用 H, V 接收通道电场信号 $E_{H,V}$ 表示的

平均功率为

$$\overline{P_{H,V}} = \langle \sum |E_{H,V}^l|^2 \rangle \quad (5)$$

式中 $E_{H,V}^l$ 是第 l 个散射粒子在 H 和 V 通道的接收电压, $||$ 表示取模。把式(4)代入式(5), 将后向散射矩阵 S 中的元素以等效的雷达反射率 Z_{HH} (第 1 下标表示接收通道, 第 2 下标表示发射信号的偏振状态, 其他量的表示方法相同), Z_{HV} , Z_{VV} 和 Z_{VH} 代替, 在单位立体角内积分, 由此可给出在交替发射 H 和 V 信号时的 H (和 V) 通道在单位体积内的平均接收功率

$$\overline{P_{HH}} = \int (f_{HH} Z_{HH} + f_{HV} Z_{HV}) f_{HH} + (f_{HH} Z_{VH} + f_{HV} Z_{VV}) f_{HV} d\Omega \quad (6)$$

当雷达同时发射水平和垂直偏振波时, 电场矢量 E_i 的值为式(1), 本文在以上工作的基础上, 给出在同时发射和同时接收体制下的 H, V 通道平均功率为

$$\overline{P_H} = \int (f_{HH} Z_{HH} + f_{HV} Z_{HV}) f_{HH} + (f_{HH} Z_{VH} + f_{HV} Z_{VV}) f_{HV} + (f_{HH} Z_{HH} + f_{HV} Z_{HV}) f_{VH} + (f_{HH} Z_{VH} + f_{HV} Z_{VV}) f_{VV} d\Omega \quad (7a)$$

$$\overline{P_V} = \int (f_{VH} Z_{HH} + f_{VV} Z_{HV}) f_{VH} + (f_{VH} Z_{VH} + f_{VV} Z_{VV}) f_{VV} + (f_{VH} Z_{HH} + f_{VV} Z_{HV}) f_{HH} + (f_{VH} Z_{VH} + f_{VV} Z_{VV}) f_{HV} d\Omega \quad (7b)$$

5.2 天线产生的差分反射率和退偏振比的系统误差

有研究表明 CINRAD/SA 使用同时发射同时接收(STSA)体制比交替发射和接收(HV)体制具有更好的优越性^[9]。但是 STSA 体制的 H 和 V 接收通道信号并不是“纯粹”的共极化信号, 这是由于散射退偏振项会耦合交叉极化信号到共极化信号中。这一点与 HV 体制不同, Sachidananda^[11]也指出, H 和 V 偏振通道同时采样误差要大于 H 和 V 通道交替采样误差。因此, 分析交叉极化的影响是考查 CINRAD/SA 天线是否支持双偏振升级的关键问题之一。

在 STSA 方式下, Z_{DR} 是 H 和 V 两个通道平均接收功率的比值, 即为 $Z_{DR} = \overline{P_H} / \overline{P_V}$ 。为考查天线辐射对偏振变量的影响, 假定散射粒子为球形粒子,

则 $Z_{HH} = Z_{VV}$ 且 $Z_{HV} = Z_{VH} = 0$, 所以, 利用式(7a)和(7b)可确定天线辐射引起的 Z_{DR} 误差可写为

$$Z_{DR}^b = \frac{\int f_{HH}^2 + f_{HV}^2 + f_{HH}f_{VH} + f_{HV}f_{VV} d\Omega}{\int f_{VH}^2 + f_{VV}^2 + f_{VH}f_{HH} + f_{VV}f_{HV} d\Omega} \quad (8)$$

天线的整体交叉极化比(Integrated Cross-Polar Ratio, 表示为 I_{CPR}) 等于天线发射线偏振时的整体交叉极化能量与整体共极化能量的比值。 I_{CPR} 表示线偏振系统天线误差的“单程”影响, 在接收后向散射能量时会再次产生交叉极化耦合, 因此“双程”交叉极化影响为 $(I_{CPR} + 6)$ dB^[12]。在上述同样假定条件下, I_{CPR} 简化为

$$I_{CPR} = \frac{\int f_{HH}f_{VH} + f_{HV}f_{VV} d\Omega}{\int f_{HH}^2 + f_{VV}^2 d\Omega} \quad (9)$$

在实际的天线测量中只有功率辐射方向图, 而没有位相的测量值, 因此由天线造成的整体差分相位变化的系统误差 ϕ_{DR} 不能确定。但是, 实际应用中总是使用差分位相随距离的变化率 K_{DP} , 这个量是一个与系统定标误差无关的偏振参量。因此, 本文不再考虑天线对差分相位变化的影响。

实际工作中获得三维分布的辐射方向图是困难的, 也是不必要的。本文利用 CINRAD/SA 在 0° 和 90° 两个切割面、方位和仰角为 (-90°—90°) 范围内的共极化和交叉极化功率辐射方向图数据, 由式(8)和(9)分别求算了 Z_{DR}^b 和 I_{CPR} 。

由天线辐射不均匀产生的 Z_{DR}^b 为 -0.1064 dB, 该值小于实际工作中可允许的 Z_{DR}^b 误差绝对值 0.2 dB。NCAR CP-2 雷达天线的 Z_{DR}^b 的理论计算最优值为 0.355 dB, 通过低仰角小雨测量定标方法实际测得的 Z_{DR}^b 为 0.42 dB。CINRAD/SA 的 Z_{DR}^b 理论值远好于 NCAR CP-2 雷达天线 Z_{DR}^b 的理论值, 这表明现用天线性能的辐射状况是良好的, 双线偏振改造后的 CINRAD/SA 天线应当满足 Z_{DR}^b 测量精度的要求。需要说明的是双线偏振改造后, 辐射馈源将改为双通道, 受增大的馈源阻挡影响旁瓣会有所增加。为考查旁瓣提高后对 Z_{DR}^b 的影响, 本文将水平偏振辐射方向图在 0° 和 90° 两个切割面、范围在主瓣 (-1.3°—+1.3°) 以外的功率增加了 5 dB 后, 重新计算了 Z_{DR}^b 值, 结果为 $Z_{DR}^b = -0.1068$ dB, 表明这种改变对 Z_{DR}^b 的影响很少。这是由于天线辐射的

能量主要集中在天线主瓣,而旁瓣中辐射出的能量是相对很小的一部分。另外, Z_{DR}^b 是水平偏振辐射和垂直偏振辐射的比值,由于仅改变旁瓣的大小还不会引起二者间的较大差别,故 Z_{DR}^b 的变化不明显。

由类似的方法求出的 I_{CPR} 值为-54.865 dB。当退偏振比(DR)定义为交叉极化能量与共极化能量的比时^[13-14],对于HV体制下的线退偏振比(LDR)和STSA体制下的线倾斜($\pm 45^\circ$)退偏振比(SLDR)的测量,远满足对天线 I_{CPR} 的要求(≈ 30 dB)。NCAR CP-2 雷达的 I_{CPR} 的理论计算的最优值为-44.4 dB,通过低仰角小雨测量定标方法实际测得的 I_{CPR} 为-30 dB。对比NCAR CP-2 雷达的理论 I_{CPR} 值,双线偏振改造后的CINRAD/ SA的 I_{CPR} 标定值应好于30 dB。

以上分析表明,CINRAD/ SA 天线的水平辐射和垂直辐射的匹配状况是良好的,产生的差分反射率误差约为0.1 dB,满足双线偏振对 Z_{DR} 的测量要求。天线辐射交叉极化能量耦合很小,测量线退偏振比时对 I_{CPR} 的要求(≈ 30 dB)。

6 结 论

(1) 本文测量了CINRAD/ SA 雷达的天线辐射方向图,获得了CINRAD 天线辐射数据,为双线偏振升级提供了依据。通过天线的主瓣、旁瓣、交叉极化电平等天线辐射特性分析,表明CINRAD/ SA 天线具有良好的辐射性能,主瓣波束均匀,旁瓣和交叉极化电平均优于设计指标值;垂直极化的主瓣对称性略差于水平极化主瓣,但通过必要的调整可得以完善。

(2) 通过与WSR-88D 雷达双线偏振改造前后的辐射特性比较,表明CINRAD/ SA 天线辐射性能接近于WSR-88D 的天线性能。参照WSR-88D 双线偏振改造后对旁瓣电平的影响,虽然CINRAD/ SA 改造后的旁瓣电平估计值有可能出现在技术指标值(-27.0 dB)左右,但通过减少支撑杆阻挡和减小二次散射等可以使旁瓣电平降低几个分贝,从而能够满足双线偏振测量的要求。

(3) 在同时发射和同时接收双线偏振收发体制下,由天线水平和垂直偏振辐射不均匀产生的 Z_{DR} 误差和偏振交叉耦合项 I_{CPR} 足够小且在统计误差范围内,能满足CINRAD/ SA 双线偏振改造要求。

(4) 采用三杆支撑馈源方式,不会提高旁瓣电

平,有利于提高双线偏振测量精度,对水平和垂直偏振辐射不匹配所产生的系统误差,可通过定标予以消除。

综上所述,现用雷达天线具有良好的辐射性能,完全支持CINRAD/ SA 双线偏振升级,改造后的天线系统可以满足双线偏振测量要求。

参考文献

- [1] Zrnic D S, Zahrai A, Doviak R J, et al. Polarimetric upgrades of NOAA'S WSR-88D research and development radar. Preprints 13th IIPS, Longbeach, C A, Amer Meteor Soc, 1997, P9, 5
- [2] Doviak R J, Bringi V, Ryzhkov A, et al. Considerations for Polarimetric Upgrades to WSR-88D Radar. J Atmos Oceanic Technol, 2000, 17: 257-278
- [3] Schuur T J, Joint R C, Elvander J G, et al. Fulton Polarization Experiment (JPOL E) for the WSR-88D Radar: Plans and Progress. Preprints, 18th International Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS), Orlando, Florida, American Meteor Soc, Boston, 2002
- [4] Xu Baoxiang, Wang Zhijun, Cai Qiming. Study on application of C-band dual linear polarization radar in meteorology. Acta Meteor Sinica, 1991, 5(3): 286-292
- [5] 刘黎平,王致君,徐宝祥等.我国双线偏振雷达探测理论及应用研究.高原气象,1997,16(1): 99-104
Liu L P, Wang Z J, Xu B X. A study on dual-polar radar detection theory and application in China. Plateau Meteor (in Chinese), 1997, 16 (1): 99-104
- [6] M I 斯科尔尼克.雷达系统导论.林茂庸等译.北京:国防工业出版社.1992. 575pp
Skol M I. Introduction to radar system. Beijing: National Defence Industry Press Of China, 1992. 575pp
- [7] Doviak R J, Bringi V, Ryzhkov A, et al. Polarimetric Upgrades to improve rainfall measurements. Report of the National Severe Storms Laboratory, 1998
- [8] Schrank H E, Evans G E, Davis D, et al. Chapter 6 in Radar Handbook, McGraw Hill. 1970
- [9] 梁海河. WSR-98D 雷达双线偏振升级预研究[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2003
Liang H. A study on Dual polarimetric upgrades for WSR-98D in China [Dissertation]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Science. 2003
- [10] Chandrasekar V, Keeler R J. Antenna pattern analysis and measurements for multiparameter radars. J A Oceanic Technol, 1993, 50: 674-683
- [11] Sachidananda M, Zrnic D S. Z_{dr} measurement considerations for a fast scan capability radar. Radio Sci, 1985, 20: 907-922
- [12] Bringi V N, Hendry A. Technology of polarization diversity

- radars for meteorology. Radar In Meteorology. 1990
- [13] Torlaschi E, Holt A R. A comparison of different polarization schemes for the radar sensing precipitation. Radio Science, 1998,33(5):1335-1352
- [14] Matrosov S Y, Reinking P R, Kropfli R A. On the use of radar depolarization ratios for estimating shapes of ice hydrometeors in winter clouds. J A Meteor, 2001,40:470-490

CINRAD/ SA RADIATION PATTERN AND FEASIBILITY FOR DUAL POLARIZATION UPGRADES

Liang Haihe¹ Xu Baoxiang¹ Liu Lipin¹ Cao Yuchun² Zhang Jianyun³ Liang Zanning⁴

1 Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081

2 Technological Center of Atmospheric Observation of CMA, Beijing 100081

3 Beijing MetStar Radar Co., Beijing 100085

4 Shijiazhuang No. 54 Institute Antenna Serve Department, Shijiazhuang 050068

Abstract

Polarization measurements require higher radar performance. This study measures and analyzes firstly CINRAD co-polar and cross-polar antenna radiation patterns, and evaluates synthetically CINRAD/ SA radiation patterns. Results of the mainlobe, sidelobe, and cross-polar level analyses show that the CINRAD/ SA antenna has good performances, the mainlobe radiation is basically symmetry, and the sidelobe and cross-polar level are better than the design targets, but the vertical mainlobe is not as good as the horizontal mainlobe. In comparison with the influence on the sidelobe of NEXT WSR-88D polarimetric upgrades, the CINRAD/ SA radiation patterns are close to the NEXRAD WSR-88D's. The CINRAD/ SA sidelobe level after upgrades will be about -25 dB below target value -27 dB, so we suggest some enhancement measures to decrease the sidelobe by reducing the obstruct of support spars. After adopting such adjustment, we ensure that the current antenna of CINRAD/ SA is feasible for polarimetric upgrades. In the context of the radiation pattern measurements of the antenna characteristic, we examined the errors of Z_{DR} and L_{DR} , their values are still within the range of the statistical errors of polarimetric measurements. We ensure that the CINRAD/ SA antenna could be used to polarization alteration.

Key words: CINRAD/ SA, Radar antenna, Radiation pattern, Polarization upgrade.

梁海河等：CINRAD/SA雷达天线的辐射特性分析 及其支持双线偏振升级的可行性研究

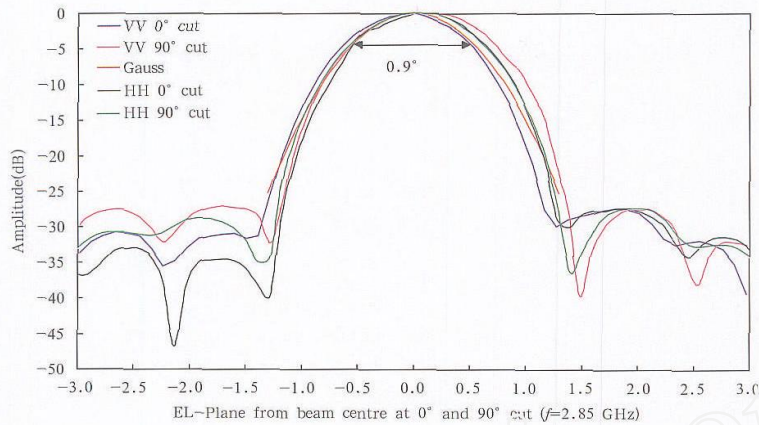


图4 CINRAD/SA水平和垂直偏振主瓣辐射方向

Fig.4 The main lobe comparison between V and H copolar radiation at 0° and 90° cut

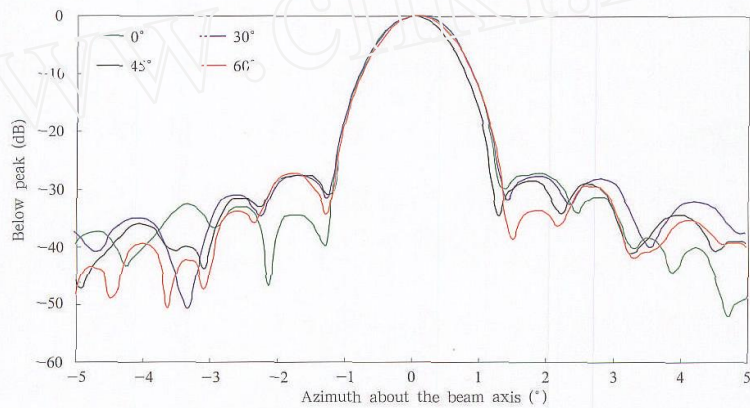


图5 CINRAD/SA水平偏振在不同切割面上的辐射方向

Fig.5 The main lobe comparison between 0°, 30°, 45°, 60° cut of HH patterns

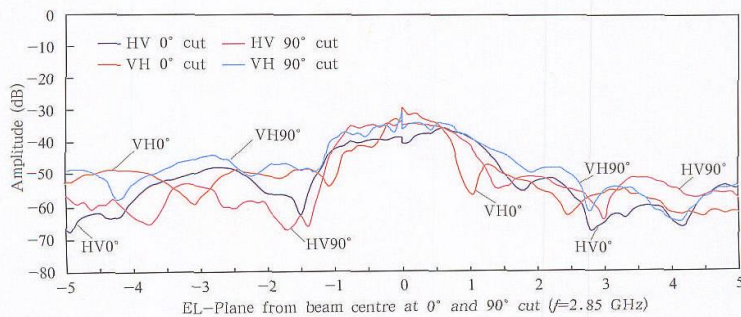


图6 CINRAD/SA水平和垂直偏振波交叉耦合辐射方向

Fig.6 The cross-polar HH and VV polarized radiation patterns of CINRAD/SA