三坐标雷达测高分析及修正手段

刘峰
中国电子科技集团公司第十四研究所 江苏 南京 210000

摘 要 三坐标雷达具备测量距离、方位和高度信息的功能，在日常使用过程中，经常会出现测高误差大的问题，为解决该问题，本文简单介绍了比幅测高原理，重点分析了影响测高的因素，并根据分析结果，对天线相位补偿码中的误差进行了修正。

关键词 比幅测高；接收波束；远场测试；修正；测高精度

Analysis and Correction Methods for Three-Coordinate Radar Altitude Measurement

Liu Feng
The 14th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210000, Jiangsu Province, China

Abstract Three-coordinate radar is capable of measuring range, azimuth, and height information. In daily operation, significant errors in height measurement frequently occur. To address this issue, this paper briefly introduces the principle of amplitude-comparison height measurement, with a focus on analyzing the factors that influence height measurement accuracy. Based on the analysis results, corrections are applied to the errors within the antenna phase compensation code.

Key words Amplitude Comparison Height Finding; Receive Beam; Far-Field Testing; Correction; Altitude Measurement Accuracy

某型三坐标雷达方位采用机扫，俯仰采用电扫，测高采用的是比幅测高。该雷达在使用数年后，通过ADS-B信号与雷达的测高数据进行比较分析，发现测高误差较大并得出仰角误差数据。本文对影响雷达测高精度的因素作了分析，通过定量的计算对误差进行修正，通过调整天线相位补偿数据，对测高误差进行修正。

1 比幅测高原理

常规相控阵雷达所采用的测角方法是单脉冲测角，单脉冲测角方法主要有三种：比幅测高、相位和差测高、幅度比较和差测高法。比幅测高法是相控阵雷达里常用的一种测高法，其原理图如图1所示[1]。

相控阵雷达通过比幅测角[2-3]，需通过馈线系统形成2个相互覆盖的波束$F_1(\theta)$与$F_2(\theta)$。2个波束相交的方向为θ_0，它们的最大值方向分别为θ_1和θ_2。图2所示的目标位置靠近右边方向图$F_2(\theta)$的最大值指向。2个接收波束各对应一个接收通道。图1中的G_1、G_2分别表示2个通道的接收增益，通过比较两路接收通道的信号幅度，可以确定目标所处的位置。由于此幅度比较过程可以在一个回波脉冲的持续时间内完成，因此这种方法被称为单脉冲测角法。

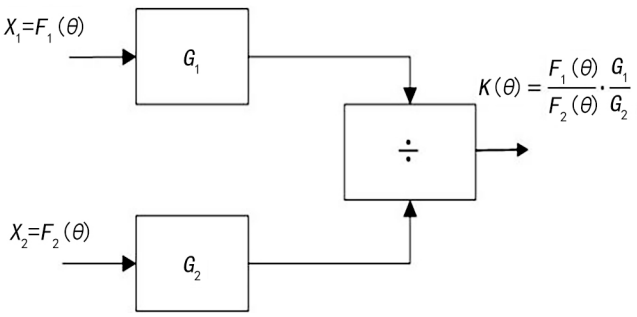

图1 比幅测高基本原理图

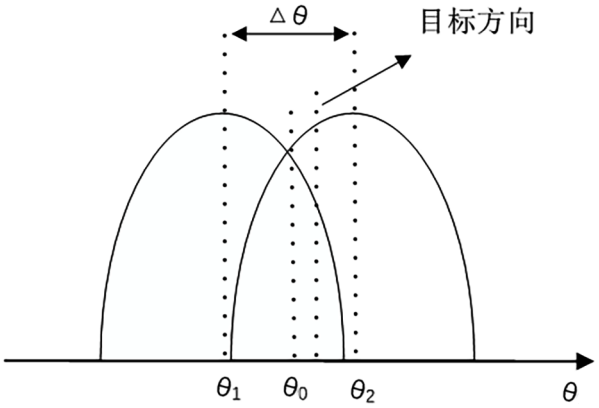

图2 相互覆盖相邻接收波束

比幅测角有2种方式[4]，当接收机为线性接收机时，两路接收机输出要用除法运算实现幅度比较。幅度比较后输出的值为$L(\theta)$，$L(\theta)$为目标所在的位置函数，$L(\theta)$可表示为：

$$L(\theta)=\frac{F_1(\theta)}{F_2(\theta)}\times\frac{G_1}{G_2} \quad (1)$$

对两路接收机信号分别取对数，再进行相减，幅度比较器输出为$K(\theta)$，在两路对数放大器增益一致的条件下，$K(\theta)$可表示为：

$$K(\theta)=\ln\frac{F_1(\theta)}{F_2(\theta)}=\ln F_1(\theta)-\ln F_2(\theta) \quad (2)$$

这一方法既简化了运算量，又便于压缩接收机的动态范围。雷达使用这2种方法进行比幅测角，必须要有多个接收波束才具备比幅测角条件，若只有1个接收波束，则无法进行比幅测角。运用这种对相邻接收波束输出的信号幅度进行直接比较的方法，需要天馈线系统能在目标方向上形成多个相邻的接收波束，用以分别测量各个高度层的目标。各个高度层的目标至少能够落在2个波位的波束里面，通过比幅测高，得出正确的仰角值。

2 测高误差分析及修正

雷达在使用过程中，经常会出现测高误差大的现象，当出现这种问题时，主要从以下几方面进行检查分析。

2.1 接收通道一致性检查

接收通道的幅度一致性超过指标范围时，会影响测高精度。可以通过示波器或者频谱仪检查各接收通道的幅度，各接收通道间幅度值正常控制在2 dB范围内；若超出该范围，需要判断送给接收通道的信号异常还是接收通道自身输出的信号异常，并根据实际情况更换相应的故障件。

2.2 天线平台水平度检查

检查天线平台的水平度，平台水平度的误差要在指标范围内，否则会影响测高精度。检查平台水平度时，先将天线工作于调平状态，对平台进行调平，调平结束后，确认调平后的水平度符合指标要求。再将天线架设为工作状态并进行转动，以1转/min的转动速度进行转动检查，若天线转动起来水平度有几十分的跳变，应检查方位大盘齿轮和方位轴承是否缺润滑脂。正常情况下，清洗大盘齿轮，重新给轴承和大盘齿轮加润滑脂；若问题不能解决，应考虑方位轴承或方位大盘齿轮问题，需要将天线转台进行相应的分解，对方位轴承和方位大盘齿轮进行深度检查。在方位轴承和方位大盘齿轮正常的情况下，天线以1转/min的速度进行转动，水平度的跳变应该在几分范围内波动。

2.3 动态水平仪的完好性检查

当雷达天线在转动状态下工作时，整个天线的水平度会有正常的波动，动态水平仪需要将数值实时送给雷控，雷控再将数值送给数据处理进行补偿修正。若动态水平仪出现故障，就会影响测高误差。需要对动态水平仪的状态进行确认：在天线不动的状态下，动态水平仪的数值应该会有几分的跳变；若没有跳变，一般情况下属于水平仪故障。在动态水平仪完好的基础上，需要确认其数值是否送至数据处理系统，可通过记录数据处理的数据来确认其状态。

2.4 天线俯仰角校准

天线仰角需进行确认，若天线仰角超出设计范围，会给测角带来误差。例如，仰角误差0.1°，300 km的目标误差大约500 m。若天线俯仰角误差大，应协调专业的标校人员对天线仰角进行标校，至少要对4个方位的仰角值进行标校，如在0°、90°、180°和270°位置进行俯仰标校，并将标校出来的误差均值在伺服系统或雷达控制系统里进行修正。

2.5 检查天线阵面的行馈单元

天线阵面行馈单元的完好性无法通过雷达自身的内监测功能检查，需要用网络分系统仪对天线阵面所有行馈单元逐个进行检查，测试相位、驻波和损耗是否满足指标要求。若行馈单元出现进水或受潮现象，其相位、驻波和损耗都比较差，需要用充气机或烘干机将天线里面的水或潮气处理干净，直至指标正常。若天线行馈单元有进水或进潮气现象时，要找出漏水点或渗水点，修复完成后，再通过淋雨试验检查修复效果，测试结果应该满足指标要求。若修复后的行馈单元通过淋雨试验后依然会出现指标不达标，建议直接更换新的行馈单元，确保整个天线阵面顺利通过淋雨试验，且阵面各行馈单元的指标均满足要求。在更换行馈单元时，需要注意安装后的行馈单元水平度，避免因安装带来新的系统误差。

2.6 校准接收波束指向

通过以上5种状态的检查，在都正常的前提下，若雷达测高误差还是比较大，则需要对天线接收波束的指向进行检查。通常情况下，检查天线接收波束的指向有2种方式：近场测试和远场测试[5-7]。

近场测试是将探头（探头需根据雷达实际工作频段进行选择）紧靠天线阵面，离天线阵面2～3个波长。这种测试方法要有高精度的扫描器测试架、探头、测控机柜等设备，通常在微波暗室里进行。近场测试时需要将天线平台上、地面及相关的金属平面铺设一些吸波材料，否则会影响测试指标。

由于近场测试的要求相对比较高，只有雷达生产厂家才有这样的环境条件，若将担负任务的装备送至雷达厂家进行近场测试，一般不可能影响装备值班。因此应尽量选择在雷达阵地进行接收波束校准的校准测试，不采用近场测试的方式。

远场测试，需在远场的环境下进行。远场测试工作，最常用、最标准的远场距离公式是：

$$R \geqslant \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3)$$

式中，R—代表远场距离；D—天线在测试平面上的最大物理尺寸；λ—工作波长。

这个公式是判断天线是否具备远场工作的最基本条件。只有在远场条件下测试天线的参数才能准确有效。一般情况下，雷达所选择的阵地至少有一个方位满足远场要求且没有遮挡。在进行接收波束指向验证时，通常验证波位较低的波束指向。

在验证过程中，若发现波束指向有误差，可以将该误差值在天线相位补偿数据里进行修正，重新生成一组波控相位补偿码烧至波控板里面。最后雷达开机，通过探测民航来验证测高精度。

3 结束语

当遇到三坐标雷达测高不准时，首先要分析是雷达自身原因还是阵地周围环境所引起的误差。若是阵地环境引起的测高不准，应尽量改善阵地环境；若是雷达自身引起的测高误差，主要从本文归纳的几方面进行分析。本文的测高分析及修正方法，已在几十套相关雷达上得到验证，验证效果良好，测高精度得到显著提升。若将天线运回暗室进行近场测试，不仅成本较高、周期较长，也不能满足装备值班需求。

参考文献

[1]丁鹭飞,耿富录.雷达原理[M].西安:电子科技大学出版社,2001.

[2]BARTON D K,WARD H R. Handbook of radar measurement[M]. Norwood:Artech House,1984:368-369.

[3]邵余峰.高机动三坐标雷达比幅测高误差分析与修正[J].现代雷达,2007,29(4):79-81.

[4]张光义.相控阵雷达系统[M].北京:国防工业出版社,1994.

[5]SKOLNIK M I. Introduction to radar systems[M].3rd ed.New York: McGraw-Hill,2001:495-496.

[6]孔凡泉,胡丙华.影响地面雷达测高精度的因素[J].现代电子技术,2014(7):34-39.

[7]郦能敬.对空情报雷达的频率优选[J].雷达科学与技术,2006,3(1):1-6.

（本文编辑　曹　阳）

