

# 基于波瓣分裂的米波雷达低仰角测高方法及其应用

陈伯孝<sup>1</sup>, 胡铁军<sup>1</sup>, 郑自良<sup>2</sup>, 王 锋<sup>1</sup>, 张守宏<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071; 2. 南湖机械总厂, 湖北荆州 434000)

**摘 要:** 针对米波雷达的波束较宽、由于地面反射引起波瓣分裂, 通常只能估高而不能测高这一难题, 提出一种基于分裂波瓣的米波雷达低仰角测高方法——比相比幅法。该方法采用多个不同高度的测高天线, 由于不同高度天线的分裂波瓣有一定的相位关系, 利用该相位关系确定目标所在仰角区间; 利用不同天线接收信号幅度进行比幅处理提取归一化误差信号; 再查表得到目标的高度。分析地面起伏对测高精度的影响; 推导不同阵地情况下的比幅误差曲线。将该方法应用于某型雷达, 在我国首次成功地进行了米波雷达测高。试验结果表明该方法是行之有效的。

**关键词:** 米波雷达; 测高; 多径; 波瓣分裂

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 06-1021-05

## Method of Altitude Measurement Based on Beam Split in VHF Radar and Its Application

CHEN Bai-xiao<sup>1</sup>, HU Tie-jun<sup>1</sup>, ZHENG Zi-liang<sup>2</sup>, WANG Feng<sup>1</sup>, ZHANG Shou-hong<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. General mechanism factory of Nan-Hu, Jingzhou, Hubei 434000, China)

**Abstract:** The altitude of a target can only be estimated roughly by very high frequency (VHF) radar for this kind of radar has a wide beam which is usually be split because of the reflection from the ground. To resolve this problem, the paper proposes an accurate and effective method for measuring the altitude based on beam split, namely, Phase comparison and Amplitude comparison. In this measuring system, several antennas of different heights are utilized. Owing to the certain relationship among the phases of the split beams of different antennas, the phases of the echoes can be used to determine the elevation region the targets locate. Using "Amplitude comparison" of echoes from various antennas to pick up the normalized error signals, the elevation of the target is obtained through looking up the table. An analysis of the effect on the altitude measurement accuracy caused by the roughness of ground is presented. This method has been used in some radar, and has been successfully used in the experiment of the altitude measurement in VHF radar. It has been proved that this approach is effective to measure the altitude of a target which has a rather low elevation.

**Key words:** VHF (Very High Frequency) radar; altitude measurement; multi path; beam split

## 1 引言

米波雷达由于其波长较长, 在反隐身、抗反辐射导弹等方面有其独特的优势, 近些年又受到世界各国的普遍重视, 把发展米波雷达放到雷达探测系统的重要位置<sup>[1]</sup>。但是米波雷达的波束较宽、由于地面反射引起波瓣分裂, 通常只能估计目标高度而不能用来测高, 而两坐标雷达难以满足现代战争的需要。现代战争要求雷达具有三坐标功能, 对米波雷达如何增加测高功能, 这是雷达界要解决的难题之一。

造成雷达低角跟踪困难的主要原因是与目标直达

波相干的地(海)面反射的多径信号的存在。人们对这个问题进行了大量研究<sup>[2~4]</sup>, 但实际上雷达的低角跟踪性能并未从根本上得到解决。解决雷达低角跟踪的根本措施是提高仰角分辨率, 人们又把重点放在利用阵列超分辨技术来解决雷达低角跟踪的问题<sup>[5,6]</sup>, 但这都需要增大天线垂直维的孔径。

常规雷达通常要避免地面反射产生多径效应的影响, 米波雷达由于波束较宽存在地面反射而引起波瓣分裂, 这一现象是不可避免的。为此本文提出一种新的米波雷达测高方法, 即利用多径效应产生的波瓣分裂, 由于不同高度的天线有不同的分裂波瓣, 并且它们之间有

一定的相位关系, 因此我们提出利用分裂波瓣的米波雷达低仰角测高方法, 称之为“比相-比幅”的测高方法. 本文在文献[7, 8]的基础上详细分析这种方法的工作原理和性能, 讨论典型阵地对测高精度的影响. 同时将该方法应用于某型雷达, 给出在我国首次进行米波雷达测高的检飞试验结果.

## 2 波瓣分裂现象

用波瓣进行测高, 必须波瓣对仰角敏感. 而波瓣分裂使得每一个波瓣的宽度变窄, 这为米波雷达测高带来可能. 当然如果只采用一副接收天线, 还是无法判断回波在哪个波瓣上, 因此需采用多个天线. 这里假设采用三个接收天线进行测高, 如图 1 所示,  $O_1$ 、 $O_2$ 、 $O_3$  为三个测高天线, 高度分别为  $H_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), 有一个主天线发射在  $O_2$  附近. 假设目标高度为  $H_T$ , 仰角为  $\beta$ , 斜距为  $R$ , 目标与天线间的水平距离为  $R_0$ . 有  $H_T = R \cdot \sin\beta \gg H_i$ ,  $R^2 = R_0^2 + H_T^2$ , 目标与接收天线间直达波的距离和地面反射波的波程分别为  $R_{0,i}$ 、 $R_{1,i}$  ( $i = 1, 2, 3$ ), 根据几何关系, 有

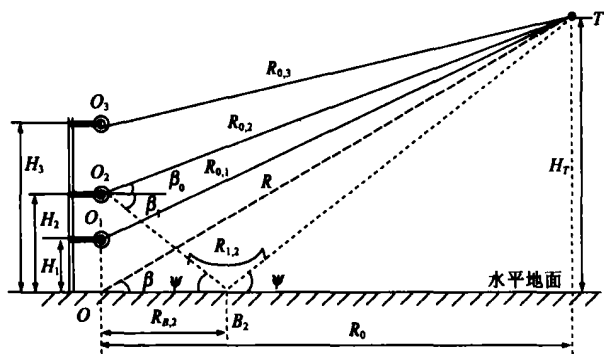


图 1 直达波和反射波的几何关系

$$R_{0,i} = \sqrt{R_0^2 + (H_T - H_i)^2} \approx R - H_i \sin\beta, \quad i = 1 \sim 3 \quad (1)$$

$$R_{1,i} = \sqrt{R_0^2 + (H_T + H_i)^2} \approx R + H_i \sin\beta, \quad i = 1 \sim 3 \quad (2)$$

两者的波程差为

$$d_{R,i} = R_{1,i} - R_{0,i} \approx 2H_i \sin\beta \quad (3)$$

在反射波影响下, 天线在仰角  $\beta$  的方向函数为

$$F_i(\beta) = F(\beta_0) + \Gamma \cdot F(\beta_1) \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} H_i \sin\beta\right] \quad (4)$$

其中:  $\lambda$  为波长;  $\Gamma = \rho_r \exp(j\varphi_r)$  为地面反射系数, 对水平极化, 在平坦地面, 可取  $\Gamma = -1$ , 即  $\rho_r = 1$ ,  $\varphi_r = \pi$ ;  $F(\beta)$  为各天线不考虑地面反射时的仰角方向函数,  $\beta_0$ 、 $\beta_1$  分别为直达波方向和反射波方向, 由于天线在俯仰维为宽波束, 在零度附近, 方向增益近似相等, 即  $F(\beta_0) \approx F(\beta_1)$ . 在远场情况, 且天线高度远小于目标高度, 有  $\beta_0 = \beta$ . 式(4)可表示为

$$F_i(\beta) = F(\beta) \left[ 1 - \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} H_i \sin\beta\right] \right]$$

$$= F(\beta) \cdot 2 \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda} H_i \sin\beta\right] \exp(j\varphi_i) \quad (5)$$

$$|F_i(\beta)| = F(\beta) \cdot 2 \left| \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda} H_i \sin\beta\right] \right| \quad (6)$$

其中  $\varphi_i = \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{\lambda} H_i \sin\beta$ .

由式(5)和式(6)可以发现:

(1) 当  $\frac{2\pi}{\lambda} H_i \sin\beta = n\pi$  ( $n$  为整数) 时,  $|F_i(\beta)| = 0$ , 即出现波瓣分裂现象; 分裂波瓣的波峰和波谷分别位于  $\sin\beta = \frac{2n+1}{4} \frac{\lambda}{H_i}$  和  $\sin\beta = \frac{n}{2} \frac{\lambda}{H_i}$ , 与波长和天线的高度有关.

(2) 相角  $\frac{2\pi}{\lambda} H_i \sin\beta$  在  $(2n\pi, (2n+1)\pi)$  和  $((2n+1)\pi, (2n+2)\pi)$  区间, 即当  $\sin\beta$  依次位于区间  $\left(\frac{n\lambda}{H_i}, \frac{(2n+1)\lambda}{2H_i}\right)$  和  $\left(\frac{(2n+1)\lambda}{2H_i}, \frac{(n+1)\lambda}{H_i}\right)$  时,  $F_i(\beta)$  的相位分别为  $\varphi_i$  和  $\pi + \varphi_i$ , 即相邻的分裂波瓣有“反相”关系.

图 2 给出了天线高度分别为 4m、7m、12m 时的波瓣图  $|F_1(\beta)|$ 、 $|F_2(\beta)|$  和  $|F_3(\beta)|$ .

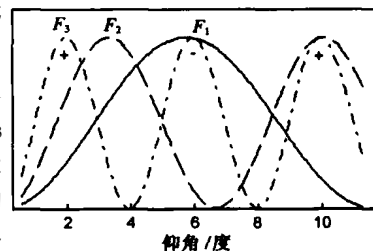


图 2 天线的波瓣图  $|F(\beta)|$

## 3 基于波瓣分裂的米波雷达测高方法

假设天线的高度差远小于距离分辨率, 在远场情况下, 第  $i$  个天线接收到由目标二次辐射的直达波和反射波的合成基带信号模型为:

$$\begin{aligned} U_i(\beta) &= F(\beta) \cdot [\exp(-jk \cdot R_{0,i}) + \Gamma \cdot \exp(-jk \cdot R_{1,i})] \\ &\approx \exp(-jk \cdot R) \cdot F(\beta) [1 - \exp(-j2k \cdot H_i \sin\beta)] \\ &= F(\beta) \cdot 2 \sin(k \cdot H_i \sin\beta) \exp(j\varphi_i) \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , 为波数;

$$\varphi_i = \frac{\pi}{2} - k \cdot H_i \sin\beta - k \cdot R \quad (8)$$

如果  $0 < k \cdot H_i \sin\beta < \pi$ , 即  $0 < \sin\beta < \frac{\lambda}{2H_i}$ , 这时两个天线接收信号的相位差为

$$\phi_{1,2} = \angle[U_1(\beta)] - \angle[U_2(\beta)] \approx k(H_2 - H_1) \sin\beta \quad (9)$$

式中  $\angle[\cdot]$  表示取相角, 相当于鉴相器. 由此可以利用该相位差来确定目标的仰角  $\beta$ . 但是, 当  $\lambda = 1.7\text{m}$ ,  $H_i = 12\text{m}$ , 则要求仰角  $\beta < 4^\circ$ , 因此直接利用鉴相的方法测量的仰角范围有限, 实用意义不大.

为了能够有效地进行高度测量, 根据前述所知, 首先要判断目标在哪一个分裂波瓣上, 或者说目标在哪一个高度区间. 由式(7)、(8)知接收信号的相位为  $\varphi_i$  或  $\pi + \varphi_i$ , 则两个天线接收信号的相位差  $\phi'_{1,2}$  为  $\phi_{1,2}$  或  $\pm\pi + \phi_{1,2}$ . 该相位差存在多值而不能直接用来测角, 但可以利用该相位差判断所在象限, 并按下式取符号函数, 得到

$$C_{12} = \text{sign}[\cos(\phi'_{1,2})] = \begin{cases} 1, & \cos(\phi'_{1,2}) \geq 0 \\ 0, & \cos(\phi'_{1,2}) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

同理, 对天线(1, 3)和(2, 3), 也可以得到  $C_{13}$  和  $C_{23}$ , 并称  $C_{12} C_{13} C_{23}$  为仰角编码. 它表示目标所在的仰角区间. 当天线的高度分别为 4m、7m、12m, 工作频率为 180MHz 时, 按式(5)和(10)计算的仰角编码及其区间如表 1 所示. 如果仰角  $\beta > 11.5^\circ$ , 仰角编码出现多值, 我们称之为“分区模糊”. 所以本文方法主要讨论的是低仰角测高.

在确定目标所在仰角区间后, 我们提出利用不同天线接收信号的幅度进行“比幅”处理, 即按式(11)提取误差信号

$$E_{12}(\beta) = \frac{|U_1(\beta)|^2 - |U_2(\beta)|^2}{|U_1(\beta)|^2 + |U_2(\beta)|^2} \quad (11)$$

将式(7)代入式(11)并化简得

$$E_{12}(\beta) = \frac{\sin^2\theta_1 - \sin^2\theta_2}{\sin^2\theta_1 + \sin^2\theta_2} = \frac{\sin(k(H_1 + H_2)\sin\beta)\sin(k(H_1 - H_2)\sin\beta)}{1 - \cos(k(H_1 + H_2)\sin\beta)\cos(k(H_1 - H_2)\sin\beta)} \quad (12)$$

式中  $\theta_1 = k \cdot H_1 \sin\beta$ ,  $\theta_2 = k \cdot H_2 \sin\beta$ .

同理, 可以计算得到误差信号  $E_{13}(\beta)$  和  $E_{23}(\beta)$ . 因此, 在测高时首先根据雷达当前的工作波长、天线的高度、在一定的仰角范围( $0.5^\circ < \beta < 11.5^\circ$ )按式(12)计算并建立比幅误差曲线表; 再根据式(11)计算的比幅值查表得到目标的仰角.

图 3 分别给出了误差曲线  $E_{12}(\beta)$ 、 $E_{13}(\beta)$  和  $E_{23}(\beta)$ . 由于波瓣分裂, 误差信号存在多值性, 不能直接解出高度信息. 但对每个仰角编码区间而言, 误差信号是单值的, 因此首先要根据仰角编码确定采用哪一条或两条误差曲线的哪一段比幅误差曲线进行查表. 例如, 如果  $\beta < 4^\circ$  时, 可采用误差信号  $E_{13}$ , 但如果  $E_{13} > 0.9$  时, 即仰角在  $4^\circ$  附近, 就不能根据  $E_{13}$  查表, 而应改用误差信号  $E_{12}$ . 因为在  $4^\circ$  附近, 误差信号  $E_{13}$  存在跳变, 灵敏度太低. 因此, 在不同的区间, 应选用斜率较大的误差曲线进行测高, 当然在有些仰角区间可以采用

两个甚至三个误差信号联合测高, 以提高测高精度.

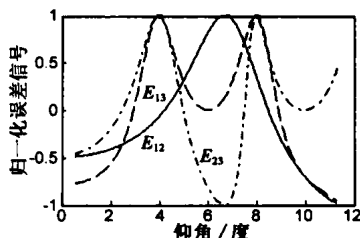


图 3 测高误差曲线

上述方法的使用要满足以下假设条件:

- (1) 每根天线在俯仰维的波瓣  $F(\beta)$  相同;
- (2) 每路接收通道的幅相特性一致;
- (3) 雷达架设在阵地平坦, 反射波的地面反射区与雷达在同一水平面内.

每根天线采用多个水平极化的对数周期天线阵子, 第一点在天线加工过程中可以得到保证; 第二点在通道均衡过程中实现; 第三点要求雷达架设在平坦阵地, 且地面起伏较小, 在后面进行讨论.

综上所述, 这种基于多个天线地面反射波进行测高处理时, 在对每个天线接收信号进行前端接收模拟处理、A/D 转换、相干积累、通道均衡等处理后, 再进行测高的步骤如下:

- (1) 根据雷达的工作频率、天线高度和地形情况, 按式(12)建立比幅误差曲线表;
- (2) 在雷达工作的休止期, 给三路接收机输入测试信号, 计算各路接收机的幅度和相位的不一致性, 并进行通道均衡处理;
- (3) 对三路接收信号相互之间进行比相处理, 得到仰角编码  $C_{12} C_{13} C_{23}$ , 由此确定目标所在仰角区间;
- (4) 按式(11)提取误差信号;
- (5) 根据仰角编码确定使用的误差曲线及其区间, 并按误差信号进行查表, 得到目标的仰角  $\beta$ ;
- (6) 根据目标的距离  $R$ 、仰角  $\beta$ , 并考虑地球的曲率, 计算目标的高度, 即

$$H = R \cdot \sin\beta + H_a + \frac{R^2}{2r_e} \quad (13)$$

其中  $r_e$  为地球等效半径,  $H_a$  为天线架设位置的海拔高度.

#### 4 测高性能分析

利用地面反射进行测高的方法自然受地面环境的影响较大, 其测高精度主要取决于三个方面: (1) 地面起伏; (2) 三路测高通道幅相特性的不一致性; (3) 信噪比. 下面主要讨论地面起伏的影响.

地面起伏对这种测高方法的影响可分四种情况: 在平坦阵地, 地面起伏小; 在平坦阵地, 地面起伏大; 在

斜坡阵地, 地面起伏小; 在斜坡阵地, 地面起伏大. 针对前两种情况, 各天线在地面反射中心基本在一个水平面上, 只是波束在地面照射区内的起伏不同. 假设地面起伏的均方根值为  $\sigma_h$  (均值为零), 由文献[9, 10]知, 对水平极化, 粗糙表面的平均地面反射系数为

$$\rho_r = \rho_0 \exp(-2k^2 \sigma_h^2 \sin^2 \Psi) \cdot I_0(k^2 \sigma_h^2 \sin^2 \Psi) \quad (14)$$

式中  $\rho_0$  为光滑地面的反射系数,  $\rho_0 = 1$ ;  $\Psi$  为擦地角;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $I_0(\cdot)$  为零阶修正的 Bessel 函数. 定义粗糙度  $D = (\sigma_h \sin \Psi)/\lambda$ , 它与地面反射系数的关系如图 4(a) 所示. 这时式(12)对应的误差曲线表由式(15)生成.

$$E_{12}(\beta) = \frac{2\rho_r \sin(k(H_1 + H_2) \sin \beta) \sin(k(H_1 - H_2) \sin \beta)}{1 + \rho_r^2 - 2\rho_r \cos(k(H_1 + H_2) \sin \beta) \cos(k(H_1 - H_2) \sin \beta)} \quad (15)$$

反射波可以被看成在地面反射波束照射区  $\Omega$  内回波信号的积分, 即

$$U_i(\beta) = \exp(-jk \cdot R_{0,i}) + \iint_{\Omega} \exp(-jk \cdot R_{1,i}) d\Omega \quad (16)$$

图 4(b) 给出了地面起伏产生的仰角测量误差, 图中横坐标表示地面起伏的均方根值  $\sigma_h$  (m), 可见地面起伏有 2m 时, 仰角测量误差将近  $0.15^\circ$ , 因此, 为了保证测高精度, 要求地面起伏的均方差不超过 1m.

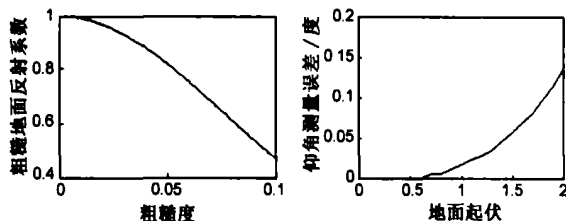


图 4 粗糙地面的反射系数和仰角测量误差

后两种情况属复杂阵地, 假设雷达架设在斜坡阵地, 如图 5. 假设地面反射区(菲涅尔区)与水平面可以近似用坡度  $\theta$  来表示, 突起时  $\theta$  为正, 对凹陷区  $\theta$  取负值. 对高度为  $H_i$  的天线, 地面反射区中心的高度为  $d$  ( $\ll H_T$ ), 与天线距离为  $R_B$ , 擦地角为  $\Psi$ , 根据几何关

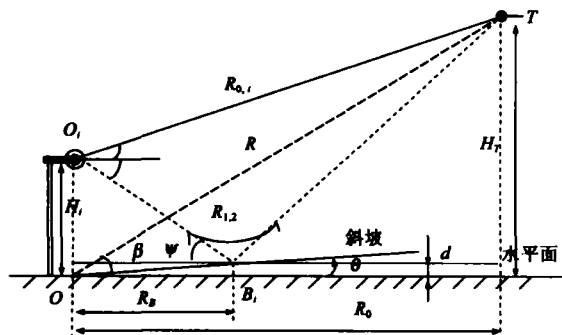


图 5 斜坡阵地的几何关系

系, 有

$$\tan \Psi = \frac{H_i - d}{R_B} = \frac{H_T + H_i}{R_0} \approx \tan \beta \quad (17)$$

$$R_B \approx \frac{H_i - d}{\tan \beta} \quad (18)$$

$$d = R_B \tan \theta \approx \frac{H_i \cdot \tan \theta}{\tan \beta + \tan \theta} \quad (19)$$

这时式(2)对应的反射波程为

$$R_{1,i} = \sqrt{R_0^2 + (H_T + H_i - 2d)^2} \approx R_0 + (H_i - 2d) \sin \beta \quad (20)$$

直达波与反射波的波程差为

$$d_{R,i} = R_{1,i} - R_{0,i} \approx 2(H_i - d) \sin \beta \quad (21)$$

根据式(7)和(11), 推导出这时的比幅误差曲线为

$$E_{12}(\beta) = \frac{\sin(\varphi_A) \sin(\varphi_B)}{1 - \cos(\varphi_A) \cos(\varphi_B)} \quad (22)$$

其中:

$$\varphi_A = k(H_1 + H_2) K_0 \sin \beta \quad (22a)$$

$$\varphi_B = k(H_1 - H_2) K_0 \sin \beta \quad (22b)$$

$$K_0 = \frac{1}{1 + \tan \theta} = \frac{1}{1 + \tan \theta / \tan \beta} \quad (22c)$$

$K_0$  表示斜坡阵地的修正系数; 在坡度  $\theta < 5^\circ$  情况下,  $K_0' = \tan \theta / \tan \beta \approx \theta / \tan \beta$ , 即表示相对于仰角余切的坡度.

如果阵地坡度为  $\theta$ , 平均地面反射系数为  $\rho_r$ , 由式(15)和式(22), 类似可推导出这时的比幅误差曲线为

$$E_{12}(\beta) = \frac{2\rho_r \sin(\varphi_A) \sin(\varphi_B)}{1 + \rho_r^2 - 2\rho_r \cos(\varphi_A) \cos(\varphi_B)} \quad (23)$$

综上所述, 对不同类型的阵地在测高前要建立不同的比幅误差曲线表. 对平坦阵地, 可按式(12)建立一组误差曲线表; 对起伏较大的阵地, 先按式(14)估计地面反射系数, 再按式(15)建立一组误差曲线表; 对斜坡阵地, 先测量在不同方向的坡度  $\theta$ , 再按式(22)或式(23)建立多组误差曲线表, 在不同方向采用相对应的误差曲线进行测高.

## 5 检飞试验结果

将本文方法应用于某型雷达, 雷达架设在平坦阵地, 图 6 给出了某次检飞试验结果, 图中实线是雷达实际测量得到的目标高度, 虚线是飞机上 GPS 记录的实际高度, 飞行高度约 7400m. 右图中测高的相对误差表

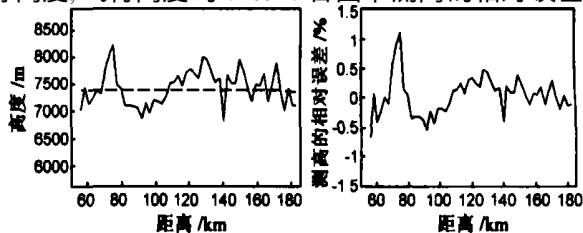


图 6 平坦阵地的检飞试验结果

示: (测量值-实际高度)/距离 $\times 100\%$ , 除个别测量值外, 测量误差基本在距离的 0.5% 以内(设计要求测高误差为距离的 2%)。

图 7 给出了在斜坡阵地的检飞试验结果, 斜坡坡度为  $0.8^\circ$ , 图中实线表示采用斜坡阵地的误差曲线, 实际测量得到的目标高度; 点划线表示按平坦阵地的误差曲线查表得到的结果; 虚线表示飞机上 GPS 记录的实际高度。由此可见, 采用平坦阵地的误差曲线时测高误差较大, 因此, 对斜坡阵地要采用相对应的误差曲线表, 才能有效地测高。

## 6 结论

本文介绍了基于波瓣分裂的米波雷达低仰角测高方法, 分析其机理和性能, 讨论了地面起伏对测高性能的影响, 分析推导了在不同阵地情况下比幅测高的误差曲线计算公式。该方法应用于某型米波雷达, 给出了两种典型阵地的检飞试验结果。试验结果表明: 地面起伏的均方差不超过 1m, 信噪比达到 16dB, 测高精度可以达到距离的 1%。这种测高方法既不需要增大天线在俯仰维的孔径(提高仰角分辨率, 并进行阵列超分辨率处理), 也不需要将雷达架设在很高的地方, 且运算量小, 实现相对简便一些, 是一种实用的米波雷达测高方法。当然, 该方法对阵地有一定的要求, 本文对典型阵地进行了一定的研究, 证明了该方法的实用价值。

## 参考文献:

- [1] H Kuschel, VHF/UHF radar, Part 1: Characteristics; Part 2: Operational aspects and applications[J]. Electron Commun Eng Journal, 2002, 14(2): 61-72; (3): 101-111.
- [2] White W D. Low-angle radar tracking in the presence of multipath[J]. IEEE Trans, 1974, AES 10(6): 835-852.
- [3] Trunk G V, et al. Bounds on elevation error estimates for a target in multipath[J]. IEEE Trans, 1979, AES 15(6): 883-887.
- [4] Zoltowski M, et al. Beamspace ML bearing estimation incorporating low angle geometry[J]. IEEE Trans, 1991, AES 27(3): 441-458.

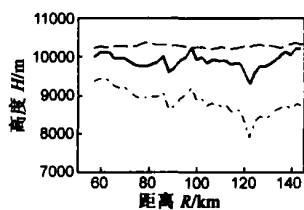


图 7 斜坡阵地的检飞试验结果

- [5] 赵永波, 张守宏. 雷达低角跟踪环境下的最大似然波达方向估计方法[J]. 电子学报, 2004, 32(9): 1520-1523.  
ZHAO Yong bo, ZHANG Shou hong. Maximum likelihood DOA estimation in radar low angle tracking environment[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(9): 1520-1523. (in Chinese)
- [6] 吴向东, 张守宏, 董玫. 一种基于线性预处理的米波雷达低仰角处理算法[J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1668-1671.  
WU Xiang dong, ZHANG Shou hong, DONG Mei. An algorithm based on linear preprocessing for meter-wave radars to a target at low altitude[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9): 1668-1671. (in Chinese)
- [7] CHEN Bai xiao, LIU Guo dong, ZHANG Shou hong. Method of altitude measurement based on beam split in multi antenna VHF radar[A]. Proc of the International Conference on Radar'04[C]. USA: IEEE, 2004. CD-10P-LFR-251.
- [8] 陈伯孝, 刘国栋, 张守宏. 一种简易的米波雷达测高方法[A]. 第九届全国雷达学术年会论文集[C]. 北京: 中国电子学会, 2004. 381-384.
- [9] M I Skolnik. Introduction to Radar Systems[M]. NK: Mc Graw-Hill Companies, 2001. Chapter 5.
- [10] M I Skolnik. Radar Handbook[M]. NK: Mc Graw-Hill Companies, 1990. Chapter 20.

## 作者简介:



陈伯孝 男, 1966 年 11 月生于安徽宿松, 1997 年获西安电子科技大学博士学位, 现任西安电子科技大学教授, 博士生导师, 研究方向包括新体制雷达系统与雷达信号处理、阵列信号处理、精确制导与目标跟踪等, 发表论文 50 余篇。  
E-mail: bxchen@xidian.edu.cn

胡铁军 男, 1966 年 3 月生于哈尔滨市, 现在西安电子科技大学攻读博士学位, 研究方向为米波雷达测高方法研究。

郑自良 男, 1966 年 1 月生于湖北孝感, 1988 年获西安电子科技大学学士学位, 现任南湖机械总厂副厂长、总工。

王 锋 男, 1981 年 9 月生于山西, 2004 年毕业于西安电子科技大学, 现在西安电子科技大学攻读硕士学位, 研究方向为米波雷达测高方法研究。

张守宏 男, 1938 年 6 月生于安徽六安, 1964 年毕业于西安军事电讯工程学院, 现为西安电子科技大学教授, 博士生导师, 长期从事雷达系统和雷达信号处理等领域的科研工作。