

双频雷达测高技术研究

汤子跃 朱振波 战立晓 柴徐
(空军雷达学院 武汉 430019)

摘要: 该文针对双频雷达的测高问题,研究了基于相位干涉原理的双频雷达测高方法。文中给出了相位干涉测角的基本原理,并针对该方法在双频雷达测高应用中存在的相位模糊问题进行了分析,在此基础上,给出了基于中国余数定理的双波段相位差解模糊处理方法,解决了双频雷达相位干涉测高法的相位模糊问题。最后对双频雷达相位干涉测高法的测高精度进行了分析。仿真分析,验证了算法的可行性。

关键词: 双频雷达; 测高; 相位模糊; 测高精度

中图分类号: TN959.2+2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)08-1874-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00738

Research on Height Finding Technique for Dual-frequency Radar

Tang Zi-yue Zhu Zhen-bo Zhan Li-xiao Chai Xu
(Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: To solve the problem of height finding of dual-frequency radar, based on the phase interference theory, the height finding technique of dual-frequency radar is studied. Firstly, the basic principle of phase interference angle measurement is given in the paper, and the corresponding problem of phase blur in the use of dual-frequency radar height finding is analyzed in detail, then the resolving phase difference ambiguity method which is based on Chinese Remainder Theorem (CRT) is provided. Finally, the height finding precision is discussed. As a result, it is a feasible height finding technique of dual-frequency radar, of which the validity is also proved by the simulation of computer.

Key words: Dual-frequency radar; Height finding; Phase ambiguity; Height finding precision

1 引言

双频雷达是一种能同时在两个波段上工作的新体制雷达。与常规雷达相比,双频雷达具有目标发现概率高和抗干扰能力强的显著特点,这使得双频雷达对复杂电磁环境具有很好地适应能力。雷达作为现代军事信息获取的重要传感器,其任务已不仅仅是完成对目标位置、角度与速度等信息的提取,还要求获取目标的高度信息^[1-3]。对于单载频雷达,同一目标的回波信号到达雷达俯仰域的两个(不同相位中心、方向图基本相同)接收波束时,由于存在一定的波程差,两路信号具有不同的相位,理论上可以根据其相位差反过来确定目标仰角,进而估算出目标的高度。实际中,由于回波相位差以 2π 为模,使得相位干涉法(或称为“比相法”)对中高空目标高度的测量不易实现^[4,5]。但是,双频雷达在“双频双通道”工作条件下,理论上具有相位差解模糊的可能,这样就为其实现测高功能提供了可能性。本

文着重就双频雷达的干涉测高技术进行了研究,并对该算法的测高精度进行了仿真分析。

2 相位干涉测角原理

相位干涉测角利用两接收波束所接收回波信号之间的相位差进行测角(在一个坐标平面)。如图 1 所示,两个波束的照射方向相同,且同时接收一定方向内的同一目标的回波信号。设两波束相位中心间距为 d (基线距离),若有一平面电磁波从天线视轴夹角 θ 的方向到达天线 1、天线 2,则两天线接收到的信号由于存在波程差 ΔR 而产生相位差 $\Delta\phi$,在满足远场条件下($R_T \gg d$), $\Delta\phi$ 可表示为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta \quad (1)$$

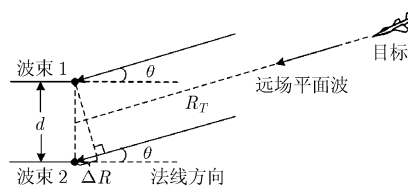


图 1 相位干涉测角原理示意图

式中 λ 为雷达波长。这样，如果能测出信号到达两天线的相位差 $\Delta\phi$ ，进一步可将信号到达的俯仰角 θ 表示为

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda \cdot \Delta\phi}{2\pi d}\right) \quad (2)$$

则目标的高度可以表示为

$$H = R_T \sin(\theta) \quad (3)$$

工程上，相位差 $\Delta\phi$ 的提取可以有多种方法，如采用鉴相器，或者直接采用数字方法求得两个接收通道的回波信号相位然后相减。实际处理时， $\Delta\phi$ 的求解存在相位差模糊问题，它是以 2π 为模的参数，即 $\Delta\phi = 2\pi N + \varphi$ ($|\varphi| < 2\pi$)， N 为整数。

工程上实现相位差 $\Delta\phi$ 的提取时，实际观测值只能得到 φ ，现在要求出 $\Delta\phi$ ，关键是要求出未知的模糊数 N 。对于一般测角问题， $\Delta\phi = 2\pi N + \varphi$ 包含两个方面的不确定性。

3 相位差模糊问题分析

(1) $\Delta\phi$ 的正负问题 在一般情况下，由于雷达架高有限，目标通常要高于两波束相位中心连线中点，由图 1 几何关系易知目标回波信号到达波束 2 的距离要比到达波束 1 的距离远，因此 $\Delta\phi > 0$ 。这样， $\varphi = \Delta\phi \bmod(2\pi)$ ， $\varphi \in [0, 2\pi)$ 且 N 为非负整数。

(2) N 的取值问题 由式(1)可知，相位差 $\Delta\phi$ 的大小主要与目标仰角 θ 、雷达波束相位中心间距 d 以及工作波长 λ 三者有关，其仰角特性曲线如图 2 所示，其中假设 $d = 3\lambda$ 。由图 2 的曲线可见：(1) 曲线单调上升，相位差与仰角一一对应；(2) 底部较陡(低仰角斜率大)，顶部较平坦(高仰角斜率小)，这样的分布对雷达测高来说是合适的。

与相位差 $\Delta\phi$ 的大小有关的目标仰角 θ ，其可能取值取决于雷达波束的形状。普通雷达天线在俯仰域通常采用余割平方赋形波束。为分析方便起见，可以将波束划分为高仰角区 ($6^\circ < \theta < 25^\circ$) 和低仰角区 ($0^\circ < \theta < 6^\circ$)。根据上述波束条件，分别进行

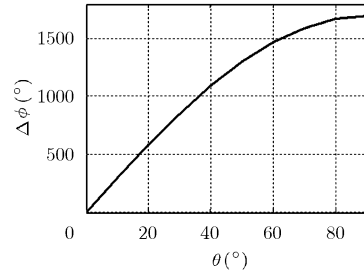


图 2 相位差仰角特性曲线

以下分析。

3.1 高仰角区

雷达工作在波段 1(如 L 波段)时，假设波段 1 波长为 λ_1 ，相位差为 $\Delta\phi_1$ 。如果取 $d = M\lambda_1$ ，则 $\Delta\phi_1$ 的可能最大值为 $\Delta\phi_{1\max} = 2\pi d \sin 25^\circ / \lambda_1 \approx 1.69M\pi$ 。可见，当 $M = 1$ 时没有相位差模糊，可以实现不模糊测角； $M > 1$ 时，相位差 $\Delta\phi_1$ 的可能最大值为 $\Delta\phi_{1\max} > 2\pi$ ，可能出现相位差模糊，如图 3(a)所示。

同样地，雷达工作在波段 2(如 C 波段)时，假设波段 2 波长为 λ_2 ，相位差为 $\Delta\phi_2$ 。此时 d/λ_2 较 d/λ_1 要增加几倍(如 L/C 波段时，大概为 4 倍)，则相位差 $\Delta\phi_2$ 的可能最大值为 $\Delta\phi_{2\max} > 2\pi$ ，可能出现多重相位差模糊，如图 3(b)所示。

3.2 低仰角区

同以上分析，在低仰角区，如果取 $d = M\lambda_1$ ，则 $\Delta\phi_1$ 的可能最大值为 $\Delta\phi_{1\max} \approx 0.42M\pi$ 。可见，当 $M \leq 4$ 时没有相位差模糊，可以实现不模糊测角； $M > 5$ 时，相位差 $\Delta\phi_1$ 的可能最大值为 $\Delta\phi_{1\max} > 2\pi$ ，出现相位差模糊，如图 3(a)的 $(0^\circ, 6^\circ]$ 区间范围所示。

同样地，雷达工作在波段 2 时， d/λ_2 较 d/λ_1 要增加几倍，其相对于波段 1 更容易出现多重相位差模糊，如图 3(b)的 $(0^\circ, 6^\circ]$ 区间范围所示。

3.3 相位差模糊问题分析

根据上述分析，可以得出以下初步认识：

(1) 在高仰角区，雷达在波段 1 工作时，只要适

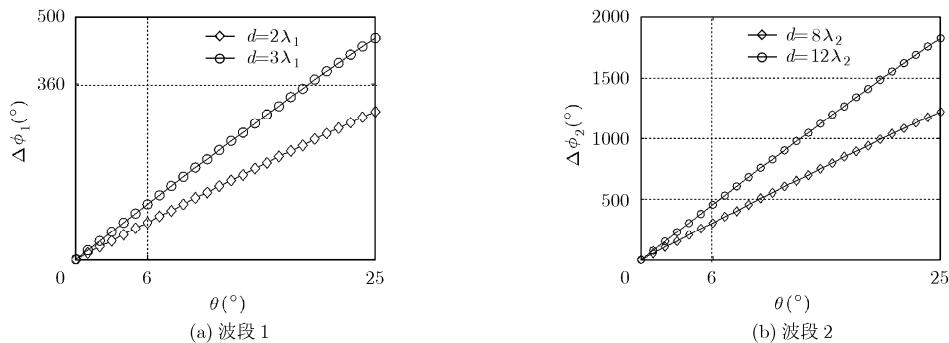


图 3 波段 1 和波段 2 的相位差仰角特性曲线

当控制两个波束相位中心间距(如 $d = 2\lambda_1$ 左右), 可以确保相位差不模糊(不模糊测角); 而在波段 2 工作时, 则会产生多重模糊。理论上, 具体控制两波束相位中心间距的方法如下:

由式(1)可得

$$d = \frac{\Delta\phi \cdot \lambda}{2\pi \sin\theta} \quad (4)$$

为了保证目标仰角 θ 小于等于 θ_{\max} 时, 信号相位差处于 $0 \sim 2\pi$ 之间, 设 $\theta = \theta_{\max}$ 时, $\Delta\phi = 2\pi$, 可得

$$d \leq \frac{\lambda}{\sin\theta_{\max}} \quad (5)$$

若两波束相位中心间距满足上式时, 当目标仰角 θ 小于 θ_{\max} 时, 相位差 $\Delta\phi \in (0, 2\pi)$, 即不存在相位差模糊, 实现不模糊测角。由式(5)得 $\theta_{\max} \leq \arcsin(\lambda/d)$, 即最大不模糊角度 θ_{\max} 与 λ/d 成正比, 但其测角精度与 λ/d 成反比关系, 所以最大不模糊角度与测角精度之间是一对矛盾。

如果不能有效控制两个波束相位中心间距(如 $d \geq 3\lambda_1$), 就有可能出现模糊。此时, 需要与波段 2 系统进行联合解模糊。

(2)在低仰角区, 雷达在波段 1 工作时, 在两个波束相位中心间距不太大的条件下, 可以确保不模糊测角; 而在波段 2 工作时, 适当控制两个波束相位中心间距(如 $d = 9\lambda_2$ 左右), 也能实现不模糊测角。

4 双波段相位差解模糊方法

如前面分析, 如果不能有效控制两个波束相位中心间距, 就有可能出现模糊^[6-8]。此时需要联合两个波段进行相位差解模糊。由脉冲雷达中多重脉冲重复频率(PRF)测距技术和多频连续波测距技术的启发, 本文给出了一种基于中国余数定理(Chinese Remainder Theorem, CRT)^[9]的双波段相位差解模糊处理方法, 该方法选择双波段波长满足一定的参差关系, 从而解决了测角精度与最大不模糊角度之间的矛盾(最大不模糊角度与 λ/d 成正比, 而测角精度与 λ/d 成反比关系)。

假设雷达采用双波段工作, 且两频段相差较大(如 L/C)。对于同一目标, 波段 1 和波段 2($\lambda_1 > \lambda_2$)工作时, 目标回波信号的相位差值可统一表示为

$$\Delta\phi_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} d \sin\theta = 2\pi N_i + \varphi_i, \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

适当地选择两个波束相位中心间距, 通常可以将 N_i 值控制在 0 或者 1。

先取定一基本雷达波长 λ_0 , 并令 $\lambda_i = m_i \lambda_0$ ($i = 1, 2$)(m_i 为参差比), 代入式(6)并整理可得

$$\frac{\sin\theta}{\lambda_0/d} = N_i \cdot m_i + \frac{\varphi_i}{2\pi} \cdot m_i \quad (7)$$

令 $P = \lambda_0/d$, $L = \sin\theta/P$, $r_i = (\varphi_i/2\pi) \cdot m_i$, 则式(7)可表示为

$$L = N_i \cdot m_i + r_i \quad (8)$$

在理想无噪声情况下, 式(8)为一个除数为整数的实数域内的同余方程, 它在由 m_i 所决定的最大不模糊角度之内存在唯一解, 且此时的实数域同余方程可以简化为整数域同余方程, 可利用中国余数定理巧妙地求解。此时最大不模糊角度 θ_{unamb} 可表示为

$$\theta_{\text{unamb}} = \arcsin(m_1 m_2 \cdot P) = \arcsin(m_1 m_2 \cdot \lambda_0/d) \quad (9)$$

实际中, 必须考虑噪声扰动的影响。假设由于噪声扰动在真实相位差 $\Delta\phi_i$ 上产生了大小为 $\delta\varphi_i$ 的误差, 令 $q_i = h_i - r_i = (\delta\varphi_i \cdot m_i)/(2\pi)$, $h_i = (\varphi_i + \delta\varphi_i) \cdot m_i/(2\pi)$, $\varphi_i + \delta\varphi_i = \Delta\phi_i^m$ ($\Delta\phi_i^m$ 为可测相位差, 上标 m 表示测量值)。在一般情况下, $N_2 \cdot m_2 + h_2 \neq N_1 \cdot m_1 + h_1$ 。因此式(8)。可改写为

$$L_i = N_i \cdot m_i + h_i \quad (10)$$

利用最小均方误差准则求得变元 N_i , N_2 (同余系数)以使得

$$\varepsilon = (L_1 - L_2)^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

进而可以求得 L_i ($i = 1, 2$), 则 $\Delta\phi_i$ 的估计值为

$$\Delta\hat{\phi}_i = (2\pi/m_i) L_i \quad (12)$$

目标真实仰角 θ 的估计值为

$$\hat{\theta}_i = \arcsin(P \cdot L_i) = \arcsin\left(\frac{\lambda_0}{d} \cdot L_i\right) = \arcsin\left(\frac{\lambda_i \cdot \Delta\hat{\phi}_i}{2\pi d}\right) \quad (13)$$

基于 CRT 的双波段相位差解模糊处理方法的具体步骤为

步骤 1 分别获取在两个波段工作时的目标回波信号的相位差测量数据 $\Delta\phi_i^m$ 。

步骤 2 按式(10)分别计算出 $((N_i)_{\max} + 1)$ 种情况下的 L_i 值 ($i = 1, 2$)。

步骤 3 计算出 $\prod_{i=1,2} [(N_i)_{\max} + 1]$ 种情况下的 ε ($\varepsilon = (L_1 - L_2)^2$)。

步骤 4 按式(11)搜索 ε 中的最小值(全局搜索), 最小值对应的 N_i 即为估计值 \hat{N}_i , 从而实现了相位差解模糊。

步骤 5 根据相位差模糊数的估计值 \hat{N}_i , 由式(12), 式(13)即可算出真实相位差和目标仰角的估计值。

5 测高精度分析

5.1 测高模型

对于近距离的目标, 可用平坦地面模型近似地

给出目标高度的估计, 即测高算式为

$$H_T = H_a + R_T \sin \theta \quad (14)$$

其中 H_a 为雷达天线架设高度; R_T 为目标距离(斜距)。

对于远距离的目标, 可以采用球面地面模型。

为了进一步提高高度计算的精确度, 必须考虑雷达波束沿着目标的射线路径的折射。考虑大气折射的经典方法是用等效地球半径来代替真实的地球半径, 则测高算式为

$$H_T = \left[(R_e + H_a)^2 + R_T^2 + 2(R_e + H_a)R_T \sin \theta \right]^{1/2} - R_e \approx H_a + R_T \sin \theta + R_T^2/2R_e \quad (15)$$

其中 $R_e = KR_0$ 为等效地球半径, $R_0 = 6370$ km 为真实地球半径, 由 $4/3$ 等效地球半径原理, 通常取 $K = 4/3$, 其他参数定义同平坦地面模型。 θ 为目标仰角, 其值取决于式(16)

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\lambda_i}{2\pi d} \cdot \Delta\phi_i \right), \quad i = 1, 2 \quad (16)$$

其中 $\Delta\phi_i$ ($i = 1, 2$) 分别对应于波段 1 和波段 2 经过解模糊后的相位差值。

5.2 测高精度

测高精度与测距精度以及测角精度有关, 由于各个观测量(R_T 、 θ)相互独立, 因此, 测高误差的均方根值可由测高算式的全微分求得。对于平坦地面模型的测高算式, 有

$$\sigma_{H_T} = \sqrt{\left(\frac{\partial H_T}{\partial R_T} \cdot \sigma_{R_T} \right)^2 + \left(\frac{\partial H_T}{\partial \theta} \cdot \sigma_{\theta} \right)^2} \quad (17)$$

其中各偏导数为

$$\frac{\partial H_T}{\partial R_T} = \sin \theta \quad (18)$$

$$\frac{\partial H_T}{\partial \theta} = R_T \cdot \cos \theta \quad (19)$$

σ_{R_T} 表示目标距离测量的均方误差, 对于常规雷达, 通常在 100 m 量级; σ_{θ} 表示目标仰角测量的均方误差。

由式(17)-式(19)得

$$\sigma_{H_T} = \sqrt{\left(\sin \theta \cdot \sigma_{R_T} \right)^2 + \left(R_T \cdot \frac{\lambda_i}{\pi d} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \text{SNR}_1 \cdot \text{SNR}_2}}, \quad i = 1, 2 \quad (20)$$

同理, 对于球面地面模型的测高算式, 有

$$\sigma_{H_T} \approx \sqrt{\left(\sin \theta + \frac{R_T}{R_e} \right)^2 \cdot \sigma_{R_T}^2 + \left(R_T \cdot \frac{\lambda_i}{\pi d} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \text{SNR}_1 \cdot \text{SNR}_2}}, \quad i = 1, 2 \quad (21)$$

由式(20), 式(21)可知: 目标仰角越低、目标斜

距越小、测距精度越高、信噪比越高, 测高精度越高; 雷达工作波长 λ_i 的不同, 直接影响着雷达的测高精度, 即频段较高的波段 2 系统的测高精度更高。

6 仿真实验

下面基于本文的方法, 进行双频雷达测高精度的分析, 仿真中采用基于中国余数定理的解模糊处理方法进行相位差解模糊, 仿真参数设置为: 波段 1 频率 $f_1 = 1300$ MHz, 相位中心间距 $d = 3\lambda_1$, 比例常数(波长比) $\eta = 9/2$, 雷达天线架高 $H_a = 5$ m。

实验 1 信噪比与目标斜距对测高精度的影响

假设当目标斜距 $R_T = 100$ km 时, 两通道信噪比相等且 $\text{SNR}_1 = \text{SNR}_2 = \text{SNR}$ 从 8 dB - 15 dB 变化, 在球面地面模型的条件下, 对高度 H_T 为 5 km 的目标进行高度估计并计算高度估计的均方误差, 仿真结果如图 4 所示。

假设目标斜距 $R_T = 80$ km~380 km 变化, 两通道信噪比相等且 $\text{SNR}_1 = \text{SNR}_2 = 15$ dB, 在球面地面模型的条件下, 对高度 H_T 为 5 km 的目标进行高度估计并计算高度估计的均方误差, 仿真结果如图 5 所示。

图 4 仿真结果表明, SNR 越高, 测高精度越高; 频段较高的波段 2 的测高精度明显高于波段 1; SNR 大约在小于 10 dB 时, 测高性能差, SNR 大约在大于 10 dB 时, 测高性能良好, 且波段 2 的高度估计的均方误差值趋于平稳。图 5 仿真结果表明, 在双通道信噪比一定得情况下, 目标的测高精度随被探测目标斜距的增加而变差, 当斜距为 380 km 时, 两个波段的测高均方误差值下降到 3000 m 左右。

实验 2 双波段干涉测高与和-差波束法测高精度的比较

假设在双波段干涉测高中, 两通道信噪比相等 ($\text{SNR}_1 = \text{SNR}_2 = \text{SNR}$); 和-差波束法测高中, 半功率波束宽度 $\theta_{0.5} = 3^\circ$, 目标偏角 $\Delta\theta = 0$ (即目标在等信号轴方向), 和通道信噪比与双波段干涉测高两通道信噪比相等 ($\text{SNR}_S = \text{SNR}$)。按照以上假设情况, 在球面地面模型的条件下, 对高度为 10 km 的目标分别进行高度估计, 独立 100 次实验得其均方误差的均值, 两种测高方法的精度比较结果如表 1 所示。(说明: “双波段干涉测高”一栏中给出的是频段较高的波段 2 系统高度估计的均方误差的均值)

仿真结果表明, 双波段干涉测高的精度远高于和-差波束法测高的精度。进一步说明了在加装测高改造中, 不适合采用比幅法测高, 而更适合采用相位干涉法测高。同样需要说明的是: 由于双波段干涉测高中 R_T 对测高精度的影响较大, 当 $R_T =$

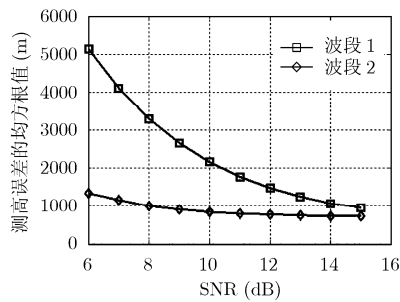
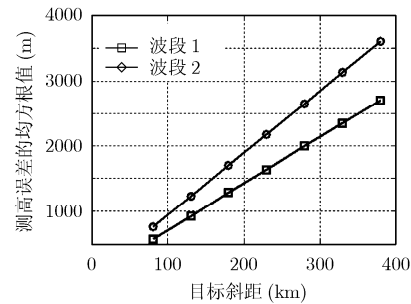
图4 SNR对测高精度的影响($H_T = 5$ km)图5 目标斜距对测高精度的影响($H_T = 5$ km)

表1 不同情况下的测高精度比较(球面地面)

方法	R_T (km),		SNR (dB)	
	100, 15	150, 12	200, 10	
双波段干涉测高(m)	524	1075	1564	
和-差波束法测高(m)	658	1378	2276	

200 km, SNR = 15 dB 时, 测高均方误差大约为 1300 m 左右, 此时与 $R_T = 100$ km, SNR = 15 dB 时相比, 精度降低了一半多。

7 结束语

双频雷达是一种能同时在两个波段上工作的新体制雷达。与常规雷达相比, 双频雷达具有目标发现概率高和抗干扰能力强的显著特点, 增加双频雷达的测高功能有着重要的军事价值。本文研究了基于相位干涉原理的双频雷达测高方法, 该方法存在的相位模糊问题进行了分析, 给出了相应的解模糊方法, 然后对该方法的测高精度进行了分析。通过仿真分析, 验证了本算法的可行性, 并得出了一些有价值的结论, 对于双频雷达测高技术的研究有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 徐源, 陈伯孝. 地形对基于波瓣分裂的米波雷达测高方法的影响. 雷达科学与技术, 2008, 6(1): 9-14.
Xu Yuan and Chen Bo-xiao. Effect of landform on heightfinding method based on beam split in VHF radar. *Radar Science and Technology*, 2008, 6(1): 9-14.
- [2] 赵光辉, 陈伯孝. 基于交替投影的DOA估计方法及其在米波雷达中的应用. 电子与信息学报, 2008, 30(1): 224-227.
Zhao Guang-hui and Chen Bo-xiao. A new DOA estimator based on Alternating projection and its application in VHF radar. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(1): 224-227.
- [3] 李鸿, 汤子跃, 吴嗣亮. 机载雷达时差测高技术抗欺骗干扰能力分析. 电子学报, 2007, 35(B12): 55-58.
Li Hong, Tang-Ziyue, and Wu Si-liang. The evaluation of

- airborn radar time difference height-measuring technology and its anti-deception-jamming capability. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(B12): 55-58.
- [4] 刘洪艳, 邵丽鹏, 司锡才. 比幅比相测角系统信号处理技术研究. 应用科技, 2003, 30(10): 7-9.
Liu Hong-yan, Gao Li-peng, and Si Xi-cai. Discussing some questions of signal processing in measuring angle system by comparing amplitude and phase system by comparing amplitude and phase. *Applied Science and Technology*, 2003, 30(10): 7-9.
- [5] 闫修林. 地面雷达比相法测高. 现代电子工程, 2007(2): 61-63.
Yan Xiu-lin. Measuring angle by comparing amplitude and phase system by comparing amplitude and phase. *Modern Electronic Engineering*, 2007(2): 61-63.
- [6] 张文旭, 邵丽鹏, 张春杰. 一种基于比幅比相测角解模糊方法. 应用科技, 2006, 33(4): 21-23.
Zhang Wen-xu, Gao Li-peng, and Zhang Chun-jie. A method to resolve the angle-measuring ambiguity based on comparing amplitude and phase. *Applied Science and Technology*, 2006, 33(4): 21-23.
- [7] 龚享钰, 袁俊泉, 孙晓昶. 基于参差距离的相位差变化值的解模糊方法研究. 信号处理, 2003, 19(4): 308-311.
Gong Xiang-yi, Yuan Jun-quan, and Sun Xiao-chang. Analysis of the method in solving phase difference variety ambiguity with stagger distance. *Signal Processing*, 2003, 19(4): 308-311.
- [8] 周亚强. 噪声条件下多基线相位干涉仪解模糊算法. 电子与信息学报, 2005, 27(2): 259-261.
Zhou Ya-qiang. Algorithm of solving multi-baseline Interferometer phase difference ambiguity in noisy circumstance. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(2): 259-261.
- [9] 夏翔根, 王根元. 相位解模糊和一种鲁棒的余数定理. *IEEE Signal Processing Letters*, 2007, 14(4): 399-402.
- 汤子跃: 男, 1966年生, 博士后, 教授, 博士生导师, 从事雷达系统、信号处理以及SAR成像等领域的研究。
- 朱振波: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像技术。