



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103293526 A

(43) 申请公布日 2013. 09. 11

(21) 申请号 201310192066. 0

(22) 申请日 2013. 05. 13

(71) 申请人 西安电子科技大学

地址 710071 陕西省西安市太白南路 2 号

(72) 发明人 陈伯孝 苏鹏 朱伟 杨明磊

(74) 专利代理机构 陕西电子工业专利中心

61205

代理人 程晓霞 王品华

(51) Int. Cl.

G01S 13/08 (2006. 01)

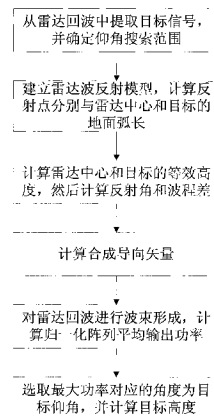
权利要求书2页 说明书10页 附图6页

(54) 发明名称

基于合成导向矢量的波束形成米波雷达测高方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于合成导向矢量的波束形成米波雷达测高方法,主要解决现有技术测高时信号处理运算量大、计算复杂的问题,本发明从雷达回波中提取目标信号,确定目标仰角搜索范围;建立雷达波反射模型,用搜索仰角计算反射点与雷达中心的地面弧长和反射点与目标的地面弧长;计算目标和雷达中心的等效高度后计算反射角和反射波与直射波波程差;计算合成导向矢量;对回波数据波束形成后选取最大归一化功率值对应的角度作为目标仰角,并计算目标高度。本发明将波束形成和合成导向矢量相结合,并将目标反射模型进行简化处理,保证米波雷达的仰角估计精度,提高米波雷达测高的计算速度,简化测高计算过程,使米波雷达的实时信号处理更加容易。



1. 一种基于合成导向矢量的波束形成米波雷达测高方法,包括以下步骤:

步骤 1:从雷达接收的回波中提取目标信号  $x(t_k)$ , 并确定目标仰角搜索范围;

步骤 2:建立雷达波反射模型,根据目标搜索仰角  $\theta_d$ , 计算反射点与雷达中心的地面弧长和反射点与目标的地面弧长,分别记为  $G_1$  和  $G_2$ ;

步骤 3:分别计算目标和雷达中心在反射点切线上的等效高度,记为  $h_r'$  和  $h_t'$ , 然后计算雷达波的反射角  $\theta_i$  及反射波与直射波的波程差  $\Delta R$ ;

步骤 4:利用直射波导向矢量  $a(\theta_d)$  和反射波导向矢量  $a(\theta_i)$  计算搜索角度的合成导向矢量  $a_s(\theta_d)$ ;

$$a_s(\theta_d) = a(\theta_d) + \rho \exp(-j2\pi \Delta R/\lambda) a(\theta_i)$$

其中  $\rho$  为地面反射系数,  $\lambda$  为雷达波波长;

步骤 5:对雷达回波进行波束形成处理,计算归一化阵列平均输出功率  $S(\theta_d)$ ;

步骤 6:选取最大归一化阵列平均输出功率对应的角度为目标仰角  $\theta$ , 并利用余弦定理计算目标的高度  $h_t$ :

$$\theta = \arg \max_{\theta_d} [S(\theta_d)]$$

$$h_t = \sqrt{R_d^2 + (h_r + r_e)^2 - 2R_d \cdot (h_r + r_e) \cos(\theta + \pi/2)} - r_e$$

其中  $R_d$  为目标与雷达距离,  $h_r$  为雷达中心高度,  $r_e$  为等效地球半径。

2. 根据权利要求 1 所述的米波雷达测高方法,其中步骤 2 中根据搜索仰角计算计算反射点与雷达中心的地面弧长  $G_1$  和反射点与目标的地面弧长  $G_2$ ,按如下步骤进行:

(2a) 建立雷达波反射模型,计算目标搜索角度  $\theta_d$  对应的目标高度  $h_t$ ;

$$h_t = \sqrt{R_d^2 + (h_r + r_e)^2 - 2R_d \cdot (h_r + r_e) \cos(\theta_d + \pi/2)} - r_e$$

(2b) 计算目标与雷达中心的地心夹角  $\phi$  和地面投影点的弧长  $G$ ;

$$\phi = \arccos\left(\frac{(h_r + r_e)^2 + (h_t + r_e)^2 - R_d^2}{2(h_r + r_e)(h_t + r_e)}\right)$$

$$G = \phi \cdot r_e$$

(2c) 计算反射点与雷达中心的地面弧长  $G_1$  和反射点与目标的地面弧长  $G_2$ 。

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{r_e(h_t + h_r) + \frac{r^2}{4}}$$

$$\xi = \arcsin\left(\frac{2r_e r (h_t - h_r)}{p^3}\right)$$

$$G_1 = \frac{G}{2} - p \cdot \sin \frac{\xi}{3}$$

$$G_2 = G - G_1$$

其中  $p$  和  $\xi$  均为中间变量,无具体物理含义。

3. 根据权利要求 2 所述的米波雷达测高方法,其中步骤 3 中分别计算目标和雷达中心在反射点切线上的等效高度,记为  $h_r'$  和  $h_t'$ , 然后计算雷达波的反射角  $\theta_i$  及反射波与直射波的波程差  $\Delta R$ ,按如下步骤进行:

(3a) 计算雷达中心等效高度  $h_r'$  和目标等效高度  $h_t'$ ;

$$h_r' \approx h_r - \frac{G_1^2}{2r_e}$$

$$h_t' \approx h_t - \frac{G_2^2}{2r_e}$$

(3b) 计算雷达波的反射角  $\theta_i$  和波程差  $\Delta R$ 。

$$\theta_i \approx -a \sin(\sin(\theta_d) + 2 \cdot h_r' / R_d)$$

$$\Delta R = R_i - R_d \approx \frac{2 \cdot h_t' \cdot h_r'}{G}$$

4. 根据权利要求 3 所述的米波雷达测高方法, 其中步骤 5 中对雷达回波进行波束形成处理, 计算归一化阵列平均输出功率  $S(\theta_d)$ , 按如下步骤进行:

(5a) 计算第  $k$  个脉冲目标信号  $x(t_k)$  对应搜索角度  $\theta_d$  的波束形成值  $y(\theta_d, k)$ ;

$$y(\theta_d, k) = \mathbf{a}_s^H(\theta_d) \mathbf{x}(t_k)$$

(5b) 计算第  $k$  个脉冲目标信号  $x(t_k)$  对应搜索角度  $\theta_d$  的阵列输出功率  $p(\theta_d, k)$ ;

$$p(\theta_d, k) = y(\theta_d, k) y(\theta_d, k)^H$$

(5c) 计算  $K$  个脉冲的阵列平均输出功率  $P(\theta)$ ;

$$P(\theta_d) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K p(\theta_d, k)$$

(5d) 计算归一化阵列输出平均功率  $S(\theta_d)$

$$S(\theta_d) = \frac{P(\theta_d)}{(\mathbf{a}_s^H(\theta_d) \cdot \mathbf{a}_s(\theta_d))}$$

式中  $H$  表示共轭转制。

## 基于合成导向矢量的波束形成米波雷达测高方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于雷达信号处理技术领域,主要涉及米波雷达测高,具体地说是针对数字阵列米波雷达,提出一种基于合成导向矢量的波束形成米波雷达测高方法,在保证运算精度的同时降低运算量,用于雷达目标跟踪。

### 背景技术

[0002] 米波雷达具有反隐身和抗反辐射导弹的能力,但因其波长较长,使其天线波束宽度较宽,角分辨率较低,在低仰角目标探测时地(海)面的多径反射现象更加严重。由于多径信号与直射波信号的相关性较强,导致米波雷达的测高问题一直是雷达界尚未很好解决的难题。

[0003] 目前,国内外学者对于米波测高问题进行了大量的研究,取得了一些突破性的进展。陈伯孝等于 2007 年在《电子学报》和雷达年会上介绍了“基于波瓣分裂的米波雷达测高方法”,利用不同天线分裂波瓣的相位关系,确定目标所在仰角区间,对接收信号进行比幅处理提取归一化误差信号,最后根据归一化误差信号和仰角区间查表得到目标的高度。但该方法对阵地的平坦性要求较高,且测高精度只能达到距离的 1%,难以满足一些精度较高的实际使用要求。杨雪亚于 2011 年在其博士论文中提出了基于多径信号模型的合成导向矢量最大似然测高算法,将精确多径反射模型引入到米波雷达测高中,提高了测高精度,在工程应用中效果较好。但此方法主要存在两个问题,一是在计算目标的反射角和波程差时应用了精确多径信号反射模型,导致计算时数值动态范围较大,单精度浮点数不能满足精度要求,而现有的 DSP 处理器(如 ADSP-TS201)不能很好的支持双精度计算,计算所需时间大大加剧;二是最大似然方法需计算相关矩阵和投影矩阵,算法中需要矩阵相乘,计算量巨大,不利于提高测高计算速度,降低了雷达处理目标的能力。

[0004] 波束形成算法是时域傅里叶谱估计的一种空域拓展形式,通过将各阵元输出进行加权求和,在一定时间内将天线阵列波束“导向”到一个方向上,对期望信号得到最大输出功率的导向位置给出了波束方向估计,是一种快速有效的算法。但这种方法会受到“瑞利限”的限制,即对位于一个波束宽度内的空间目标不可分辨。在低仰角米波雷达测高时,反射波和直射波夹角小于一个波束宽度,传统的波束形成算法将不可分辨。

[0005] 米波雷达一般用作预警雷达,因此需要对目标高度进行快速精确的估计,上述几种方法均不能很好的解决米波雷达测高问题,制约着雷达目标测高的高效工作和工程化运行。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的在于克服上述已有技术的计算量大、测高速度低和测高精度低等不足,将合成导向矢量与波束形成相结合,解决了雷达测高时运算量大的问题,并且避免了普通波束形成在目标低仰角情况下不可分辨的问题,提供一种测高精度较高且运算量较小的基于合成导向矢量的波束形成米波雷达测高方法。

[0007] 本发明是一种基于合成导向矢量的波束形成米波雷达测高方法,实现步骤包括:

[0008] 步骤 1:从雷达接收的回波中提取目标信号  $x(t_k)$ ,并根据目标距离信息确定目标仰角搜索范围。

[0009] 步骤 2:建立雷达波反射模型,根据目标搜索仰角  $\theta_d$ ,计算反射点与雷达中心对应的地面弧长和反射点与目标对应的地面弧长,分别记为  $G_1$  和  $G_2$ ,或者说是反射点分别与雷达中心和目标在地面投影点的弧长。

[0010] 步骤 3:分别计算目标和雷达中心在反射点切线上的等效高度,记为  $h_r'$  和  $h_t'$ ,然后计算雷达波的反射角  $\theta_i$  及反射波与直射波的波程差  $\Delta R$ ,目标等效高度为  $h_r'$ ,雷达中心等效高度为  $h_t'$ 。本发明通过模型的几何关系计算减小了数值范围,使单精度浮点数满足精度要求。

[0011] 步骤 4:利用直射波导向矢量  $a(\theta_d)$  和反射波导向矢量  $a(\theta_i)$  计算搜索角度的合成导向矢量  $a_s(\theta_d)$ 。

$$[0012] \quad a_s(\theta_d) = a(\theta_d) + \rho \exp(-j2\pi \Delta R/\lambda) a(\theta_i)$$

[0013] 其中  $\rho$  为地面反射系数,  $\lambda$  为雷达波波长。

[0014] 步骤 5:对雷达回波进行波束形成处理,计算归一化阵列平均输出功率  $S(\theta_d)$ 。

[0015] 步骤 6:每个搜索仰角对应的归一化阵列平均输出功率计算完成后,选取最大归一化阵列平均输出功率对应的角度为目标仰角  $\theta$ ,并利用余弦定理计算目标的高度  $h_t$ :

$$[0016] \quad \theta = \arg \max_{\theta_d} [S(\theta_d)]$$

$$[0017] \quad h_t = \sqrt{R_d^2 + (h_r + r_e)^2 - 2R_d \cdot (h_r + r_e) \cos(\theta + \pi/2)} - r_e$$

[0018] 其中  $R_d$  为目标与雷达距离,  $h_r$  为雷达中心高度,  $r_e$  为等效地球半径。  $h_t$  即为所求的目标高度。

[0019] 本发明利用合成导向矢量作为波束形成的权值,将直射波和反射波通过加权求和作为一个波束处理,因此避免了多波束夹角问题,解决了普通波束形成“瑞利限”对雷达低仰角测高时的限制。在计算反射角和波程差时采用近似多径反射模型,其满足计算精度同时降低数值范围,使此步骤在 DSP 中能够通过单精度计算实现,大大减少了运算时间,提高了雷达处理目标的能力。

[0020] 本发明的实现还在于:其中步骤 2 中根据搜索仰角计算反射点与雷达中心对应的地面弧长  $G_1$  和反射点与目标对应的地面弧长  $G_2$ ,按如下步骤进行:

[0021] (2a) 建立雷达波反射模型,首先计算目标搜索角度  $\theta_d$  对应的目标高度  $h_t$ :

$$[0022] \quad h_t = \sqrt{R_d^2 + (h_r + r_e)^2 - 2R_d \cdot (h_r + r_e) \cos(\theta_d + \pi/2)} - r_e$$

[0023] (2b) 计算目标与雷达中心的地心夹角  $\phi$  和地面投影点的弧长  $G$ :

$$[0024] \quad \phi = \arccos\left(\frac{(h_r + r_e)^2 + (h_t + r_e)^2 - R_d^2}{2(h_r + r_e)(h_t + r_e)}\right)$$

$$[0025] \quad G = \phi \cdot r_e$$

[0026] (2c) 计算反射点与雷达中心的地面弧长  $G_1$  和反射点与目标的地面弧长  $G_2$ :

$$[0027] \quad p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{r_e(h_t + h_r) + \frac{r_e^2}{4}}$$

$$[0028] \quad \xi = a \sin \left( \frac{2r_e r (h_r - h_r)}{p^3} \right)$$

$$[0029] \quad G_1 = \frac{G}{2} - p \cdot \sin \frac{\xi}{3}$$

$$[0030] \quad G_2 = G - G_1$$

[0031] 其中  $p$  和  $\xi$  均为中间变量,无具体物理含义。

[0032] 本发明的实现还在于:其中步骤3中分别计算目标和雷达中心在反射点切线上的等效高度,记为  $h_r'$  和  $h_t'$ ,然后计算雷达波的反射角  $\theta_i$  及反射波与直射波的波程差  $\Delta R$ ,按如下步骤进行:

[0033] (3a) 计算雷达中心等效高度  $h_r'$  和目标等效高度  $h_t'$ 。

$$[0034] \quad h_r' \approx h_r - \frac{G_1^2}{2r_e}$$

$$[0035] \quad h_t' \approx h_t - \frac{G_2^2}{2r_e}$$

[0036] (3b) 计算雷达波的反射角  $\theta_i$  和波程差  $\Delta R$ 。

$$[0037] \quad \theta_i \approx -a \sin(\sin(\theta_d) + 2 \cdot h_r' / R_d)$$

$$[0038] \quad \Delta R = R_i - R_d \approx \frac{2 \cdot h_t' \cdot h_r'}{G}$$

[0039] 此步骤是本发明的关键性步骤之一,通过此步骤,利用近似模型减少数值范围,并得到构造合成导向矢量时所需的反射角和波程差,减少了运算量,提高了DSP运算速度。

[0040] 本发明的实现还在于:其中步骤5中通过对雷达回波进行波束形成处理,计算归一化的阵列平均输出功率  $S(\theta_d)$ ,按如下步骤进行:

[0041] (5a) 计算第  $k$  个脉冲目标信号  $x(t_k)$  对应搜索角度  $\theta_d$  的波束形成值  $y(\theta_d, k)$ ;

$$[0042] \quad y(\theta_d, k) = \mathbf{a}_s^H(\theta_d) \mathbf{x}(t_k)$$

[0043] (5b) 计算第  $k$  个脉冲目标信号  $x(t_k)$  对应搜索角度  $\theta_d$  的阵列输出功率  $p(\theta_d, k)$ ;

$$[0044] \quad p(\theta_d, k) = y(\theta_d, k) y(\theta_d, k)^H$$

[0045] (5c) 每个脉冲目标信号对应的阵列输出功率计算完成后,计算所有  $K$  个脉冲的阵列平均输出功率  $P(\theta)$ ;

$$[0046] \quad P(\theta_d) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K p(\theta_d, k)$$

[0047] (5d) 对阵列输出功率消除导向矢量模值的影响,计算归一化阵列输出平均功率  $S(\theta_d)$ 。

$$[0048] \quad S(\theta_d) = \frac{P(\theta_d)}{(\mathbf{a}_s^H(\theta_d) \cdot \mathbf{a}_s(\theta_d))}$$

[0049] 此步骤是本发明的关键性步骤之一,通过此步骤,避免了最大似然算法中相关矩阵和投影矩阵的计算,减少了运算量,提高了目标角度估计的速度。

[0050] 本发明结合了波束形成的运算简单和合成导向矢量对测高模型的良好匹配,能够在实现精确测高的同时大大减少运算量,提高雷达信号处理能力。

[0051] 本发明与现有技术相比具有如下优点:

[0052] 基于波瓣分裂的米波雷达测高方法计算简单,但测高精度受阵地影响较大,且测高精度较低;合成导向矢量最大似然算法测高精度较高,但运算量巨大,不利于雷达实时处理;普通波束形成算法测高精度较低,且当目标在低仰角时无法正常工作。

[0053] (1) 本发明在目标角度估计时应用了波束形成算法,避免了最大似然算法中相关矩阵和投影矩阵计算时的巨大运算量,极大的减少了运算量,提高了测高速度。

[0054] (2) 本发明使用直射波和反射波及波程差构造合成导向矢量,对米波雷达测高模型进行良好的匹配,将反射波和直射波当作一个波束处理,避免了目标低仰角时反射波和直射波夹角过小问题,解决了普通波束形成“瑞利限”对雷达低仰角测高时的限制,消除了多径效应对米波雷达测高的影响,提高了测角精度。

[0055] (3) 本发明对米波雷达测高模型进行近似处理,保证运算精度的同时减少了计算雷达波反射角和波程差时的数值范围,满足单精度浮点数数值精度,适应目前 DSP 的计算结构,极大的减少了运算时间。

### 附图说明

[0056] 图 1 是本发明的测高流程图;

[0057] 图 2 是本发明中雷达接收目标信号模型图;

[0058] 图 3a 是本发明计算反射角随直射角变化的曲线图;

[0059] 图 3b 是本发明计算波程差随直射角变化的曲线图;

[0060] 图 4a 是本发明中雷达波反射模型与精确雷达波反射模型的反射角相对误差曲线图;

[0061] 图 4b 是本发明中雷达波反射模型与精确雷达波反射模型的波程差相对误差曲线图;

[0062] 图 5a 是本发明针对某雷达实测数据处理的测角结果图;

[0063] 图 5b 是本发明针对某雷达实测数据处理的测高结果图。

### 具体实施方式

[0064] 下面结合附图详细说明本发明的内容和效果。

[0065] 实施例 1:

[0066] 本发明是一种基于合成导向矢量的波束形成米波雷达测高方法,米波雷达在反隐身、反辐射导弹方面发挥着重要作用,而米波雷达测高问题是其中急需解决的难题之一,可用于雷达目标跟踪,参照图 1,本发明的基于合成导向矢量的波束形成米波雷达测高方法包括以下步骤:

[0067] 步骤 1:从雷达接收的回波中提取目标信号  $x(t_k)$ ,并根据目标距离信息确定目标仰角搜索范围。

[0068] 从雷达接收的回波中提取目标信号  $x(t_k)$  的过程通常是:对雷达接收的回波进行模数转换、幅相校正、IQ 通道分离、脉冲压缩、杂波抑制和消除、动目标检测、动目标显示和恒虚警等处理后,得到目标信号和目标距离信息。

[0069] 米波雷达一般用作预警雷达,探测距离一般为几百千米,目前飞机飞行高度一般在两万米以下。根据目标的距离信息确定测高时仰角搜索范围:目标距离大于 300 千米时,

仰角搜索范围为  $0^\circ \sim 3^\circ$  ;目标距离为 200 千米~ 300 千米时,仰角搜索范围为  $0^\circ \sim 6^\circ$  ;目标距离为 100 千米~ 200 千米时,仰角搜索范围为  $0^\circ \sim 15^\circ$  ;目标距离小于 100 千米时,仰角搜索范围为  $0^\circ \sim 25^\circ$  。

[0070] 步骤 2:根据雷达和目标的地理位置关系建立雷达波反射模型,使用目标搜索仰角  $\theta_d$  计算反射点与雷达中心对应的地面弧长  $G_1$  和反射点与目标对应的地面弧长  $G_2$ ,参见图 2。

[0071] 步骤 3:分别计算目标和雷达中心在反射点切线上的等效高度,记为  $h_r'$  和  $h_t'$ ,然后计算雷达波的反射角  $\theta_i$  及反射波与直射波的波程差  $\Delta R$ ,参见图 2。

[0072] 步骤 4:利用直射波导向矢量  $a(\theta_d)$  和反射波导向矢量  $a(\theta_i)$  计算搜索角度的合成导向矢量  $a_s(\theta_d)$ ,通过加权求和将反射波和直射波作为一个波束处理,  $\rho \exp(-j2\pi \Delta R/\lambda)$  为权值,代表反射波与直射波由于地面反射和波程差引起的相位差。

$$[0073] \quad a_s(\theta_d) = a(\theta_d) + \rho \exp(-j2\pi \Delta R/\lambda) a(\theta_i)$$

[0074] 其中  $\rho$  为地面反射系数,对于水平极化波,  $\rho$  一般取值为  $-0.95 \sim -1$  之间,  $\lambda$  为雷达波波长。

[0075] 步骤 5:对雷达回波进行波束形成处理,利用合成导向矢量将雷达各阵元回波进行加权求和,将雷达波束“导向”到搜索仰角方向,计算归一化阵列平均输出功率  $S(\theta_d)$ ,归一化阵列平均输出功率由每个回波脉冲的雷达输出功率进行平均后对合成导向矢量进行归一化处理得到,因此本发明测高计算运算量小,便于雷达实时信号处理。

[0076] 步骤 6:每个搜索仰角对应的归一化阵列平均输出功率计算完成后,选取最大归一化阵列平均输出功率对应的角度为目标仰角  $\theta$ ,并利用余弦定理计算目标的高度  $h_t$ :

$$[0077] \quad \theta = \arg \max_{\theta_d} [S(\theta_d)]$$

$$[0078] \quad h_t = \sqrt{R_d^2 + (h_r + r_e)^2 - 2R_d \cdot (h_r + r_e) \cos(\theta + \pi/2)} - r_e$$

[0079] 其中  $R_d$  为目标与雷达距离,  $h_r$  为雷达中心高度,  $r_e$  为等效地球半径,  $h_t$  即为所求目标高度,为进一步雷达信息处理提供了准确数据。

[0080] 在现有技术中,基于波瓣分裂的米波雷达测高方法和普通波束形成算法均计算简单但精度较低,尤其在目标低仰角情况下,测高效果均不理想;基于导向矢量最大似然算法虽然测高效果较好但运算量较大,在现代雷达高实时性、目标高密集性的情况下不能满足战场需求。本发明利用合成导向矢量作为权值,对目标角度估计时采用波束形成算法,并对反射模型进行了近似处理,在对目标低仰角反射进行很好匹配的同时极大的减少了运算量,提高了测高速度。

[0081] 实施例 2:

[0082] 基于合成导向矢量的波束形成米波雷达测高方法同实施例 1,

[0083] 步骤 1:从雷达接收的回波中提取目标信号  $x(t_k)$ ,并根据目标距离信息确定目标仰角搜索范围。

[0084] 本发明中雷达接收目标信号的模型如图 2 所示。图 2 中一个远场的窄带信号入射到  $M$  个阵元组成的均匀线阵,选取雷达阵列中心  $A$  为参考阵元,  $h_r$  为雷达中心高度,  $d$  为雷达阵元间隔,  $\theta_a$  为天线的倾斜角,  $r_e$  为等效地球半径,  $R_d$  为目标到雷达中心的直射波波程,  $\theta_d$  为直射波到雷达中心的搜索仰角,  $\theta_i$  为反射波到雷达中心的反射角,  $R_i = R_{i1} + R_{i2}$  为目



标到雷达中心的反射波波程,  $\Delta R = R_i - R_d$  为雷达中心反射波和直射波的波程差,  $K$  为脉冲总数目,  $k$  为当前脉冲数。

[0085] 雷达阵列接收的信号矢量为:

$$[0086] \quad x(t_k) = [a(\theta_d) a(\theta_i)] [S_d(t_k) S_i(t_k)]^T + n(t_k), k = 1, \dots, K$$

[0087] 其中  $a(\theta_d) = [a_d(1), a_d(2), \dots, a_d(M)]^T$  是以雷达中心  $A$  为参考点的直射波导向矢量,  $a(\theta_i) = [a_i(1), a_i(2), \dots, a_i(M)]^T$  为对应的反射波导向矢量, 上标  $T$  表示转置。上式中

$$[0088] \quad a_d(m) = \exp\left(j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left(m - \frac{M+1}{2}\right) \cdot d \cdot (\cos(\theta_d) \cdot \sin(\theta_a) - \sin(\theta_d) \cdot \cos(\theta_a))\right)$$

$$[0089] \quad a_i(m) = \exp\left(j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left(m - \frac{M+1}{2}\right) \cdot d \cdot (\cos(\theta_i) \cdot \sin(\theta_a) - \sin(\theta_i) \cdot \cos(\theta_a))\right)$$

[0090] 其中  $m = 1, 2, \dots, M$ ,  $m$  表示第  $m$  个阵元,  $M$  表示阵元个数。

[0091]  $S_d(t_k)$  和  $S_i(t_k)$  分别是雷达中心接收的直射波和反射波复包络;  $n(t_k)$  是均值为零、方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声。

[0092] 对雷达中心的参考阵元来说,  $s_i(t_k) = \rho \exp(-j2\pi \Delta R / \lambda) s_d(t_k)$ , 其中  $\rho$  为地面反射系数, 因此有

$$[0093] \quad x(t_k) = [a(\theta_d) + \rho \exp(-j2\pi \Delta R / \lambda) a(\theta_i)] s_d(t_k) + n(t_k), k = 1, \dots, K$$

[0094] 步骤 2: 建立雷达波反射模型, 根据搜索仰角  $\theta_d$ , 计算反射点与雷达中心在地面投影点的弧长  $G_1$  和反射点与目标在地面投影点的弧长  $G_2$ 。

[0095] 图 2 中  $B$  点为反射波与地面交点, 即反射点。  $h_t$  为目标高度,  $\phi$  为目标与雷达中心的地心夹角,  $G_1$  为反射点与雷达中心地面投影点的弧长,  $G_2$  为反射点与目标地面投影点的弧长。计算反射点与雷达中心的地面弧长  $G_1$  和反射点与目标的地面弧长  $G_2$  的步骤包括:

[0096] (2a) 建立雷达波反射模型, 应用余弦定理计算目标搜索角度  $\theta_d$  对应的目标高度  $h_t$ 。

$$[0097] \quad h_t = \sqrt{R_d^2 + (h_r + r_e)^2 - 2R_d \cdot (h_r + r_e) \cos(\theta_d + \pi/2)} - r_e$$

[0098] (2b) 应用余弦定理计算目标与雷达中心的地心夹角  $\phi$  和地面弧长  $G$ 。

$$[0099] \quad \phi = \arccos\left(\frac{(h_r + r_e)^2 + (h_t + r_e)^2 - R_d^2}{2(h_r + r_e)(h_t + r_e)}\right)$$

$$[0100] \quad G = \phi \cdot r_e$$

[0101] (2c) 应用 fishback 方程计算反射点与雷达中心在地面投影点的弧长  $G_1$  和反射点与目标在地面投影点的弧长  $G_2$ 。

$$[0102] \quad p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{r_e (h_t + h_r) + \frac{r^2}{4}}$$

$$[0103] \quad \xi = \arcsin\left(\frac{2r_e r (h_t - h_r)}{p^3}\right)$$

$$[0104] \quad G_1 = \frac{G}{2} - p \cdot \sin \frac{\xi}{3}$$

$$[0105] \quad G_2 = G - G_1$$

[0106] 步骤3:利用得到的两弧长  $G_1$  和  $G_2$  再分别计算目标和雷达中心在反射点切线上的等效高度,记为  $h_r'$  和  $h_t'$ ,然后计算雷达波的反射角  $\theta_i$  及反射波与直射波的波程差  $\Delta R$ 。

[0107] 图2中  $\psi$  为反射波在反射点处的擦地角,  $H_1$  为雷达中心在反射点切线上的投影,  $H_2$  为目标在反射点切线上的投影,反射点与雷达中心投影点的长度  $\bar{G}_1 = \overline{BH_1}$ ,反射点与目标投影点的长度  $\bar{G}_2 = \overline{BH_2}$ 。

[0108] (3a) 计算雷达中心等效高度  $h_r'$  和目标等效高度  $h_t'$ 。

[0109] 应用余弦定理计算擦地角  $\psi$ ,由  $R_{i1}^2 + r_e^2 - 2r_e R_{i1} \cos(\psi + \pi/2) = (h_r + r_e)^2$  可得:

$$[0110] \quad \psi = a \sin\left(\frac{2r_e h_r + h_r^2 - R_{i1}^2}{2r_e R_{i1}}\right) \approx a \sin\left(\frac{h_r}{R_{i1}} - \frac{R_{i1}}{2r_e}\right)$$

[0111] 由  $R_{i2}^2 + r_e^2 - 2r_e R_{i2} \cos(\psi + \pi/2) = (h_t + r_e)^2$  可得:

$$[0112] \quad \psi = a \sin\left(\frac{2r_e h_t + h_t^2 - R_{i2}^2}{2r_e R_{i2}}\right) \approx a \sin\left(\frac{h_t}{R_{i2}} - \frac{R_{i2}}{2r_e}\right)$$

[0113] 在低仰角情况下,反射点与雷达中心在切线上投影点的长度  $\bar{G}_1$  近似于二者在地面投影点的弧长  $G_1$ ,即  $\bar{G}_1 \approx G_1$ ,同理,  $\bar{G}_2 \approx G_2$ 。

[0114] 等效雷达中心高度  $h_r'$  和目标高度  $h_t'$  可以应用正弦定理计算为

$$[0115] \quad h_r' = R_{i1} \sin(\psi) \approx R_{i1} \left(\frac{h_r}{R_{i1}} - \frac{R_{i1}}{2r_e}\right) \approx h_r - \frac{G_1^2}{2r_e}$$

$$[0116] \quad h_t' = R_{i2} \sin(\psi) \approx R_{i2} \left(\frac{h_t}{R_{i2}} - \frac{R_{i2}}{2r_e}\right) \approx h_t - \frac{G_2^2}{2r_e}$$

[0117] (3b) 计算雷达波的反射角  $\theta_i$  和波程差  $\Delta R$ 。

[0118] 参见图2,由切线夹角关系可得,反射角  $\theta_i = \psi + \varphi_1$ ,一般情况下  $h_r \square h_t$ ,因此反射点与雷达中心的地心夹角  $\varphi_1 \approx 0$ ,得到  $\theta_i \approx \psi$ ,可以通过求擦地角近似求得反射角  $\theta_i$ 。

$$[0119] \quad \sin(\theta_d) = (h_t' - h_r') / R_d$$

$$[0120] \quad \sin(\theta_i) = -(h_t' + h_r') / R_s$$

[0121] 在低仰角情况下,  $R_d \approx R_i$ ,且由于  $\theta_d \approx \theta_i$  可得

$$[0122] \quad \theta_i \approx -a \sin(\sin(\theta_d) + 2 \cdot h_r' / R_d)$$

$$[0123] \quad \Delta R = R_i - R_d \approx \frac{2 \cdot h_t' \cdot h_r'}{G}$$

[0124] 步骤4:利用直射波导向矢量  $a(\theta_d)$  和反射波导向矢量  $a(\theta_i)$  计算搜索角度的合成导向矢量  $a_s(\theta_d)$ 。

[0125] 直射波导向矢量为  $a(\theta_d) = [a_d(1), a_d(2), \dots, a_d(M)]^T$ ,其中

$$[0126] \quad a_d(m) = \exp\left(j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left(m - \frac{M+1}{2}\right) \cdot d \cdot (\cos(\theta_d) \cdot \sin(\theta_a) - \sin(\theta_d) \cdot \cos(\theta_a))\right)$$

[0127] 反射波导向矢量为  $a(\theta_i) = [a_i(1), a_i(2), \dots, a_i(M)]^T$ ,其中

$$[0128] \quad a_i(m) = \exp\left(j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left(m - \frac{M+1}{2}\right) \cdot d \cdot (\cos(\theta_i) \cdot \sin(\theta_a) - \sin(\theta_i) \cdot \cos(\theta_a))\right)$$

[0129] 则合成导向矢量为

[0130]  $a_s(\theta_d) = a(\theta_d) + \rho \exp(-j2\pi \Delta R/\lambda) a(\theta_i)$

[0131] 步骤 5:通过对雷达回波进行波束形成处理,计算归一化阵列平均输出功率  $S(\theta_d)$ 。

[0132] (5a) 计算第  $k$  个脉冲目标信号  $x(t_k)$  对应搜索角度  $\theta_d$  的波束形成值  $y(\theta_d, k)$ 。

[0133]  $y(\theta_d, k) = \mathbf{a}_s^H(\theta_d) \mathbf{x}(t_k)$

[0134] (5b) 计算第  $k$  个脉冲目标信号  $x(t_k)$  对应搜索角度  $\theta_d$  的阵列输出功率  $p(\theta_d, k)$ 。

[0135]  $p(\theta_d, k) = y(\theta_d, k) y(\theta_d, k)^H$

[0136] (5c) 每个脉冲目标信号对应的阵列输出功率计算完成后,计算所有  $K$  个脉冲的阵列平均输出功率  $P(\theta)$ 。

[0137]  $P(\theta_d) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K p(\theta_d, k)$

[0138] (5d) 由于合成导向矢量模值不为 1,因此需要对阵列输出功率进行归一化处理,消除此影响,得到归一化阵列输出平均功率  $S(\theta_d)$ 。

[0139]  $S(\theta_d) = \frac{P(\theta_d)}{(\mathbf{a}_s^H(\theta_d) \cdot \mathbf{a}_s(\theta_d))}$

[0140] 步骤 6:每个搜索仰角对应的归一化阵列平均输出功率计算完成后,根据波束形成原理,最大功率值指向的角度即为目标角度,因此选取最大归一化的阵列平均输出功率对应的角度为目标仰角  $\theta$ 。

[0141]  $\theta = \arg \max_{\theta_d} [S(\theta_d)]$

[0142] 计算出目标仰角后,利用余弦定理可计算目标高度  $h_t$ 。

[0143]  $h_t = \sqrt{R_d^2 + (h_r + r_e)^2 - 2R_d \cdot (h_r + r_e) \cos(\theta + \pi/2)} - r_e$

[0144] 其中  $R_d$  为目标与雷达距离,  $h_r$  为雷达中心高度,  $r_e$  为等效地球半径。

[0145] 参见图 5b,图 5b 是采用本发明测高方法获得的目标高度随目标飞行的实时测高曲线图。

[0146] 本发明使用简化的雷达反射模型,对米波雷达低仰角测高进行良好的匹配,避免了最大似然算法中由于多径效应导致的多维搜索,同时避免了“瑞利限”导致普通波束形成无法工作的限制,消除了多径效应对米波雷达测高的影响,提高了测角精度,为雷达测量系统提供了精度保证。

[0147] 实施例 3:

[0148] 基于合成导向矢量的波束形成米波雷达测高方法同实施例 1-2,

[0149] 本发明的效果可以通过以下仿真进一步说明。

[0150] 仿真内容:雷达波反射模型分析。

[0151] 仿真条件:

[0152] 假设目标距离 100 千米,目标仰角范围  $0.25^\circ \sim 16^\circ$ ,角度步进  $0.05^\circ$ ,共计算 316 点,DSP 采用 ADSP-TS201,内核频率为 600MHz,定义反射角相对误差为  $err(\theta_i) = \text{abs}(\hat{\theta}_i - \theta_i) / \theta_i$ ,波程差相对误差为  $err(\Delta R) = \text{abs}(\Delta \hat{R} - \Delta R) / \Delta R$ ,分别利用本发明和 4/3 地球精确曲面反射模型计算目标反射角和波程差,并计算两者的相对误差,统计 DSP

计算指令周期数和计算时间。

[0153] 仿真结果：本发明对雷达波反射模型进行了近似处理，在受地球曲率影响较大的部分采用曲面反射模型，然后应用低仰角测高时的近似关系计算目标和雷达在平面反射模型的等效高度，并利用平面反射模型计算反射角和波程差，减少了数值动态范围，提高了运算速度。

[0154] 图 3a 是采用本发明得到的目标反射角随入射角变化的曲线，其中横坐标为入射角，纵坐标为反射角。从图 3a 中可以看出，反射角在  $-0.25 \sim -16$  度之间，反射角约等于入射角。

[0155] 图 3b 是采用本发明得到的波程差随入射角变化的曲线，其中横坐标为入射角，纵坐标为波程差。从图 3b 中可以看出，波程差  $0.13 \sim 7.05$  米之间变化，与入射角成线性关系。

[0156] 图 4a 是本发明与精确雷达波反射模型的反射角相对误差曲线图，其中横坐标为入射角，纵坐标为反射角相对误差。从图 4a 中可以看出，采用本发明计算反射角与  $4/3$  地球精确曲面反射模型的相对误差较小，均为  $0.1$  以下，满足计算精度要求。

[0157] 图 4b 是本发明与精确雷达波反射模型的波程差相对误差曲线图，其中横坐标为入射角，纵坐标为波程差相对误差。从图 4b 中可以看出，采用本发明计算波程差时与  $4/3$  地球精确曲面反射模型的相对误差也为  $0.1$  以下，满足计算精度要求。

[0158] 表 1 为本发明模型与精确反射模型的计算复杂度比较。

[0159] 表 1 本发明模型和精确反射模型的计算复杂度比较

[0160]

算法	DSP 指令周期数	运行时间 (ms)
本发明	1012148	1.69
精确反射模型	4397456	7.33

[0161] 从表 1 中可以看出，本发明模型在计算反射角和波程差时的计算复杂度比精确反射模型降低接近  $3/4$ ，在保证测高精度的基础上，提高了雷达测高的速度。

[0162] 实施例 4：

[0163] 基于合成导向矢量的波束形成米波雷达测高方法同实施例 1-2，

[0164] 本发明的效果可以通过以下计算量分析进一步说明。

[0165] 仿真内容：雷达测高计算复杂度比较。

[0166] 仿真条件：假设雷达天线阵元数为  $M$ ，回波脉冲数为  $K$ 。

[0167] 仿真结果：表 2 列出本发明和合成导向矢量最大似然算法计算复杂度对比。

[0168] 表 2 本发明和合成导向矢量最大似然算法的计算复杂度对比

[0169]

算法	计算复杂度	M=24,K=27 时
本发明	$O\{(M+1) \cdot K + 2M\}$	$O\{723\}$
合成导向矢量 最大似然算法	$O\{M^2 \cdot (K+1) + 2M\}$	$O\{16176\}$

[0170] 从表 2 中可以看出,本发明复杂度为  $O\{723\}$ ,而合成导向矢量最大似然算法的复杂度为  $O\{16176\}$ ,可以看出本发明比现有测高算法的计算量降低一个数量级。随着雷达阵元数目和回波脉冲数的增多,二者计算量差别将更明显。可见本发明能大大降低米波雷达低仰角测高处理的运算量,提高目标仰角估计的计算速度,为米波雷达测高提供了一种工程化利用的快速测高方法。

[0171] 实施例 5:

[0172] 基于合成导向矢量的波束形成米波雷达测高方法同实施例 1-2,

[0173] 本发明的效果可以通过以下实测数据处理结果进一步说明。

[0174] 仿真内容:某雷达实测数据处理结果。

[0175] 仿真条件:雷达阵元个数为 24,阵元间距  $d = \lambda / 2$ ,快拍数为 13,DSP 采用 ADSP-TS201,内核频率为 600MHz。分别利用本发明方法、普通波束形成方法和合成导向矢量最大似然算法对某条民航航迹进行高度估计。

[0176] 仿真结果:测角和测高处理结果如图 5a 和 5b 所示,图中横轴表示目标的点迹号,纵轴分别表示测得的仰角和高度。图 5a 是本发明针对某雷达实测数据处理的测角结果图,从图 5a 中可以看出,当目标仰角低于  $2^\circ$  时,普通波束形成算法由于反射波和直射波夹角小于一个波束宽度无法正常工作,本发明和合成导向矢量最大似然算法测角精度较高。图 5b 是本发明针对某雷达实测数据处理的测高结果图,从图 5b 中可以看出,当目标点迹号大于 80 时,此时由于目标仰角过小普通波束形成测高误差巨大,本发明和合成导向矢量最大似然算法仍能有效工作,测高精度较高。

[0177] 综上,发明的基于合成导向矢量的波束形成米波雷达测高方法,主要解决现有技术测高时信号处理运算量大、计算复杂的问题。本发明从雷达回波中提取目标信号,确定目标仰角搜索范围;建立雷达波反射模型,用搜索仰角计算反射点与雷达中心的地面弧长和反射点与目标的地面弧长;计算目标和雷达中心的等效高度后计算反射角和反射波与直射波波程差;计算合成导向矢量;对回波数据波束形成后选取最大归一化功率值对应的角度作为目标仰角,并计算目标高度。本发明将波束形成和合成导向矢量相结合,并将目标反射模型进行简化处理,保证米波雷达的仰角估计精度,提高米波雷达对目标仰角估计的计算速度,也就是测高速度,简化测高计算过程,运算简单,使米波雷达的实时信号处理更加容易。

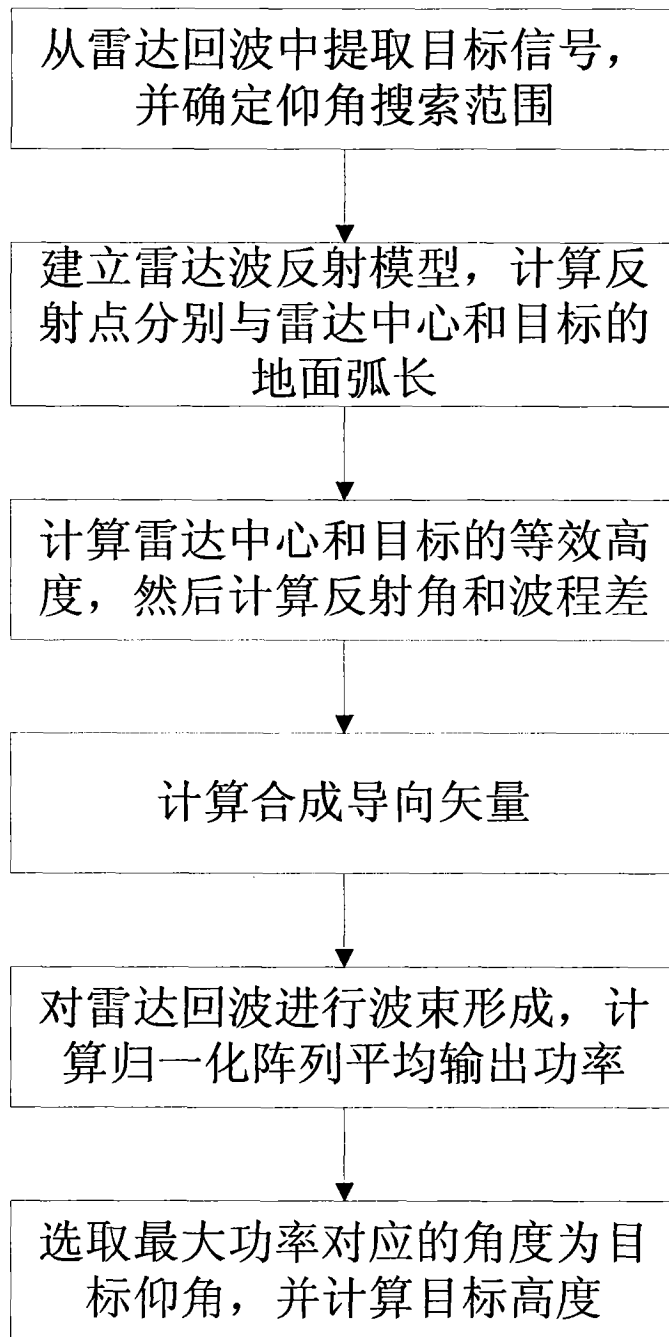


图 1

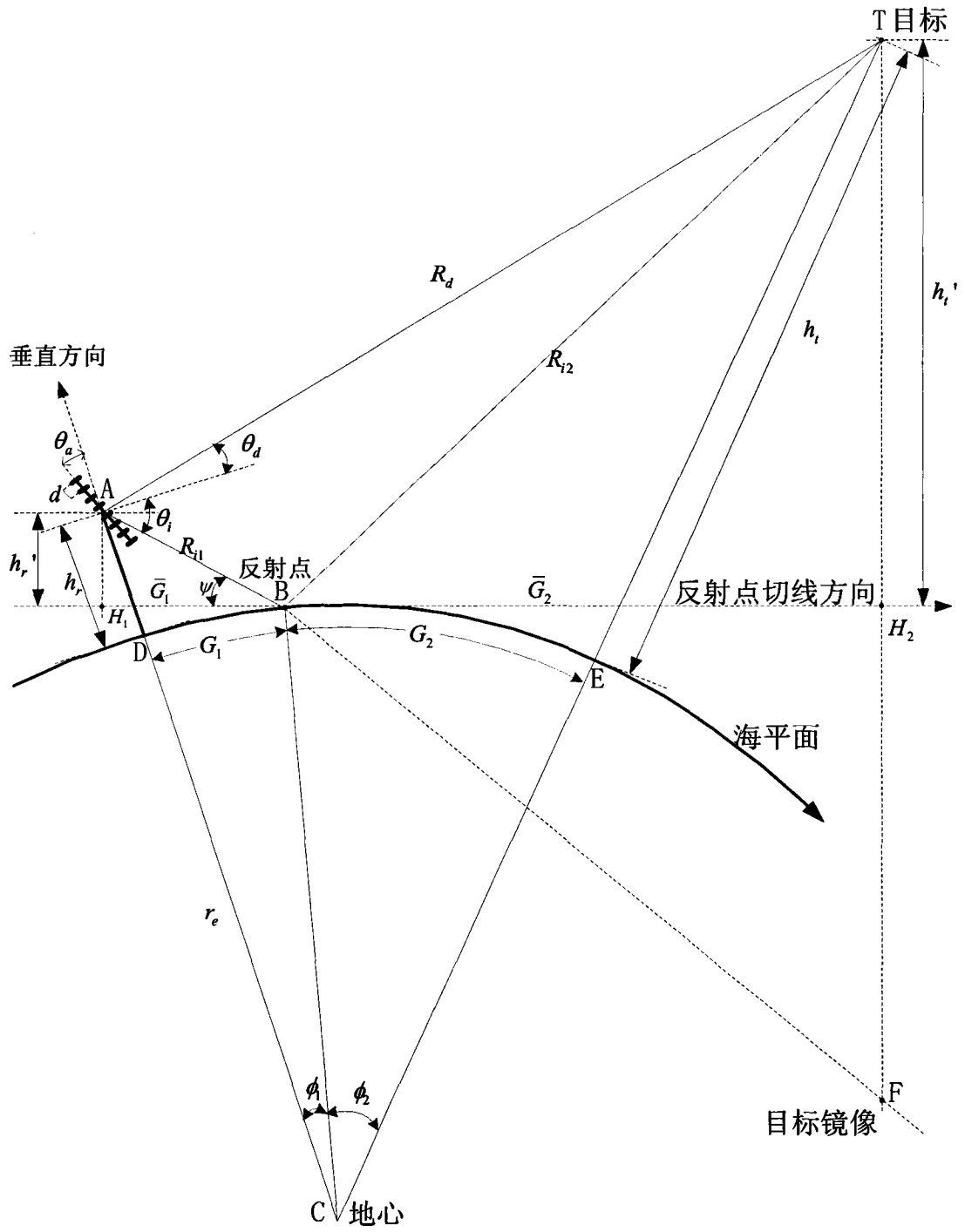


图 2

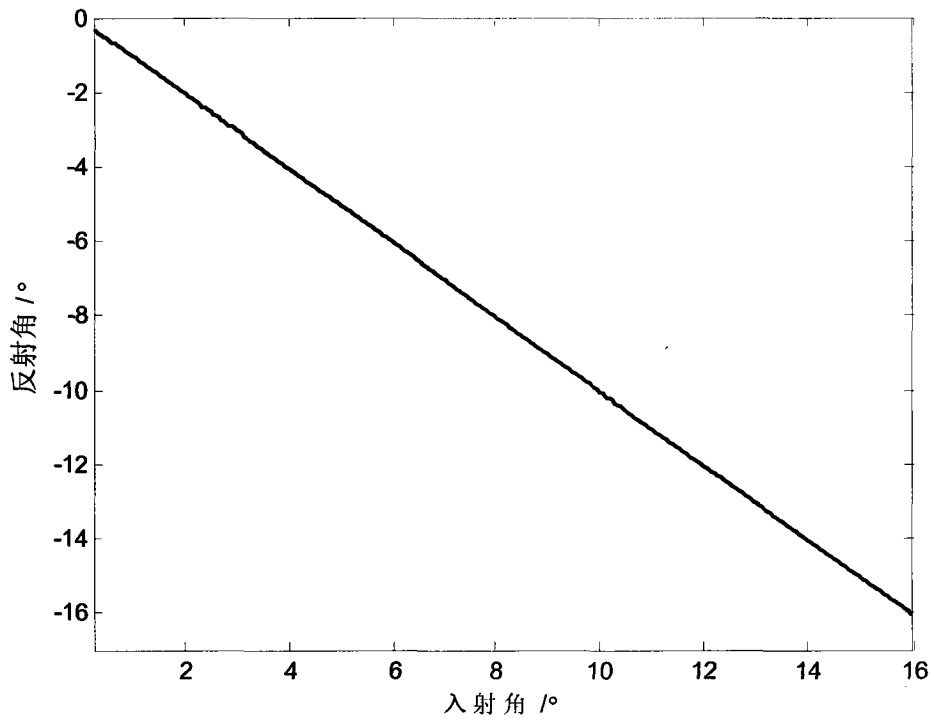


图 3a

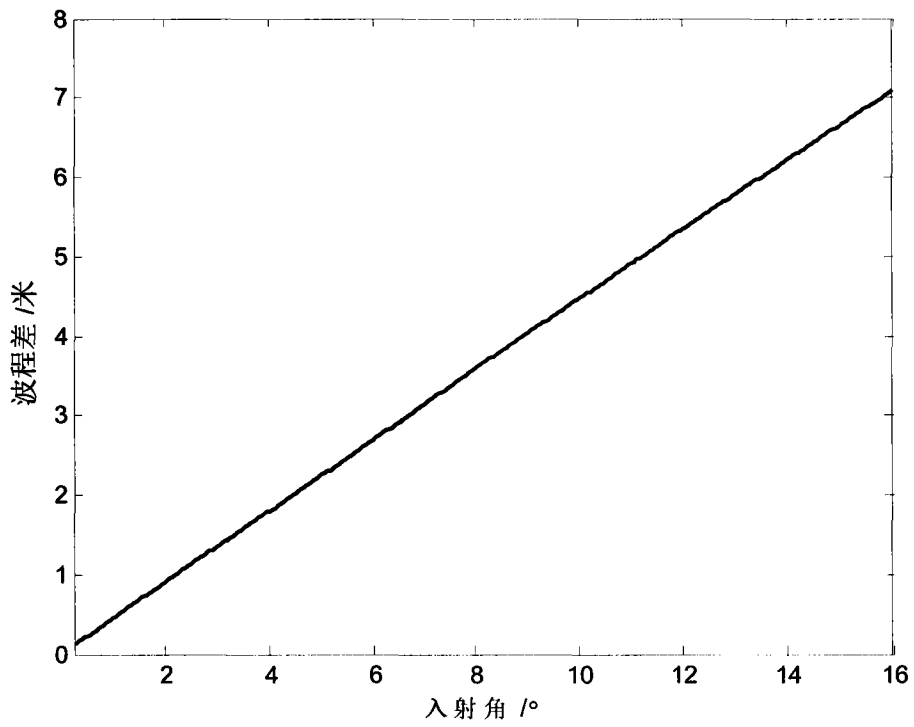


图 3b



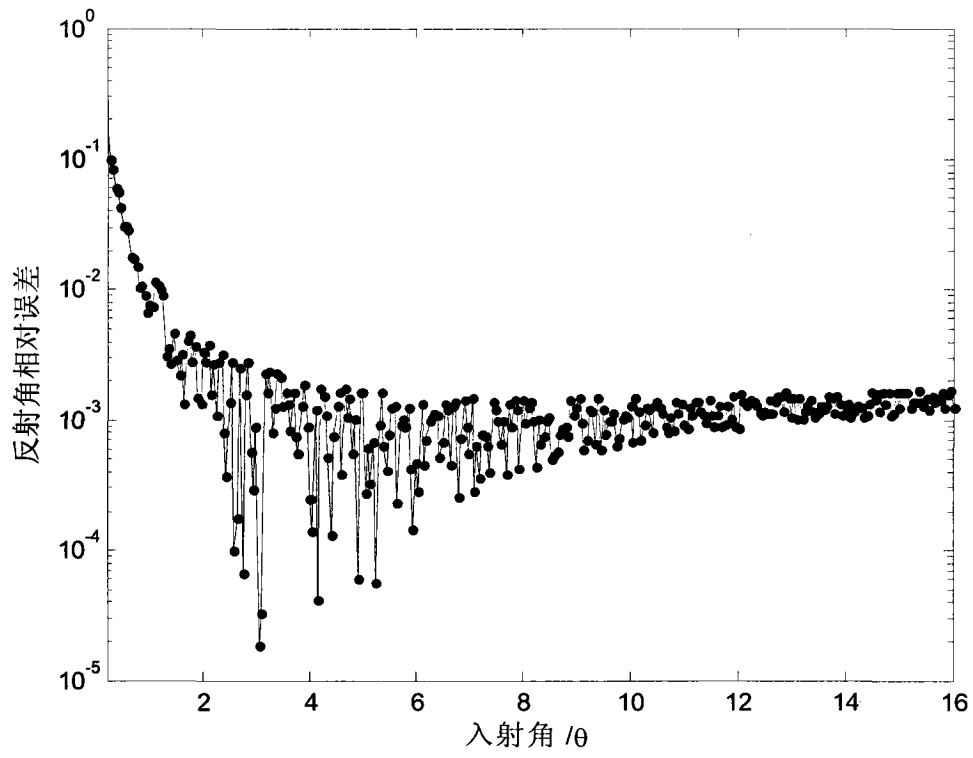


图 4a

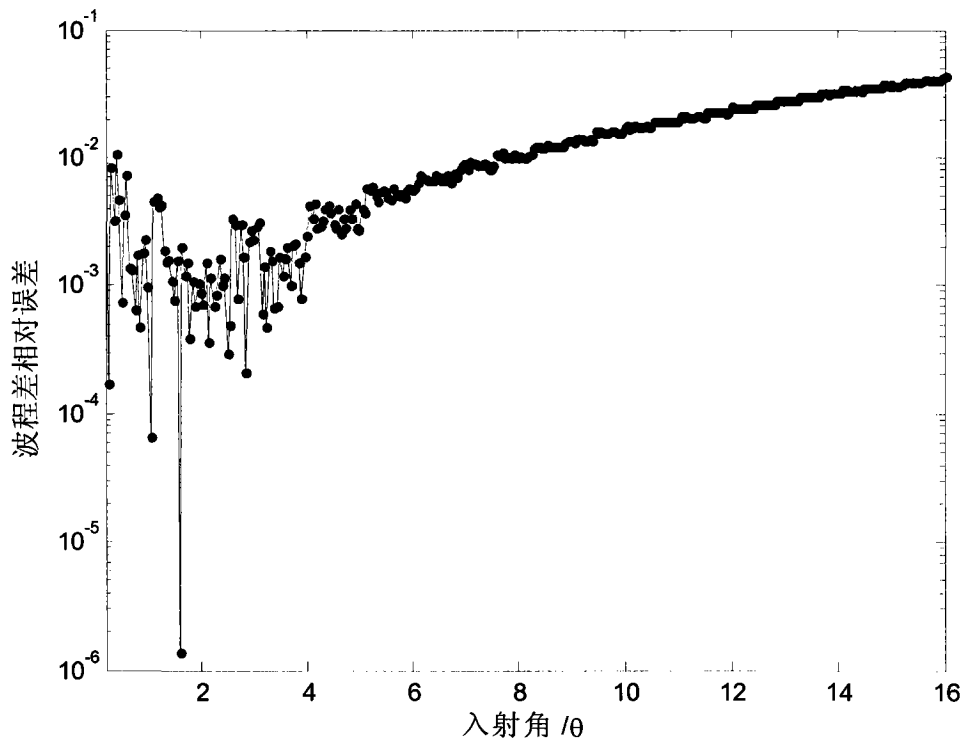


图 4b

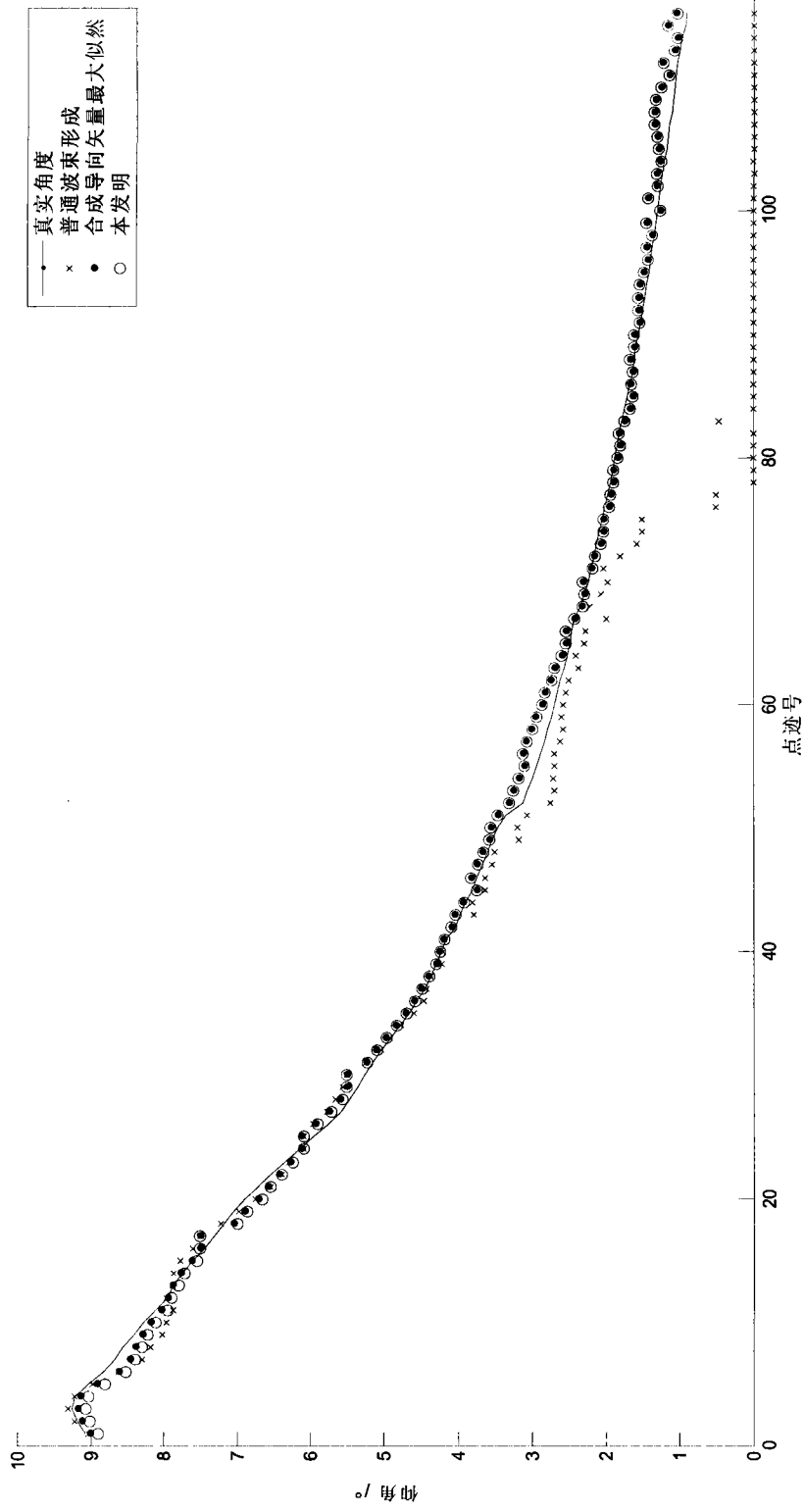


图 5a

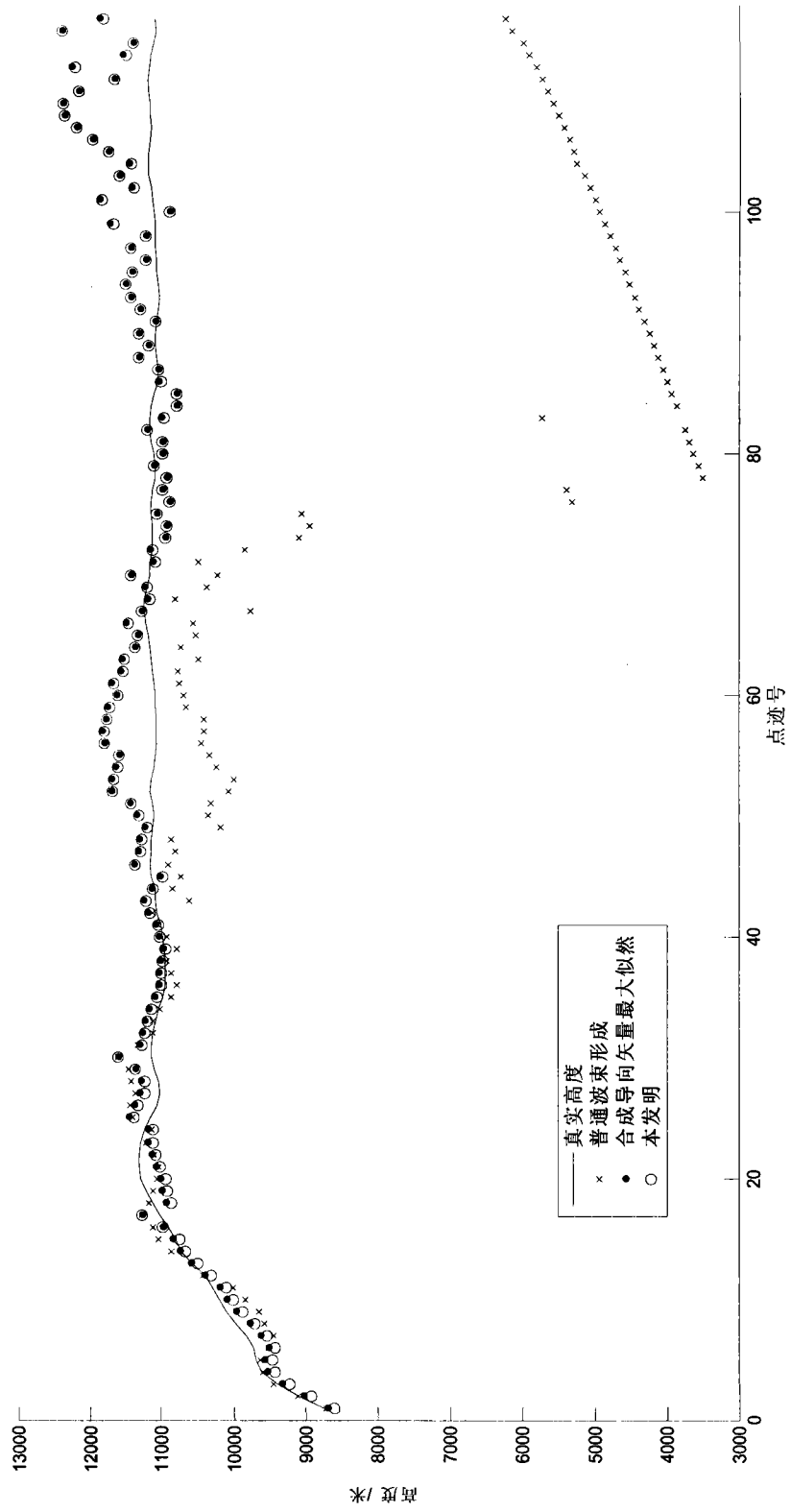


图 5b