

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102288944 B

(45) 授权公告日 2013.09.25

(21) 申请号 201110120849.9

(第1期), 第9-14页.

(22) 申请日 2011.05.12

胡坤娇等. 超分辨算法在米波雷达测高中的应用. 《中国电子科学研究院学报》. 2008, 第3卷(第5期), 第507-509页.

(73) 专利权人 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 朱伟 陈伯孝 杨明磊

Xueya Yang et al.. High-resolution algorithm based on temporal-spatial extrapolation. 《Journal of Systems Engineering and Electronics》. 2010, 第21卷(第1期), 第9-15页.

(74) 专利代理机构 陕西电子工业专利中心

61205

代理人 王品华 朱红星

审查员 杨世兴

(51) Int. Cl.

G01S 7/40 (2006.01)

G01S 13/68 (2006.01)

(56) 对比文件

US 7397424 B2, 2008.07.08, 全文.

CN 1740815 A, 2006.03.01, 全文.

徐源等. 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, 第6卷

权利要求书3页 说明书7页 附图6页

(54) 发明名称

基于地形匹配的数字阵列米波雷达超分辨测高方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于地形匹配的数字阵列米波雷达超分辨测高方法, 主要解决现有技术针对起伏阵地测高误差较大的问题。其实现步骤：对雷达接收的目标信号进行杂波对消和干扰对消处理, 得到对消后目标信号; 使用波束形成法对粗测目标仰角; 根据粗测仰角确定最大似然的搜索范围, 并在搜索范围内搜索; 根据搜索仰角, 计算各阵元对应的地面反射点坐标和目标相对各阵元的直达波波程和反射波波程; 利用直达波波程和反射波波程, 计算相应的直达导向矢量和多径导向矢量; 构造成合成导向矢量并计算其投影矩阵; 最后进行最大似然估计得到目标精确仰角。本发明将雷达阵地海拔参数和合成导向矢量引入超分辨测高中, 提高了测高精度, 可用于目标跟踪。



1. 一种基于地形匹配的数字阵列米波雷达超分辨测高方法，包括以下步骤：

(1) 从雷达回波中提取目标信号，并对该目标信号进行杂波对消和干扰对消处理，得到对消后目标信号；

(2) 使用波束形成法对对消后目标信号进行仰角粗测，得到目标信号的粗测仰角 φ ；

(3) 根据目标信号的粗测仰角 φ 确定最大似然的搜索范围，当 φ 小于 $\psi/2$ 时，搜索范围为 $0 \sim \psi$ ，否则搜索范围为 $\varphi - \psi/2 \sim \varphi + \psi/2$ ，其中 ψ 表示半功率波束宽度；

(4) 在步骤(3)确定的搜索范围内搜索，根据搜索仰角，确定各阵元对应的地面反射点坐标：

(4a) 将反射区地面海拔按照1米间隔分层，根据搜索仰角，计算阵元在各层上的反射点，是通过如下公式进行：

$$h_x(m, n) = \frac{G(m)}{2} - p \sin \frac{\xi}{3} + h_{ax}(m), m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$$

$$h_y(m, n) = n - 1, m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$$

其中： m 表示第 m 个阵元， M 表示阵元个数， n 表示反射区海拔分层的第 n 层， N 为反射区地面海拔起伏高度， $h_x(m, n)$ 和 $h_y(m, n)$ 分别为第 m 个阵元在第 n 层反射点的水平坐标和垂直坐标， $G(m)$ 为目标与第 m 个阵元的水平距离， $G(m) = h_{tx} - h_{ax}(m)$ ，

p 为临时变量， $p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{a_e(h_{ay}(m) + h_{ty} - 2n + 2) + (G(m)/2)^2}$ ， ξ 为临时变量，

$$\xi = \arcsin \frac{2a_e G(m)(h_{ay} - h_{ay}(m))}{p^3}, h_{ax}(m) \text{ 为第 } m \text{ 个阵元的水平坐标, } h_{tx} \text{ 为 } h_{ay}(m) \text{ 为第 } m \text{ 个阵元的垂直坐标, } h_{ay}(m) \text{ 为第 } m \text{ 个阵元的垂}$$

$$h_{tx} = a_e \arccos \left[\frac{(h_{ay} + a_e)^2 + (h_{ay}(1) + a_e)^2 - R_t^2}{2(h_{ay} + a_e)(h_{ay}(1) + a_e)} \right], a_e \text{ 为等效地球半径, } h_{ay}(m) \text{ 为第 } m \text{ 个阵元的垂}$$

直坐标, h_{ty} 为 $h_{ay}(1)$ 的垂直坐标,

$$h_{ty} = \sqrt{(h_{ay}(1) + a_e)^2 + R_t^2 - 2(h_{ay}(1) + a_e)R_t \cos(\pi/2 + \theta)} - a_e, R_t \text{ 为目标距离, } \theta \text{ 为搜索仰}$$

角；

(4b) 查找雷达阵地海拔图上下两侧最近的反射点，记为 a 和 b ；

(4c) 将 a 点和 b 点垂直投影到雷达阵地海拔图，得到投影点 c 和 d ，利用 c 点和 d 点之间的阵地海拔数据做曲线拟合，得到曲线 cd ；

(4d) 将直线 ab 和曲线 cd 的交点作为阵元在起伏地面上的反射点；

(5) 根据地面反射点，计算目标相对各阵元的直达波波程和反射波波程；

(6) 利用直达波波程和反射波波程，计算相应的直达导向矢量和多径导向矢量；

(7) 使用直达导向矢量和多径导向矢量计算合成导向矢量 A_s ：

$$A_s = A_d + A_i,$$

其中： A_d 为直达导向矢量， A_i 为多径导向矢量；

(8) 计算合成导向矢量 A_s 的投影矩阵；

(9) 根据投影矩阵和对消后目标信号的协方差矩阵进行最大似然估计，得到目标精确

仰角。

2. 根据权利要求 1 所述的米波雷达超分辨测高方法, 其中步骤(2)所述的使用波束形成法对对消后目标信号进行仰角粗测, 是通过如下公式进行 :

$$\varphi = \arg \max_{\varphi} (1 / \text{abs}(\mathbf{a}^H(\varphi) \mathbf{R} \mathbf{a}(\varphi)))$$

其中 : φ 为目标粗测仰角, $\arg \max$ 为寻找具有最大评分的参量, abs 为求模运算, $\mathbf{a}(\varphi) = [e^{j\kappa 0 \sin(\varphi)}, e^{j\kappa 1 \sin(\varphi)}, \dots, e^{j\kappa(M-1) \sin(\varphi)}]^T$, κ 表示波数, M 表示阵元个数, 上标 T 表示转置, 上标 H 表示共轭转置, R 为对消后信号的协方差矩阵。

3. 根据权利要求 1 所述的米波雷达超分辨测高方法, 其中步骤(5)所述计算目标相对各阵元的直达波波程和反射波波程, 是通过如下三角公式进行 :

$$R_d(m) = \sqrt{(h_{ay}(m) + a_e)^2 + (h_{by} + a_e)^2 - 2(h_{ay}(m) + a_e)(h_{by} + a_e) \cos(G(m) / a_e)}, m = 1, 2, \dots, M$$

$$R_i(m) = R_1(m) + R_2(m), m = 1, 2, \dots, M$$

其中 : m 表示第 m 个阵元, M 表示阵元个数, $R_d(m)$ 为第 m 个阵元的直达波波程, $h_{ay}(m)$ 为第 m 个阵元的垂直坐标, a_e 为等效地球半径, h_{by} 为目標的垂直坐标, $G(m)$ 为目標与第 m 个阵元的水平距离, $R_i(m)$ 为第 m 个阵元的反射波波程, $R_1(m)$ 为第 m 个阵元与第 m 个阵元对应地面反射点的距离, $R_2(m)$ 为目標与第 m 个阵元对应地面反射点的距离,

$$R_1(m) = \sqrt{(a_e + h_{by}(m))^2 + (a_e + h_{ay}(m))^2 - 2(a_e + h_{by}(m))(a_e + h_{ay}(m)) \cos((h_{bx}(m) - h_{ax}(m)) / a_e)},$$

$R_2(m) = \sqrt{(a_e + h_{by}(m))^2 + (a_e + h_{by}(m))^2 - 2(a_e + h_{by}(m))(a_e + h_{by}(m)) \cos((G(m) - h_{bx}(m) + h_{ax}(m)) / a_e)}$, $h_{bx}(m)$ 和 $h_{by}(m)$ 分别为第 m 个阵元对应地面反射点的水平坐标和垂直坐标, $h_{ax}(m)$ 为第 m 个阵元的水平坐标。

4. 根据权利要求 1 所述的米波雷达超分辨测高方法, 其中步骤(6)所述计算相应的直达导向矢量和多径导向矢量, 是通过如下公式进行 :

$$\mathbf{A}_d(\theta) = [a_d(1), a_d(2), \dots, a_d(M)]^T$$

$$\mathbf{A}_i(\theta) = [a_i(1), a_i(2), \dots, a_i(M)]^T$$

其中 : $\mathbf{A}_d(\theta)$ 为直达导向矢量, $\mathbf{A}_i(\theta)$ 为多径导向矢量, θ 为搜索仰角,

$a_d(m) = e^{-j\kappa R_d(m)}$, $a_i(m) = \Gamma e^{-j\kappa R_i(m)}$, m 表示第 m 个阵元, $R_d(m)$ 为第 m 个阵元的直达波波程, $R_i(m)$ 为第 m 个阵元的反射波波程, Γ 为地面反射系数, 上标 T 表示转置, κ 为波数。

5. 根据权利要求 2 所述的米波雷达超分辨测高方法, 其中步骤(8)所述计算投影矩阵, 是通过如下公式进行 :

$$\mathbf{P}(\theta) = \mathbf{A}_s(\theta) [\mathbf{A}_s^H(\theta) \mathbf{A}_s(\theta)]^{-1} \mathbf{A}_s^H(\theta)$$

其中 : $\mathbf{P}(\theta)$ 为投影矩阵, θ 为搜索仰角, $\mathbf{A}_s(\theta)$ 为合成导向矢量, 上标 H 表示共轭转置, 上标 -1 表示矩阵求逆。

6. 根据权利要求 1 所述的米波雷达超分辨测高方法, 其中步骤(9)所述计算最大似然估计, 是通过如下公式进行 :

$$\theta = \arg \max_{\theta} \text{tr} [\mathbf{P}(\theta) \mathbf{R}]$$

其中： θ 为目标精确仰角， $\arg \max$ 为寻找具有最大评分的参量， tr 为矩阵求迹， $P(\theta)$ 为投影矩阵， R 为对消后信号的协方差矩阵。

基于地形匹配的数字阵列米波雷达超分辨测高方法

技术领域

[0001] 本发明属于雷达信号处理技术领域，涉及米波雷达测高，具体地说是针对数字阵列米波雷达，提出一种基于地形匹配的超分辨测高方法，可用于目标跟踪。

背景技术

[0002] 按照仰角波束的形成方式和扫描方式，三坐标 3D 雷达可分为堆积波束雷达、频扫雷达、相扫雷达和数字波束形成雷达。

[0003] 堆积波束雷达把同时形成的接收波束在仰角上垂直堆积起来，并在方位上机械扫描，以实现搜索目标和目标三坐标的测量。例如，美国的陆基 S 波段三坐标 AN/TPS-43 雷达，以 6 个仰角波束覆盖 20° 的仰角范围。L 波段三坐标 S713Martello 雷达用 8 个堆积波束覆盖 20° 的仰角范围。

[0004] 频率扫描雷达通过控制频率的变化在口径面上产生不同的相位变化梯度，从而通过电控的方法使波束指向所需的仰角，例如，S 波段舰载三坐标 AN/SPS-39、AN/SPS-48 雷达。

[0005] 相控阵三坐标雷达采用移相器在仰角上扫描或控制笔形窄波束扫描。例如 L 波段远程三坐标 AN/TPS-59 战术机动雷达。

[0006] 可见，目前三坐标雷达主要是工作在 S 波段和 L 波段等微波波段。而在米波波段，波束较宽，波束因地、海面反射而导致波瓣分裂。因此，过去的米波雷达均为两坐标雷达，而两坐标雷达又不能满足现代战争的要求。

[0007] 国内外雷达界普遍认为，米波雷达具有反隐身能力。但是米波雷达因受波长长、天线尺寸和架高有限等因素的限制，天线波束宽度宽、角分辨率低，更重要的是因地、海面反射即所谓“多径”问题使其难以探测低空目标，且在多径环境下难以测高，故米波雷达的测高问题一直是雷达界尚未很好解决的难题。

[0008] 为较好地解决米波测高难题，最主要的技术途径是增大天线在高度维的孔径，以减小天线垂直面的波束宽度。而对于低空目标，即使增大天线在高度维的孔径，因无法避开“多径”问题，其解决测高问题主要有三类技术：

[0009] (1) 穿越波束法，也就是单频波瓣分裂法，利用目标穿越波束时回波幅度的变化进行估高。这种方法要求较长的时间，只能估高而不能测高。

[0010] (2) 多频波瓣分裂测高法。利用多个工作频率时分工作，但要求多个频率的工作带宽较宽。这种方法在理论可行，但实际系统较复杂，目前还没有这种实用系统。

[0011] (3) 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。陈伯孝等在 2006 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”。这是一种在垂直维只需 3 根天线的米波雷达的低仰角测高方法。该方法只适合于平坦阵地，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。

[0012] (4) 阵列超分辨处理测高。把阵列信号处理中的超分辨技术应用于分辨直达波信号和多径信号。因为直达波信号和多径信号是相干的,所以这类算法主要是估计相干源波达方向 DOA 的超分辨算法,先使用空间平滑和 Topelitz 变换等方法解相干,然后利用信号子空间、噪声子空间和子阵旋转不变性等来测角。例如,赵光辉等人于 2009 年 2 月在《电子与信息学报》发表的论文“基于差分预处理的米波雷达低仰角处理算法”和胡铁军等人于 2009 年 8 月在《电波科学学报》发表的论文“阵列内插的波束域 ML 米波雷达测高方法”,以及胡晓琴等于 2008 年 8 月在《电波科学学报》发表的论文“米波雷达测高多径模型研究”,提出了考虑多径延时差的米波雷达阵列信号综合模型。该方法是基于平坦阵地模型,同时存在瓶颈,那就是分辨既相干,空间位置又近的目标。

[0013] 上述几种测高方法均只适用于平坦阵地模型,即各天线接收的直达波与地面反射波的波程差满足近似线性关系。但是对于复杂雷达阵地,大型阵列各天线的地面发射点的起伏较大,各天线直达多径波程差不满足近似线性关系,因此在复杂阵地模型下,现有的各种测高方法测角误差较大,不再适用。

发明内容

[0014] 本发明的目的在于克服上述已有技术的不足,提出一种基于地形匹配的超分辨测高方法,消除非线性的直达多径波程差对测角的影响,提高复杂阵地模型下的测角精度和雷达的阵地适应能力。

[0015] 为实现上述目的,本发明通过各阵元地面反射点的二维坐标,来计算不同阵元的直达波波程与地面反射波波程,再利用直达波波程和反射波波程构造合成导向矢量进行超分辨处理,具体步骤包括如下:

[0016] (1) 从雷达回波中提取目标信号,并对该目标信号进行杂波对消和干扰对消处理,得到对消后目标信号;

[0017] (2) 使用波束形成法对对消后目标信号进行仰角粗测,得到目标信号的粗测仰角 φ ;

[0018] (3) 根据目标信号的粗测仰角 φ 确定最大似然的搜索范围,当 φ 小于 $\psi/2$ 时,搜索范围为 $0 \sim \psi$,否则搜索范围为 $\varphi - \psi/2 \sim \varphi + \psi/2$,其中 ψ 表示半功率波束宽度;

[0019] (4) 在步骤(3)确定的搜索范围内搜索,根据搜索仰角,确定各阵元对应的地面反射点坐标;

[0020] (4a) 将反射区地面海拔按照 1 米间隔分层,根据搜索仰角,计算阵元在各层上的反射点;

[0021] (4b) 查找雷达阵地海拔图上下两侧最近的反射点,记为 a 和 b;

[0022] (4c) 将 a 点和 b 点垂直投影到雷达阵地海拔图,得到投影点 c 和 d,利用 c 点和 d 点之间的阵地海拔数据做曲线拟合,得到曲线 cd;

[0023] (4d) 将直线 ab 和曲线 cd 的交点作为阵元在起伏地面上的反射点;

[0024] (5) 根据地面反射点,计算目标相对各阵元的直达波波程和反射波波程;

[0025] (6) 利用直达波波程和反射波波程,计算相应的直达导向矢量和多径导向矢量;

[0026] (7) 使用直达导向矢量和多径导向矢量计算合成导向矢量 A_s :

$$[0027] A_s = A_d + A_i,$$

- [0028] 其中： A_d 为直达导向矢量， A_i 为多径导向矢量；
- [0029] (8) 计算合成导向矢量 A_s 的投影矩阵；
- [0030] (9) 根据投影矩阵和对消后目标信号的协方差矩阵进行最大似然估计，得到目标精确仰角。
- [0031] 本发明与现有技术相比具有如下优点：
- [0032] (1) 本发明由于使用直达波波程和反射波波程构造合成导向矢量，通过合成导向矢量进行测角处理，从而消除了非线性的直达多径波程差对测角的影响，提高了测角精度；
- [0033] (2) 本发明由于使用了雷达阵地海拔图，将雷达阵地海拔参数引入测角算法中，从而提高了雷达的阵地适应能力；
- [0034] (3) 本发明由于采用反射区海拔分层和曲线拟合的方法来计算反射点，因此简化了起伏地面上各阵元发射点的计算过程，减少了算法运算量。

附图说明

- [0035] 图 1 是本发明的流程图；
- [0036] 图 2 是本发明中雷达接收信号模型图；
- [0037] 图 3 是本发明中地面反射点计算示意图；
- [0038] 图 4 是本发明仿真使用的雷达阵地海拔图；
- [0039] 图 5 是用本发明在理想阵地模型下仿真的各阵元直达波和地面反射波的波程差图；
- [0040] 图 6 是用本发明在图 4 模型下仿真的各阵元直达波和地面反射波的波程差图；
- [0041] 图 7 是用不同方法在图 4 模型下对高仰角目标随信噪比变化的测角精度仿真图；
- [0042] 图 8 是用不同方法在图 4 模型下对低仰角目标随信噪比变化的测角精度仿真图；
- [0043] 图 9 是针对实测数据的处理结果图。

具体实施方式

- [0044] 下面结合附图详细说明本发明的内容和效果。
- [0045] 参照图 1，本发明包括如下步骤：
- [0046] 步骤 1：对雷达接收的目标信号进行杂波对消和干扰对消处理，得到对消后目标信号。
- [0047] 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，天线的倾斜角为 θ_a ，架高为 h_{a0} ，阵元间隔为 d ，以第一根天线在海平面的投影点为坐标原点，D 点为第 m 个阵元的地面投影点，E 点为目标的地面投影点， a_e 为等效地球半径， R_t 为目标距离， θ 为搜索仰角，C 点为地心，A 点为第 m 个阵元，A 点水平坐标和垂直坐标分别为 $h_{ax}(m)$ 和 $h_{ay}(m)$ ，T 点为目标，T 点水平坐标和垂直坐标分别为 h_{tx} 和 h_{ty} ， $G(m)$ 表示 D 点与 E 点的水平距离，其中：

$$\begin{aligned} [0048] h_{ax}(m) &= -d(m-1) \cos \theta_a, m = 1, 2L, M \\ [0049] h_{ay}(m) &= h_{a0} + d(m-1) \sin \theta_a, m = 1, 2L, M \end{aligned}$$

[0050]
$$h_{bx} = a_e \arccos \left[\frac{(h_{by} + a_e)^2 + (h_{ay}(1) + a_e)^2 - R_t^2}{2(h_{by} + a_e)(h_{ay}(1) + a_e)} \right]$$

[0051]
$$h_{by} = \sqrt{(h_{ay}(1) + a_e)^2 + R_t^2 - 2(h_{ay}(1) + a_e)R_t \cos(\pi/2 + \theta)} - a_e$$

[0052] $G(m) = h_{tx} - h_{ax}(m)$;

[0053] B 点为目标对应第 m 个阵元的地面反射点, B 点水平坐标和垂直坐标分别为 $h_{bx}(m)$ 和 $h_{by}(m)$, 第 m 个阵元的目标直达波和地面反射波的波程分别为 $R_d(m)$ 和 $R_i(m)$, $R_i(m) = R_1(m) + R_2(m)$, $R_1(m)$ 和 $R_2(m)$ 分别为 B 点与 A 点的距离和 B 点与 T 点的距离。

[0054] 从图 2 信号模型中得到第 m 个阵元接收的目标信号 $x(m)$

[0055] $x(m) = x_d(m) + x_i(m) + c(m) + g(m) + n(m), m = 1, 2L, M$

[0056] 其中 : $x_d(m)$ 为 目标直达波信号, $x_d(m) = se^{-jkR_d(m)}$, $x_i(m)$ 为 目标反射波信号, $x_i(m) = s\Gamma e^{-jkR_i(m)}$, $c(m)$ 为 杂波信号, $g(m)$ 为 干扰信号, $n(m)$ 为 均值为零、方差为 σ^2 的高斯白噪声, s 为 雷达发射信号, k 为 波数, Γ 为 地面反射系数。

[0057] 对 $x(m)$ 通过自适应滤波来对消杂波和干扰, 得到对消后目标信号 $\hat{x}(m)$

[0058]

$$\hat{x}(m) = x_d(m) + x_i(m) + n(m), m = 1, 2L, M$$

[0059] 将对消后目标信号用矢量 X 表示为 :

[0060]

$$X = [\hat{x}(1), \hat{x}(2), \dots, \hat{x}(M)]^T$$

[0061] 其中 :上标 T 表示转置。

[0062] 步骤 2 :使用波束形成法对对消后目标信号进行仰角粗测, 得到目标信号的粗测仰角 φ :

[0063]

$$\varphi = \arg \max_{\varphi} (1 / \text{abs}(\mathbf{a}^H(\varphi) \mathbf{R} \mathbf{a}(\varphi)))$$

[0064] 其中 : $\arg \max$ 为 寻找具有最大评分的参量, abs 为 求模运算,

[0065] $\mathbf{a}(\varphi) = [e^{jk \cdot 0 \cdot \sin(\varphi)}, e^{jk \cdot 1 \cdot \sin(\varphi)}, \dots, e^{jk \cdot (M-1) \cdot \sin(\varphi)}]^T$, k 表示波数, M 表示阵元个数, R 为 对消后信号的协方差矩阵, $R = XX^H$, 上标 T 表示转置, 上标 H 表示共轭转置, X 为 对消后目标信号矢量。

[0066] 步骤 3 :根据目标信号的粗测仰角 φ 确定最大似然的搜索范围, 当 φ 小于 $\psi/2$ 时, 搜索范围为 $0 \sim \psi$, 否则搜索范围为 $\varphi - \psi/2 \sim \varphi + \psi/2$, 其中 ψ 表示半功率波束宽度。

[0067] 步骤 4 :在步骤 (3) 确定的搜索范围内搜索, 根据搜索仰角, 确定各阵元对应的地面反射点坐标。

[0068] 由于反射点位于阵地海拔图上, 而阵地海拔图难以使用数学表达式表示, 因此反射点坐标不易直接求解, 在此使用海拔分层和曲线拟合的方式进行求解, 其求解步骤参照图 3, 包括如下 :

[0069] (4a) 将反射区地面海拔按照 1 米间隔分层, 根据搜索仰角, 计算阵元在各层上的反射点水平坐标 $h_x(m, n)$ 和垂直坐标 $h_y(m, n)$, 图 3 中横轴表示与雷达阵地的水平距离, 纵轴表示海拔高度, 阴影表示雷达阵地海拔, 横虚线表示海拔分层, + 表示阵元在各层上的反

射点：

[0070] $h_x(m, n) = \frac{G(m)}{2} - p \sin \frac{\xi}{3} + h_{ax}(m), m = 1, 2, L, M, n = 1, 2, L, N$

[0071] $h_y(m, n) = n-1, m = 1, 2, L, M, n = 1, 2, L, N$

[0072] 其中： m 表示第 m 个阵元， M 表示阵元个数， n 表示反射区海拔分层的第 n 层， N 为反射区地面海拔起伏高度， $h_x(m, n)$ 和 $h_y(m, n)$ 分别为第 m 个阵元在第 n 层反射点的水平坐标和垂直坐标， $G(m)$ 为目标与第 m 个阵元的地面水平距离， $h_{ax}(m)$ 为第 m 个阵元的水平坐标， p 为临时变量， $p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{a_e(h_{ay}(m) + h_{ty} - 2n + 2) + (G(m)/2)^2}$ ， ξ 为临时变量，

$\xi = \arcsin \frac{2a_e G(m)(h_{ty} - h_{ay}(m))}{p^3}$ ， a_e 为等效地球半径， $h_{ay}(m)$ 为第 m 个阵元的垂直坐标， h_{ty} 为目标的垂直坐标；

[0073] (4b) 查找雷达阵地海拔图上下两侧最近的反射点，记为 a 和 b ；

[0074] (4c) 将 a 点和 b 点垂直投影到雷达阵地海拔图，得到投影点 c 和 d ，图 3 中竖虚线表示垂直投影，利用 c 点和 d 点之间的阵地海拔数据做曲线拟合，得到曲线 cd ；

[0075] (4d) 将直线 ab 和曲线 cd 的交点作为阵元在起伏地面上的反射点。

[0076] 步骤 5：根据地面反射点，通过如下三角公式计算目标至各阵元的直达波波程 $R_d(m)$ 和反射波波程 $R_i(m)$ ：

[0077] $R_d(m) = \sqrt{(h_{ay}(m) + a_e)^2 + (h_{ty} + a_e)^2 - 2(h_{ay}(m) + a_e)(h_{ty} + a_e) \cos(G(m)/a_e)}, m = 1, 2, L, M$

[0078] $R_i(m) = R_1(m) + R_2(m), m = 1, 2, L, M$

[0079] 其中： m 表示第 m 个阵元， M 表示阵元个数， $R_d(m)$ 为目标至第 m 个阵元的直达波波程， $h_{ay}(m)$ 为第 m 个阵元的垂直坐标， a_e 为等效地球半径， h_{ty} 为目标的垂直坐标， $G(m)$ 为目标与第 m 个阵元的地面水平距离， $R_i(m)$ 为目标至第 m 个阵元的反射波波程， $R_1(m)$ 为第 m 个阵元与第 m 个阵元对应地面反射点的距离， $R_2(m)$ 为目标与第 m 个阵元对应地面反射点的距离，

[0080] $R_1(m) = \sqrt{(a_e + h_{by}(m))^2 + (a_e + h_{ay}(m))^2 - 2(a_e + h_{by}(m))(a_e + h_{ay}(m)) \cos((h_{bx}(m) - h_{ax}(m))/a_e)},$

[0081] $R_2(m) = \sqrt{(a_e + h_{by}(m))^2 + (a_e + h_{ty})^2 - 2(a_e + h_{by}(m))(a_e + h_{ty}) \cos((G(m) - h_{bx}(m) + h_{ax}(m))/a_e)},$

[0082] $h_{bx}(m)$ 和 $h_{by}(m)$ 分别为第 m 个阵元对应地面反射点的水平坐标和垂直坐标， $h_{ax}(m)$ 为第 m 个阵元的水平坐标。

[0083] 步骤 6：利用直达波波程 $R_d(m)$ 和反射波波程 $R_i(m)$ ，计算相应的直达导向矢量 $A_d(\theta)$ 和多径导向矢量 $A_i(\theta)$ ：

[0084] $A_d(\theta) = [a_d(1), a_d(2), L, a_d(M)]^T$

[0085] $A_i(\theta) = [a_i(1), a_i(2), L, a_i(M)]^T$

[0086] 其中： $a_d(m) = e^{-j\kappa R_d(m)}$ ， $a_i(m) = \Gamma e^{-j\kappa R_i(m)}$ ， $m = 1, 2, L, M$ ， m 表示第 m 个阵元， M 表示阵元个数， κ 表示波数， Γ 为地面反射系数，上标 T 表示转置。

[0087] 步骤 7：使用直达导向矢量 $A_d(\theta)$ 和多径导向矢量 $A_i(\theta)$ 计算合成导向矢量 $A_s(\theta)$ ：

[0088] $A_s(\theta) = A_d(\theta) + A_i(\theta)$

[0089] 其中： θ 为搜索仰角。

[0090] 步骤 8：使用合成导向矢量 $\mathbf{A}_s(\theta)$ 计算合成导向矢量的投影矩阵 $\mathbf{P}(\theta)$ ：

$$\mathbf{P}(\theta) = \mathbf{A}_s(\theta) [\mathbf{A}_s^H(\theta) \mathbf{A}_s(\theta)]^{-1} \mathbf{A}_s^H(\theta)$$

[0092] 其中： θ 为搜索仰角，上标 H 表示共轭转置，上标 -1 表示矩阵求逆。

[0093] 步骤 9：根据投影矩阵和对消后目标信号的协方差矩阵进行最大似然估计，得到目标精确仰角：

$$[\theta] = \arg \max_{\theta} \text{tr} [\mathbf{P}(\theta) \mathbf{R}]$$

[0095] 其中： θ 为目标精确仰角， $\arg \max$ 为寻找具有最大评分的参量， tr 为矩阵求迹， $\mathbf{P}(\theta)$ 为投影矩阵， \mathbf{R} 为对消后信号的协方差矩阵。

[0096] 本发明的效果可以通过以下仿真结果和实测数据处理结果进一步说明。

[0097] 1. 仿真环境及条件

[0098] 仿真环境使用图 4 所示的雷达阵地海拔图。横轴表示与雷达阵地的水平距离，纵轴表示海拔高度，阴影表示雷达阵地海拔。雷达阵地的水平 450 米以内为起伏地形，水平 450 米以外为海平面。

[0099] 仿真条件为以下雷达参数：天线架高 6 米，倾角 6° ，阵元个数 22，阵元间隔为半波长，快拍数 10。

[0100] 2. 仿真内容

[0101] 仿真 1，用本发明在理想阵地模型下对各阵元的直达波和地面反射波的波程差进行仿真，仿真结果如图 5 所示。其中横轴表示目标海拔高度从 1000 米至 15000 米变化，纵轴表示直达波和地面反射波的波程差。图 5 中显示了目标与雷达水平距离 50 千米，目标海拔高度按照横轴变化时第 1、6、11、16 和 22 个阵元的直达波和地面反射波的波程差。从图 5 可以得出，在理想阵地模型下，各阵元的直达波和地面反射波的波程差满足线性变化。

[0102] 仿真 2，用本发明在图 4 模型下对各阵元的直达波和地面反射波的波程差进行仿真，仿真结果如图 6 所示。其中横轴表示目标海拔高度从 1000 米至 15000 米变化，纵轴表示直达波和地面反射波的波程差。图 6 中显示了目标与雷达水平距离 50 千米，目标海拔高度按照横轴变化时第 1、6、11、16 和 22 个阵元的直达波和地面反射波的波程差。从图 6 可以得出，在起伏阵地模型下，各阵元的直达波和地面反射波的波程差不满足线性变化。

[0103] 仿真 3，用现有的波束形成算法、前后向空间平滑 MUSIC 算法和本发明分别在图 4 模型下对高仰角目标进行测角精度仿真，仿真结果如图 7 所示。其中横轴表示信噪比从 -5 分贝至 15 分贝变化，纵轴表示测角误差。仿真选取的目标参数：目标仰角 4 度，目标与雷达距离 50 千米，蒙特卡罗实验次数 100 次。图 7 中 DBF 表示波束形成算法在信噪比按照横轴变化时的测角误差，SSMUSIC 表示前后向空间平滑 MUSIC 算法在信噪比按照横轴变化时的测角误差，GSVML 表示本发明在信噪比按照横轴变化时的测角误差。从图 7 可以得出，对高仰角目标现有的波束形成算法、前后向空间平滑 MUSIC 算法测角误差偏大，而本发明的测角误差最小。

[0104] 仿真 4，用现有的波束形成算法、前后向空间平滑 MUSIC 算法和本发明分别在图 4 模型下对低仰角目标进行测角精度仿真，仿真结果如图 8 所示。其中横轴表示信噪比从 -5 分贝至 15 分贝变化，纵轴表示测角误差。仿真选取的目标参数：目标仰角 1 度，目标与雷达

距离 200 千米,蒙特卡罗实验次数 100 次。图 8 中 DBF 表示波束形成算法在信噪比按照横轴变化时的测角误差,SSMUSIC 表示前后向空间平滑 MUSIC 算法在信噪比按照横轴变化时的测角误差,GSVML 表示本发明在信噪比按照横轴变化时的测角误差。从图 8 可以得出,对低仰角目标现有的波束形成算法、前后向空间平滑 MUSIC 算法测角误差偏大,而本发明的测角误差最小。

[0105] 3. 对某警戒雷达实测数据的测角结果

[0106] 该警戒雷达架设阵地海拔图如图 9(a) 所示,其中横轴表示与雷达阵地的水平距离,纵轴表示海拔高度,实线表示雷达阵地海拔,雷达阵地的水平 6 千米以内为起伏地形,水平 6 千米以外为海平面。

[0107] 用现有的波束形成算法、前后向空间平滑 MUSIC 算法和本发明对该警戒雷达实测数据进行测角处理,测角处理结果如图 9(b) 所示,其中横轴表示目标与阵地的距离,纵轴表示距离随横轴变化时的测角误差。图 9(b) 中 DBF 表示波束形成算法的测角误差,SSMUSIC 表示前后向空间平滑 MUSIC 算法的测角误差,GSVML 表示本发明的测角误差。从图 9(b) 可以得出,现有的波束形成算法、前后向空间平滑 MUSIC 算法测角误差偏大,而本发明的测角误差最小。

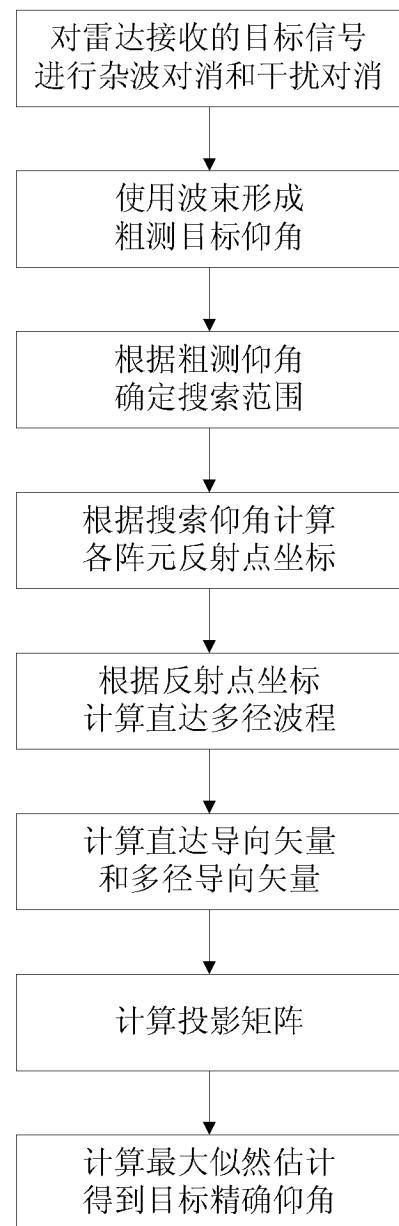


图 1

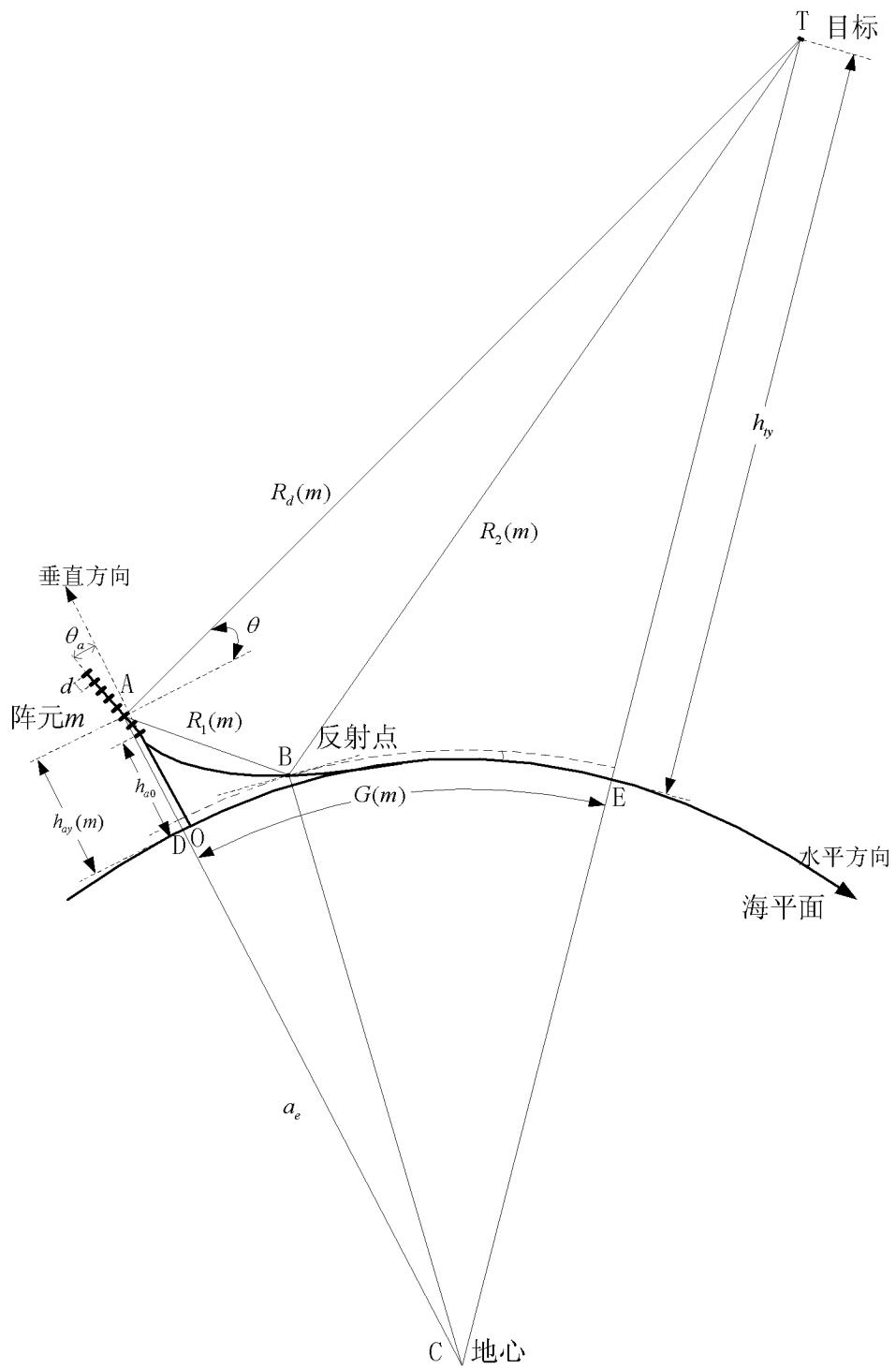


图 2

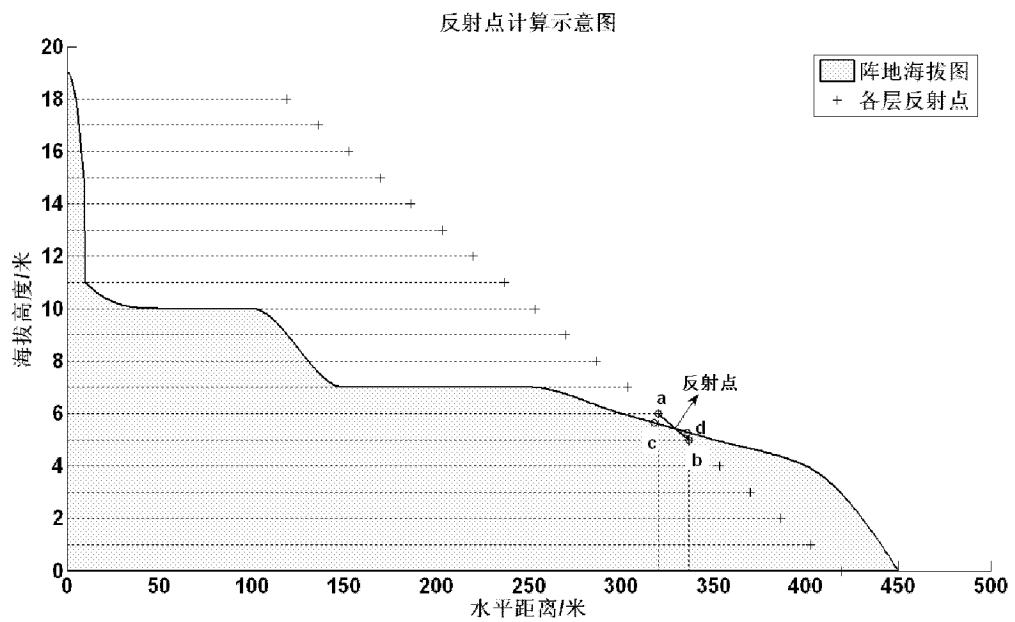


图 3

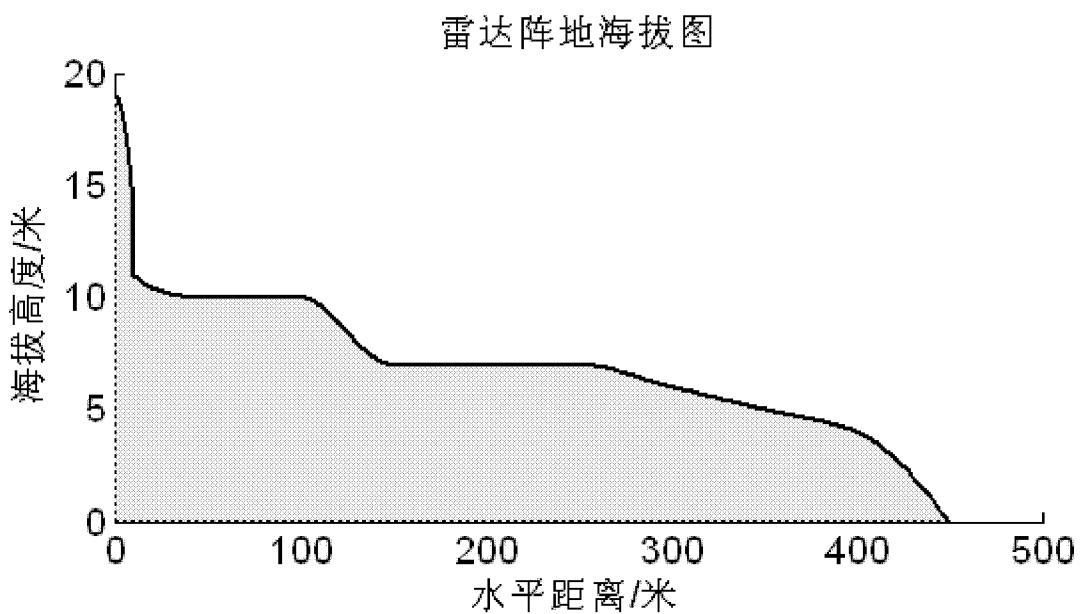


图 4

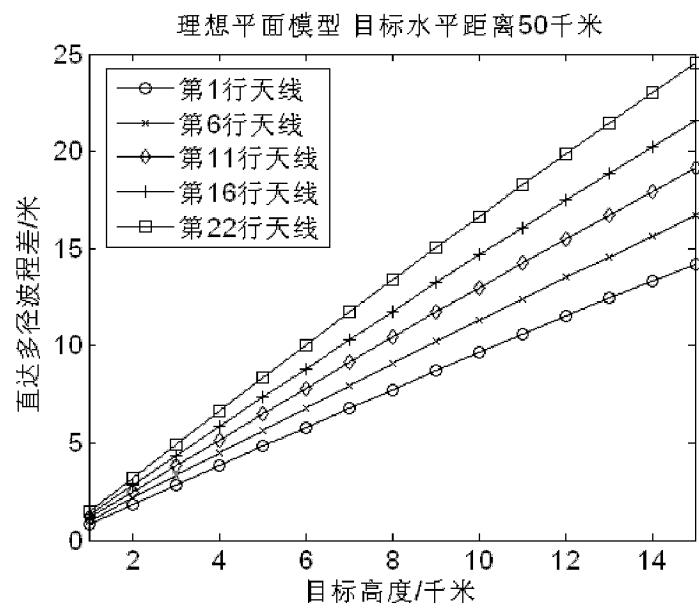


图 5

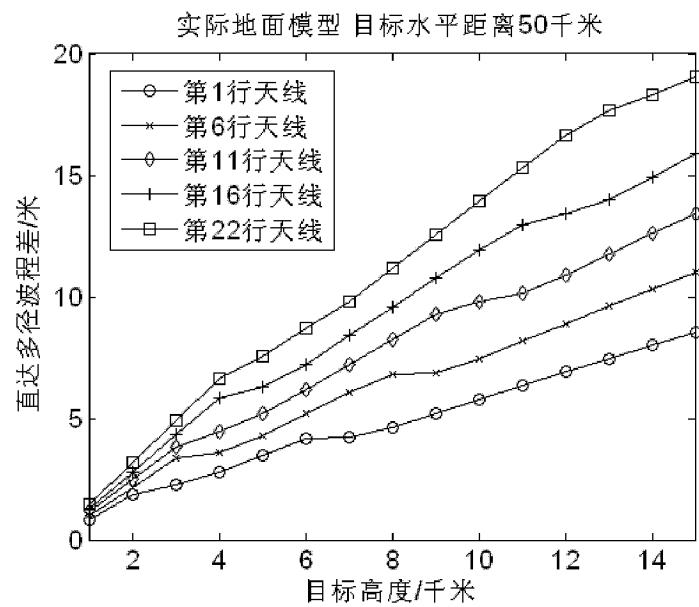


图 6

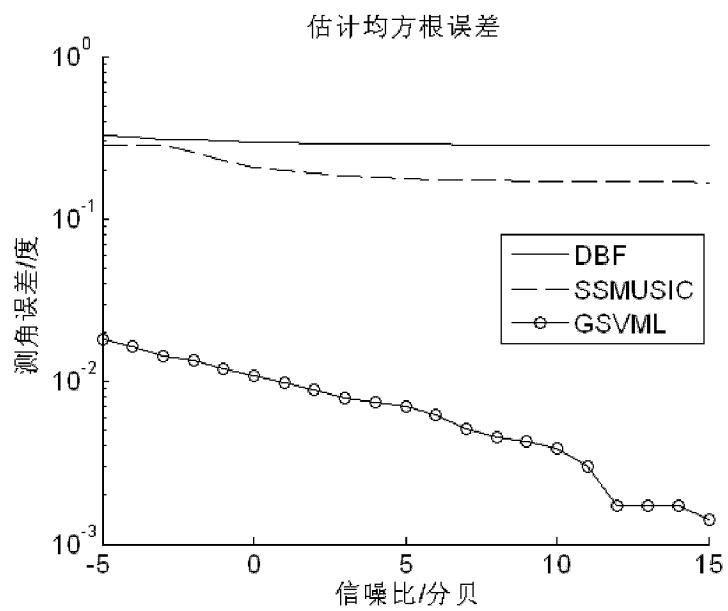


图 7

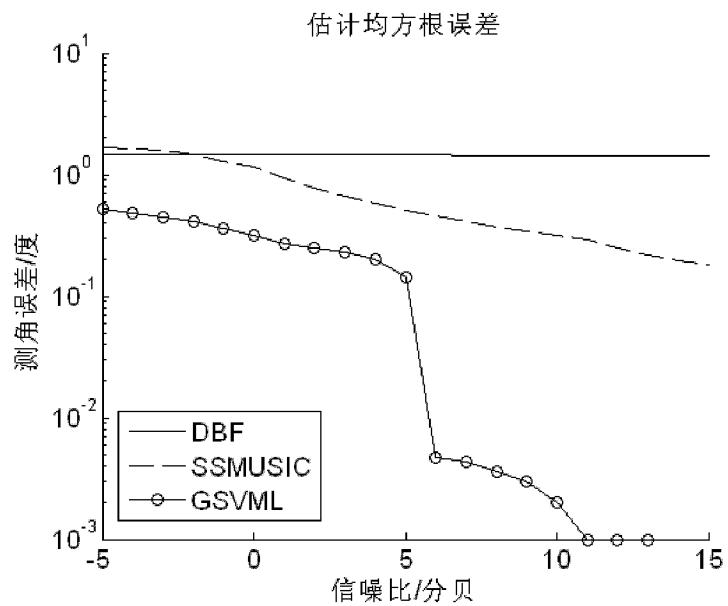


图 8

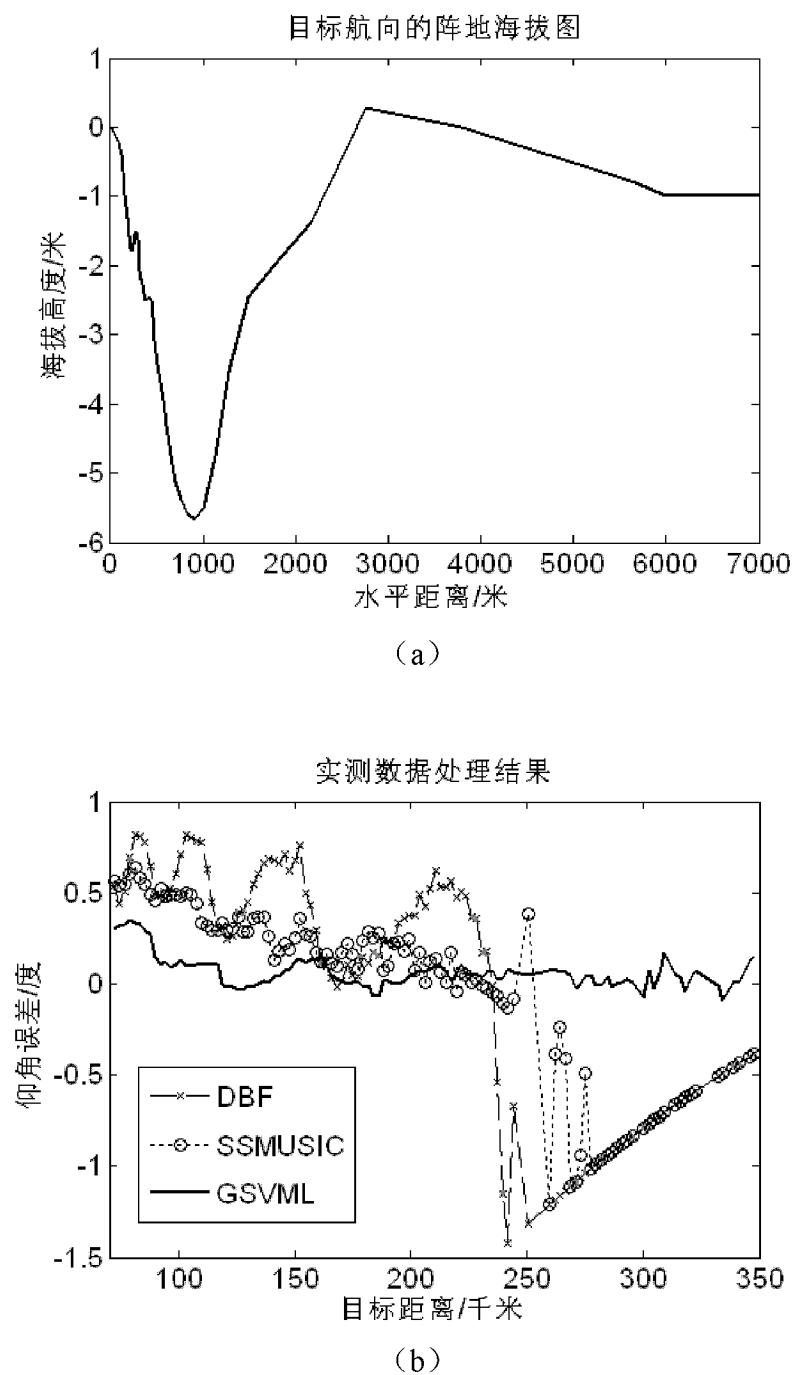


图 9