

多径条件下子阵级低角测高算法*

徐振海, 张亮, 熊子源, 肖顺平

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对多径条件下的测高问题,提出了一种子阵级处理新算法。采用均匀子阵划分形成三个子阵;在子阵级解析求出协方差矩阵的正交矢量,进而构造仰角谱,谱峰的位置即目标仰角;还可以估计出复反射系数。仿真分析给出了该方法的性能与 SNR、目标仰角以及复反射系数的关系,某米波雷达实测数据检验了该方法的有效性,仰角测量误差达到阵列天线波束宽度的 1/84。研究表明:该算法本身不依赖未知的复反射系数,并且信号处理维数低,运算量较低,可以应用在舰载雷达和米波三坐标雷达中。

关键词:多径;子阵;低角测高;复反射系数

中图分类号:TN820 **文献标志码:**A **文章编号:**1011-2486(2012)04-164-05

Low-angle height finding algorithm at sub-array level under multi-path environment

XU Zhenhai, ZHANG Liang, XIONG Ziyuan, XIAO Shunping

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aimed at the Low-angle Height Finding problem under multi-path environment, a novel low angle height finding algorithm at sub-array level is proposed. First, the whole array was divided into three equal sub-arrays. Then, the orthogonal vector of covariance matrix at sub-array level was calculated accurately, not by Eigen Decomposition. Next, the angle spectrum was presented, whose peak just accords with the DOA of target. Finally, the complex reflection coefficient was estimated after the estimated DOA. How this algorithm relies on the SNR, the target's elevation and complex reflection coefficient has been explained by simulations. Its efficiency was verified by outdoor data obtained by VHF band radar. The elevation angle error is 1.19 percent of beam width of array. This algorithm is independent on the unknown complex reflection coefficient, and the computation is lowered greatly. It can be applied in ship-borne radar and VHF band 3-coordinate radar.

Key words: multi-path; sub-array; low-angle height finding; complex reflection coefficient

在雷达探测领域,多径效应严重影响着低空(低仰角)目标的探测与测量,尤其对舰载雷达和米波雷达,其本质原因是在空域、时域和频域都很难分辨多径信号和直达信号。针对多径问题,从上世纪 70 年代开始,国际雷达界开展了系统、深入的研究,特别是在舰载雷达方面取得了一定成果,然而对于米波三坐标雷达而言,低角测高仍然是其中的技术瓶颈,其军事需求依然十分强烈。

采用阵列信号处理是当前解决多径条件下低角测高的重要技术途径。阵列信号处理技术又可分为两大类方法:第一类是基于特征分解的高分辨方法,其核心是利用高分辨算法来区分目标与其镜像,进而提高目标高度的估计精度,然而该类方法在实践中效果并不理想,因为高分辨算法受到相干源、快拍有限的限制而性能下降或者失效;第二类是基于精确多径模型的极大似然方法^[1-7],其核心是对多径信号进行精确建模,减少

估计问题中未知参量的数目,进而改善目标高度的估计精度。具有代表性的研究机构有两家:加拿大渥太华国防研究院和加拿大 McMaster 大学,并且在上世纪 90 年代分别开发了低角跟踪实验系统 ELAT(Experimental Low Angle Tracking)和多参量自适应雷达实验系统 MARS(Multi-parameter Adaptive Radar System),并开展了实验研究,1995 年之后未见报导。

以上研究均针对海环境,海水反射系数可以解析得到,而对于陆地环境,由于土壤是混合物,其复介电常数^[8]与土壤成份、含水量、空隙等因素有关,仅有半经验模型;并且土壤性质、植被覆盖都不具有平稳性,反射区域反射系数通常是未知与时变的,尤其是米波波段没有可供参考的研究成果。因此需要迫切研究“不依赖于复反射系数”的低角测高方法。此外,以上的研究大都在阵元域进行,而对于单目标多径情况,阵列自由度

* 收稿日期:2011-05-07

基金项目:国家自然科学基金重点项目(60736006);国家自然科学基金项目(60901072)

作者简介:徐振海(1977—),男,河南卫辉人,副教授,博士后,硕士生导师,E-mail: xzh930@yahoo.com.cn

远大于信号维数,因此可以考虑降维处理问题。基于以上两点,本文提出了一种多径条件下子阵级低角测高方法,并重点分析其原理与测角性能。

1 多径条件下阵列信号模型

在本文中,考虑镜面反射机理,雷达阵列天线接收的信号包括:直达信号与多径反射信号,暂且不考虑漫反射问题。

1.1 对称多径几何关系

雷达-目标几何关系如图1所示,对于米波三坐标雷达而言,由于雷达天线高度在米级,目标高度在千米级,目标距离在百千米级,因此,反射点的位置位于雷达阵地附近(在1千米范围内),因此可以假定反射区域是理想平面,这样反射波可以看作平面波,经地面反射到达各个阵元的射线是平行的。

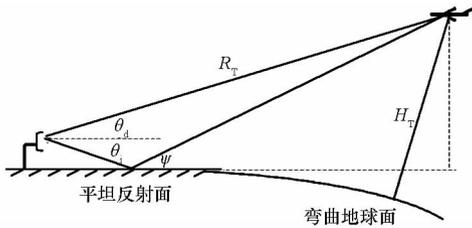


图1 雷达-目标几何关系示意图
Fig. 1 Radar-target Geometry

阵列天线结构如图2所示,阵列天线严格垂直于地面,阵列法向平行于地面,因此,直达信号和多径反射信号入射角关于阵列法向对称,并且多径反射信号入射角与擦地角相等,即:

$$\theta_i = -\theta_d = -\theta \quad (1)$$

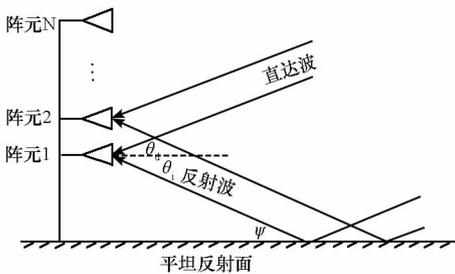


图2 镜面反射条件下阵列信号接收示意图

Fig. 2 The array reception model of specular reflection

理论上反射信号入射角要“略微”大于直达信号入射角,即非对称多径的情况。实际上在雷达-目标几何关系给定的条件下,也可以根据直达信号角度精确解析求出反射信号角度^[9]。本文中考虑的对称多径的情况相当于一种“合理”简化。

1.2 镜面反射机理

考虑镜面反射机理,在时域多径信号与直达

信号相干,它们之间用复反射系数来建模,即:

$$a_i(t) = \rho \cdot a_d(t) = \rho \cdot a(t) \quad (2)$$

在这里复反射系数是一个“等效”或“综合”的概念,不仅涵盖物理意义上的复反射系数,还包含雷达系统因素。其与多种因素有关,包括:反射面介电常数、雷达波长、擦地角等。需要说明的是:对于阵列雷达,还需要明确复反射系数定义的位置,只要在分析中明确,不会影响研究结论。

1.3 阵列接收信号模型

对于N元垂直均匀线阵(如图2所示),阵元间距为半波长,且假设均为各向同性阵元。阵列天线接收信号包括直达信号与多径信号,利用前述多径信号与直达信号的关系,阵列接收信号可表示为:

$$\mathbf{x}(t) = [\mathbf{s}(\theta) + \rho \mathbf{s}(-\theta)] \mathbf{a}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (3)$$

也可以用矩阵表示为:

$$\mathbf{x}(t) = [\mathbf{s}(\theta) \quad \mathbf{s}(-\theta)] \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \rho \end{bmatrix} \cdot \mathbf{a}(t) + \mathbf{n}(t) = \mathbf{A}(\theta) \rho \mathbf{a}(t) + \mathbf{n}(t)$$

其中: $\mathbf{A}(\theta) = [\mathbf{s}(\theta) \quad \mathbf{s}(-\theta)]$ 为阵列流型矩阵, ρ 为相干矢量, $\mathbf{n}(k)$ 为阵列接收机热噪声矢量,假设各阵元信道内部噪声为零均值平稳随机过程,噪声过程的二阶矩如下: $\mathbf{R}_n = \sigma^2 \mathbf{I}_N$ 。

$\mathbf{s}(\theta)$ 为阵列信号导向矢量,当以第1阵元为参考时,信号导向矢量可具体表示为: $\mathbf{s}(\theta) = [1 \quad e^{j\phi} \quad e^{j2\phi} \quad \dots \quad e^{j(N-1)\phi}]^T$,其中: $\phi = \pi \sin \theta$ 为相邻阵元相位差,并且 $\|\mathbf{s}(\theta)\| = N$ 。

在该模型中,仰角 θ 和复反射系数 ρ 均是未知的,而仰角是待求的量,求出了仰角再结合目标的距离就可以求出目标的高度。

2 子阵级低角测高算法

子阵级阵列信号处理的思路就是:将整个阵列划分为若干子阵,在子阵级进行处理从而实现降维。子阵划分^[10]可以分为均匀子阵划分和非均匀子阵划分,通常采用均匀子阵划分。子阵划分还可以分为非重叠子阵划分和重叠子阵划分。重叠子阵划分由于子阵复用的单元不容易进行波束指向控制,不便于工程硬件实现,因此工程实现上倾向于非重叠子阵划分,然而当所有信号变换到基带以后,重叠子阵还是可以实现的。本文重点分析均匀、非重叠子阵划分方式以及子阵级信号处理问题,其他情况可以类似分析推导。

2.1 均匀子阵划分

对于镜面反射情况,由于仅考虑直达与多径

两个源的问题,只要子阵级自由度大于 2 即可,因此在本文中考虑均匀非重叠三子阵划分方法,3 个子阵方向图平行,均指向阵列的法向,并且不采用幅度加权。不妨假设 $N = 3N_1$,子阵阵元数为 N_1 ,均匀划分的降维矩阵为:

$$T = \begin{bmatrix} I_{N_1,1} & \mathbf{0}_{N_1,1} & \mathbf{0}_{N_1,1} \\ \mathbf{0}_{N_1,1} & I_{N_1,1} & \mathbf{0}_{N_1,1} \\ \mathbf{0}_{N_1,1} & \mathbf{0}_{N_1,1} & I_{N_1,1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $I_{N_1,1} = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$ 。经过子阵划分后,原 N 元阵列天线等效为一个“稀疏”的三元阵列天线,每个子天线有特定的方向图,只不过每个阵元有“窄”的天线方向图。

子阵划分后, N 维的矩阵问题降维为三维的矩阵问题,对于三维的矩阵问题,不需要复杂的特征分解,正交向量可以解析求出。

2.2 子阵级协方差矩阵

经过子阵划分与波束形成后,新的阵列数据模型为:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(t) &= T^H \mathbf{x}(t) = T^H \mathbf{A} \rho \mathbf{a}(t) + T^H \mathbf{n}(t) \\ &= \mathbf{B} \cdot \rho \mathbf{a}(t) + T^H \mathbf{n}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= T^H \mathbf{A} = [T^H \mathbf{s}(\theta) \quad T^H \mathbf{s}(-\theta)] \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{G} & \mathbf{G}^* \\ e^{jN_1\phi} \mathbf{G} & e^{-jN_1\phi} \mathbf{G}^* \\ e^{j2N_1\phi} \mathbf{G} & e^{-j2N_1\phi} \mathbf{G}^* \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

为三元稀疏阵列导向矢量矩阵。列向量 $\mathbf{B}(:,1)$ 表示三个子阵波束对直达信号的复接收增益,列向量 $\mathbf{B}(:,2)$ 表示三个子阵波束对多径反射信号的复接收增益。

经变换后,阵列热噪声方差变为: $T^H \sigma^2 I_N T = N_1 \sigma^2 I_3$, σ^2 为阵元热噪声方差,说明均匀非重叠子阵划分后,阵列噪声仍然为白噪声。子阵级阵列协方差矩阵为:

$$R_y = \mathbf{B} \rho \rho^H \mathbf{B}^H \cdot \sigma_a^2 + N_1 \sigma^2 I_3 \quad (7)$$

2.3 协方差矩阵正交向量

子阵级阵列协方差矩阵 R_y 为 3 维 Hermiter 矩阵,其正交矢量可以解析求解,而不用复杂的正交分解。其正交矢量满足方程: $\mathbf{B}^H \mathbf{v} = \mathbf{0}$, 直接给出正交向量为:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} 1 \\ -2\cos(N_1\phi) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

可以看出:正交矢量是相邻阵元间相位差 ϕ 的函数,更进一步是仰角 θ 的函数。在子阵级,正

交矢量即与直达信号矢量 $\mathbf{B}(:,1)$ 正交,又与多径矢量 $\mathbf{B}(:,2)$ 正交,所以与它们张成的平面正交,进一步与直达与多径合成矢量 $\mathbf{B} \cdot \rho$ 正交。

2.4 子阵级角度谱

在子阵级,阵列的协方差矩阵可以由阵列快拍数据得到,即 $\hat{R}_y = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k y_k^H$ 。根据正交矢量与协方差矩阵的关系可得仰角的估计为:

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} f(\theta) = \frac{\mathbf{v}^H(\theta) \hat{R}_y \mathbf{v}(\theta)}{\mathbf{v}^H(\theta) \mathbf{v}(\theta)} \quad (9)$$

该代价函数的目的是在子阵级形成“零点”,抑制与目标有关的直达分量与多径分量,输出的仅为噪声分量。为方便起见,仰角谱函数可以定义为:

$$P(\theta) = \frac{1}{f(\theta)} = \frac{\mathbf{v}^H(\theta) \mathbf{v}(\theta)}{\mathbf{v}^H(\theta) \hat{R}_y \mathbf{v}(\theta)} \quad (10)$$

可以看出:仰角谱函数的定义与复反射系数无关,因此避免了复反射系数的估计与搜索。根据谱峰的位置得到目标的仰角,进而得到目标的高度。

$$\hat{H} = R \sin \hat{\theta} + \frac{R^2}{2R_E} \quad (11)$$

其中: R 为目标距离, R_E 为地球半径。

2.5 复反射系数的估计

当 $\hat{\theta} = \theta_d$ 时, $\mathbf{B}^H \mathbf{v}(\theta_d) = \mathbf{0}$, 此时:

$$\begin{aligned} f(\hat{\theta}) &= \frac{\mathbf{v}^H(\theta_d) \mathbf{R}_y \mathbf{v}(\theta_d)}{\mathbf{v}^H(\theta_d) \mathbf{v}(\theta_d)} \\ &= \frac{N_1 \sigma^2 \mathbf{v}^H(\theta_d) \mathbf{v}(\theta_d)}{\mathbf{v}^H(\theta_d) \mathbf{v}(\theta_d)} = N_1 \sigma^2 = \min \end{aligned} \quad (12)$$

也就是说当 $\hat{\theta} = \theta_d$ 时,恰好将由目标引起的直达分量和多径分量全部抑制掉,仅仅剩下子阵级阵列热噪声。因此可以得到阵元噪声方差的估计:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\mathbf{v}^H(\hat{\theta}) \hat{R}_y \mathbf{v}(\hat{\theta})}{N_1 \cdot \mathbf{v}^H(\hat{\theta}) \mathbf{v}(\hat{\theta})} \quad (13)$$

估计出来仰角和噪声协方差后,进一步可以估计复反射系数,另 $\hat{\mathbf{B}} \triangleq \mathbf{B}(\hat{\theta})$, 根据式(7)可得:

$$\hat{\mathbf{B}} \rho \rho^H \hat{\mathbf{B}}^H \cdot \sigma_a^2 = \hat{R}_y - N_1 \hat{\sigma}^2 I_3 \quad (14)$$

上式两边左右同时乘以 $\hat{\mathbf{B}}$ 的伪逆 $(\hat{\mathbf{B}}^H \hat{\mathbf{B}})^{-1} \hat{\mathbf{B}}^H$ 得到:

$$\rho \rho^H \cdot \sigma_a^2 = (\hat{\mathbf{B}}^H \hat{\mathbf{B}})^{-1} \hat{\mathbf{B}}^H (\hat{R}_y - N_1 \hat{\sigma}^2 I_3) \hat{\mathbf{B}} (\hat{\mathbf{B}}^H \hat{\mathbf{B}})^{-1} \triangleq \mathbf{W} \quad (15)$$

所以,复反射系数的估计为:

$$\hat{\rho} = \frac{\mathbf{W}(2,1)}{\mathbf{W}(1,1)} \quad (16)$$

还可以得到直达信号的能量估计为: $\hat{\sigma}_a^2 = \mathbf{W}(1,1)$, 至此,问题中的所有未知参量均估计出

来了。

3 仿真与结果分析

考虑垂直均匀线阵,阵元数为 $N = 24$,阵列间距为半波长,下面分情况讨论 SNR、目标仰角、复反射系数幅度和相位对子阵级多径测高算法性能的影响情况。首先明确信噪比定义为直达信号的均方差与阵元噪声方差的比,即: $SNR = \frac{\sigma_a^2}{\sigma^2}$ 。

3.1 SNR 对仰角估计的影响

在该实验中,设定目标仰角 $\theta = 1.5^\circ$,复反射系数 $\rho = 0.9e^{j\frac{120^\circ}{180^\circ}\pi}$,图3给出了 SNR 不同条件下的仰角谱。

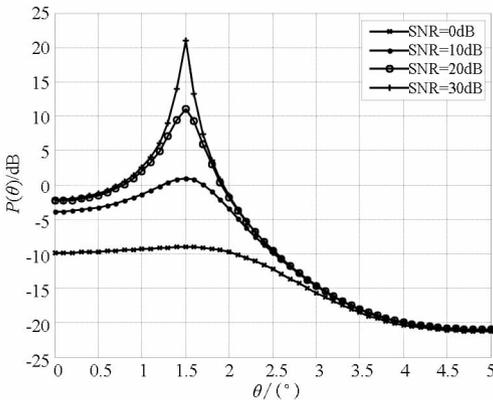


图3 仰角谱与 SNR 的关系

Fig. 3 The angle spectrum with respect to the SNR

可以看出:随着 SNR 的提高,仰角谱谱峰越来越“尖锐”。说明同等条件下测角性能随着 SNR 的增加而提高,这是估计问题的一般规律。

3.2 目标仰角对估计的影响

在该实验中,设定 $SNR = 15\text{dB}$,复反射系数 $\rho = 0.8e^{j\frac{120^\circ}{180^\circ}\pi}$,图4给出了目标仰角不同条件下的仰角谱。

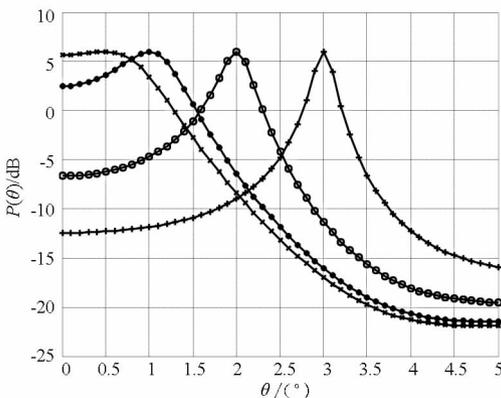


图4 仰角谱与目标仰角的关系

Fig. 4 The angle spectrum with respect to the elevation

可以看出:随着目标仰角逐渐减小,仰角谱谱

峰越来越“胖”,直至谱峰消失。说明同等条件下测角性能随着仰角减低而变差,并且对于低仰角目标的测量存在角度“临界”,当仰角小于该临界值时,估计算法失效,该现象由多径问题本质特点所决定,而非算法的问题。

3.3 复反射系数模对仰角估计的影响

在该实验中,设定目标仰角 $\theta = 1.5^\circ$, $SNR = 15\text{dB}$,复反射系数相位 $\phi_\rho = \frac{120^\circ}{180^\circ}\pi$,图5给出了复反射系数模不同条件下的仰角谱。

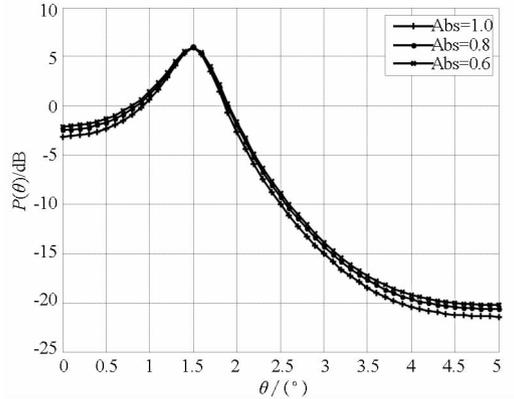


图5 仰角谱与复反射系数模的关系

Fig. 5 The angle spectrum with respect to the amplitude of ρ

可以看出:随着复反射系数模从1开始下降,仰角谱谱峰逐渐变“胖”,但是变化并不特别明显。说明同等条件下测角性能随着复反射系数模减小而稍微降低,但是影响并不明显。

3.4 复反射系数相位对仰角估计的影响

在该实验中,设定目标仰角 $\theta = 1.5^\circ$, $SNR = 15\text{dB}$,复反射系数模 $|\rho| = 1.0$,图6给出了复反射系数相位不同条件下的仰角谱。

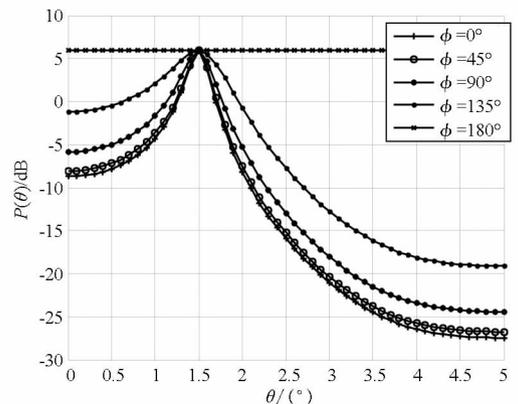


图6 仰角谱与复反射系数相位的关系

Fig. 6 The angle spectrum with respect to the phase of ρ

可以看出:随着复反射系数相位角从 0° 逐渐增大,仰角谱谱峰越来越“胖”,直至当相位为 180° 时谱峰消失。说明同等条件下测角性能随着

复反射系数相位增大而变差,并且当复反射系数相位为 180°时估计失效,这是多径问题本质所决定的。

4 实测数据处理与结果分析

应用该方法对某米波雷达实际测量数据进行处理分析,对民航目标进行观测,经过脉压处理、快拍提取、通道误差补偿等预处理后,利用本文所提出的方法得到目标的仰角谱。图 7 展示了利用数据得到的仰角谱,根据谱峰的位置可以估计出目标的仰角,进一步得到目标的高度。

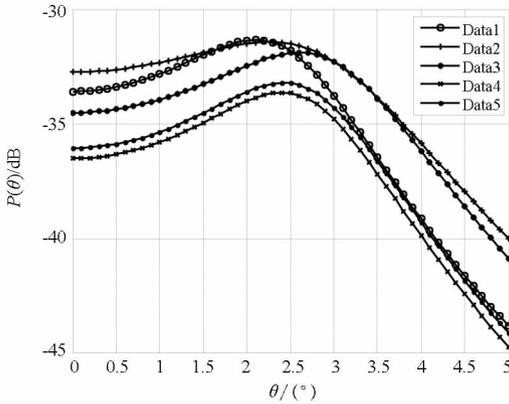


图 7 某实测数据仰角谱

Fig. 7 The angle spectrum of field data

对应于 5 批数据,目标仰角真值和估计值如表 1 所示:

表 1 目标仰角真值与估计值

Tab. 1 The trueness and estimation of elevation

Data	1	2	3	4	5
真值	2.42°	2.46°	2.51°	2.56°	2.62°
估计值	2.11°	2.25°	2.60°	2.40°	2.42°

可以看出:在低仰角条件下,仰角估计的平均误差为 -0.158°,该阵列天线的波束宽度为 13.32°,因此仰角测量误差占波束宽度的 1.19%,相当于 1/84 波束宽度。

对应于 5 批数据,估计出的地面复反射系数如表 2 所示:

表 2 米波波段复反射系数幅度与相位

Tab. 2 The estimated complex reflection coefficient at metric band

Data	1	2	3	4	5
幅度	0.92	0.74	0.74	0.81	0.90
相位	17.36°	19.05°	15.06°	21.70°	11.61°

可以看出:在低仰角条件下,利用该算法可以估计出地面复反射系数,经过平均得到的米波波束陆地复反射系数幅度为 0.82,相位为 16.96°。

该算法提供了一条地面复反射系数的测量方法。

5 结束语

本文提出的波束域低角测高算法具有以下三个优点:第一,该算法与复反射系数无关,避免了复反射系数的搜索与估计;第二,阵列信号处理维数简单,不用复杂的矩阵运算;第三,估计出目标仰角后,接着可以估计出复反射系数。以上优点预示着该算法具有广泛的应用前景,即可以应用在米波陆地环境与 X 波段海环境下目标仰角的测量。但是该方法的性能与目标的仰角、复反射系数相位有强烈的依赖关系,这是由多径问题本身所决定的,需要通过频率分集、极化分集等手段来解决,这正是下一步要研究的内容。

参考文献 (References)

- [1] Eloi B, Ross M T, Michel L. Tracking swerling fluctuating targets at low altitude over the sea [J]. IEEE Trans. AES, 1991, 27(5): 806-822
- [2] Eloi B, Ross M T, Brookes D. Improved radar tracking using a multipath model: maximum likelihood compared with eigenvector analysis [J]. IEE Proc. RSN, 1994, 141(4): 213-222.
- [3] Eloi B, Ross M T, Denis D. Low-angle tracking in the presence of ducting, coherent and incoherent multipath [R]. Defence Research Establishment Ottawa, ADA289838, 1994.
- [4] Eloi B, Boss M T. Model-based multi-frequency array signal processing for low-angle tracking [J]. IEEE Trans. AES, 1995, 31(1): 194-210.
- [5] Lo T, Litva J. Use of a highly deterministic multipath signal model in low-angle tracking [J]. IEE Proc. RSN, 1991, 138(2): 163-171.
- [6] Lo T, Litva J. Low angle tracking using a multi-frequency sampled aperture radar [J]. IEEE Trans. AES, 1991, 27(9): 797-805.
- [7] Lo T, Henry L, Litva J. Low-angle radar tracking in a naval environment using a forward-backward nonlinear prediction method [J]. IEEE Trans. OE, 1994, 19(3): 468-475.
- [8] 焦培南,张忠治. 雷达环境与电波传播特性 [M]. 北京:电子工业出版社,2007,7: 77-88 (in Chinese)
JIAO Peinan, ZHANG Zhongzhi. Radar environment and EM wave transmitting property [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007,7: 77-88. (in Chinese)
- [9] Skolnik M I. 雷达手册(第二版) [M]. 北京:电子工业出版社,2003: 786-817.
Skolnik M I, Radar handbook (Second Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 786-817 (in chinese)
- [10] 王永良,丁前军,李荣锋. 自适应阵列处理 [M]. 北京:清华大学出版社,2009: 86-103.
WANG Yongliang, DING Qianjun, LI Rongfeng. Adaptive array signal processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 86-103. (in Chinese)