

# 基于 DEM 的机载气象雷达地杂波剔除方法

秦 娟<sup>1,2</sup> 吴仁彪<sup>3</sup> 苏志刚<sup>3</sup> 卢晓光<sup>1,3</sup>

(1. 天津大学电子信息工程学院, 天津, 300072; 2. 天津理工大学电子信息工程学院, 天津, 300384;  
3. 中国民航大学智能信号与图像处理天津市重点实验室, 天津, 300300)

**摘 要:** 针对机载气象雷达气象模式地杂波抑制问题, 提出利用回波幅度信息的基于数字高程模型 (DEM, Digital Elevation Model) 的时域地杂波剔除方法。首先利用回波幅度信息对存在雷达回波信号的数据区域进行分割, 然后对区域的边界距离单元利用基于 DEM 的可视性算法分析其触地情况。根据分析结果可知, 存在回波信号的区域可分成仅含气象的区域、仅含杂波的区域以及二者相连的区域, 其中相连区域还需进行逐距离单元判断确定分界距离单元。将杂波存在的距离单元予以剔除, 即可去除地杂波。经实测数据验证, 该方法能够根据雷达参数和 DEM 数据准确地判断杂波所在的距离单元, 有效地剔除地杂波。提出的方法仅处理存在回波信号的区域, 且不需要对所有的距离单元进行分析, 可以大大减小运算量。

**关键词:** 机载气象雷达; 地杂波抑制; DEM; 可视性; 回波幅度

**中图分类号:** TN959.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)10-1484-05

## Ground Clutter Censoring Algorithm for Airborne Weather Radar Employing DEM

QIN Juan<sup>1,2</sup> WU Ren-biao<sup>3</sup> SU Zhi-gang<sup>3</sup> LU Xiao-guang<sup>1,3</sup>

(1. School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Electronic Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

3. Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** A ground clutter rejection method based on echo amplitude and Digital Elevation Model (DEM) is proposed, which can be used to censor the clutter when airborne weather radar operates in weather mode. For ground clutter suppression of airborne weather radar in weather mode, it proposes ground clutter rejection method base on echo amplitude and Digital Elevation Model. The amplitude information is used to segment the radar initial echo. And then the visibility analysis method based on DEM is used to judge the segmentation edge does touch ground or not. According to the analysis results, these segmentation datum may be only weather, only ground clutter and both of them joined which need to be divided into sub segmentation to identify the boundary of them. The ranges with clutter are edited and rejected, so the suppression is implemented directly in time domain. In virtue of the proposed algorithm, the ranges where the clutter exists can be computed accurately using radar parameters and DEM. The validity of the method is verified by using the measured data. The proposed method only deals with the echo signal above minimum detectable signal. It can greatly reduce the computation.

**Key words:** airborne weather radar; ground clutter suppression; DEM; visibility; echo amplitude

## 1 引言

机载气象雷达具有气象目标探测、气象预警等功能, 它的应用极大地提高了气象预报的实时性和准确性, 已成为民航飞机必不可少的重要电子设备, 可以说它是民航飞机的“双眼”。但是由于其安置于飞机上, 工作时一般处于下视模式, 因此面临着比地基气象雷达更严重的地(海)面杂波, 杂波分布范围广、强度大, 给区分降水类型和分析气象条件等带来很大困难, 严重危害飞机的飞行安全。研究地杂波抑制技术, 对于改善机载气象

雷系统性能, 降低地杂波干扰和提高机载气象雷达系统检测目标的能力都具有十分重要的意义。

当飞机处于巡航阶段时, 机载气象雷达通常工作于气象模式<sup>[1][2]</sup>, 为了探测较远的距离, 通常设置较低的脉冲重复频率和较宽的脉冲, 距离单元较大。由于地杂波和气象目标都是分布式的, 而且载机的运动引起主瓣杂波的频移和杂波多普勒展宽造成它们的频谱混叠在一起<sup>[3]-[5]</sup>。因此, 无法从频域将其分离, 使得常规的频域杂波滤波方法失效。但此时地杂波和气象目标回波位于空间上的不同距离位置的<sup>[6]-[10]</sup>, 一般通过

控制天线俯角以减少地面的回波信号<sup>[6][7]</sup>,或者通过计算得到地杂波所处的距离单元并剔除,从而在时域抑制地杂波<sup>[8]-[10]</sup>。剔除地杂波的关键就是地杂波所在距离单元的计算,可通过逐距离单元分析确定。由于观察范围较广,距离单元数量巨大,运算量很大。实际上,并不是所有距离单元存在回波。而且由于地面和气象通常是连续分布的,回波中气象和地杂波区域都是连通的,计算时确定其边界即可。通过分析气象和杂波位置的典型情况,可以对气象目标和杂波进行数据划分<sup>[11]-[14]</sup>,找出他们可能存在的区域<sup>[11][12]</sup>,再利用数字高程模型 (DEM, Digital Elevation Model) 分析判别地杂波的位置。基于以上分析,提出了利用幅度信息和 DEM 联合的地杂波距离单元计算方法,在时域直接剔除回波中存在的地杂波。

论文安排如下。第二部分分析了气象和地杂波位置情况,回波幅度信息表示了气象或地杂波的存在。第三部分给出了根据 DEM 的地杂波剔除方法的具体实施过程,并分析了存在的问题。其后,研究了利用幅度信息的基于 DEM 的机载气象雷达地杂波剔除流程。最后给出了机载气象雷达的实测数据的地杂波剔除结果,分析了所提方法的性能。

## 2 气象目标和地杂波位置情况分析

当前视机载气象雷达扫描时,气象和地杂波的位置如图 1 所示,列出了它们的典型位置情况。主要包括:无气象仅有地杂波(图 1 (a))、气象和地杂波位于不同距离单元(图 1 (b), (c), (d) 和 (e)),仅有气象无地杂波(图 1 (f))。气象和地杂波在雷达回波数据中的表现是,回波幅度会明显高于最小可检测电平,图 1 各种情况相应的回波幅度示意如图 2。在距离上,气象目标和地杂波的回波幅度有两种情况:一种是气象和地杂波距离上完全分开(图 2 (a), (b), (d) 和 (f)),另一种是气象和地杂波部分粘连(图 2 (c) 和 (e)),部分粘连需进行细化分析。

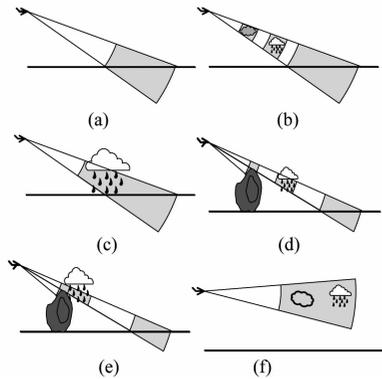


图 1 气象目标和地杂波位置关系

Fig. 1 Position relation between weather target and clutter

在雷达回波数据处理时,最小可检测电平以下的数据表达了噪声以及淹没在噪声中的信号,雷达检测不到这些数据,只对那些高于最小可检测门限的信号进行数据处理。因此,我们可以让回波数据通过门限

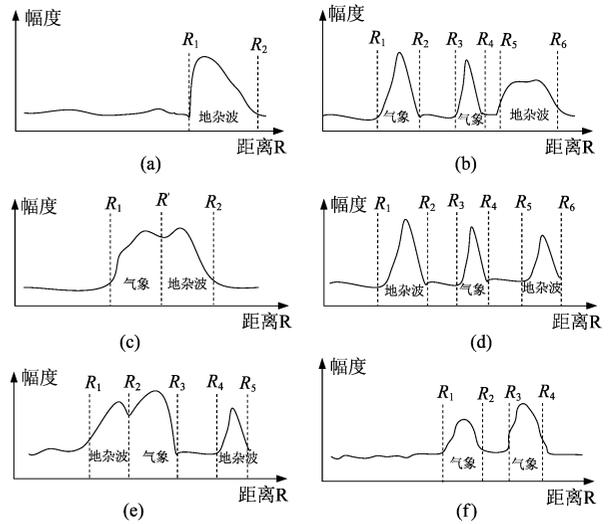


图 2 气象目标和地杂波回波幅度

Fig. 2 Echo amplitudes of weather and clutter

选择,高于门限的数据进行数据处理,而那些低于门限的数据是可以不用处理的。可将回波数据按照最小可检测电平划分数据,有针对性的分析判断。

## 3 基于 DEM 的地杂波剔除方法

DEM 是地面地理位置及其高程的数据集,可以准确反映地形特征<sup>[15]</sup>。利用 DEM 分析计算波束是否触地并计算触地位置到载机的距离,就是已知机载雷达位置分析某地形的可见区域问题。常采用基于 LOS (Line of Sight) 的方法分析地形中点和点之间的可视性,就是连接地形上任何两点之间的视线剖面上的点和对应地形上的点的关系<sup>[16][17]</sup>。

根据可视性的判断方法计算某个俯仰的波束视线上是否存在障碍物时,需要比较波束路径上各点的高度与该点的地形高度<sup>[16][18]</sup>,因此需要计算波束视线上点集合的经纬度和高度。根据计算得到的经纬度,从 DEM 中提取对应位置的地形高度,结合雷达的几何关系根据可视域的分析判断地杂波存在的距离单元,即计算杂波带。杂波带获得后,地杂波的剔除就简单了。

### 3.1 波束传播路径上散射点的经纬度计算

为了确定波束路径上散射点的大地位置坐标,建立如图 3 所示的本地直角坐标系。飞机到地面的投影点为坐标原点,东向为 X 轴,北向为 Y 轴。 $M'$  是飞机 M 到地面的投影, $M'M$  方向为 Z 轴。波束在地面的投影  $M'P$ ,飞机航向角  $\zeta$ 、天线方位角  $\theta$  投影到地面,可得到波束和东向的夹角  $\gamma$ 。选用球体的地球模型计算 MP 上点的经纬度时,不能直接利用三角形关系。将 MP 分成若干小段计算,可忽略地球曲面的影响认为地面是水平的,在三角形中逐点计算经纬度。不管采用不规则三角形网格还是规则正方形网格的 DEM<sup>[15]</sup>,在原地形网格中分析可视性,数据点太稀会降低可视距离精度;数据点过密,又会增大数据量、处理的工作量和不

必要的存储量。

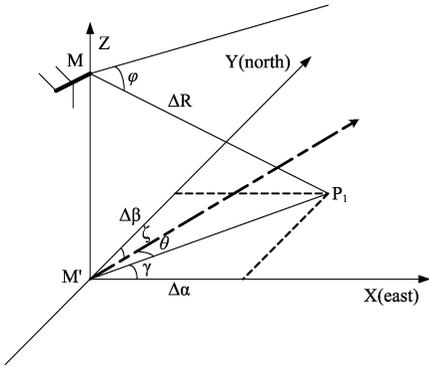


图3 本地直角坐标  
Fig.3 Location Cartesian coordinate

按照机载气象雷达的应用要求,选取距离分辨率为斜距的取样间隔,计算MP上各点的经纬度。假设地面平坦海拔为零时估计波束触地位置到飞机的距离R,然后以雷达的距离分辨率ΔR为间隔取点并计算地理位置坐标,从M点经过ΔR到达P<sub>1</sub>点,经度变化量为Δα,纬度变化量为Δβ。另外,为了简化对流层对电磁波的弯曲效应,采用等效半径R<sub>e</sub>。根据图3的几何关系可得,计算经度变化量Δα和纬度变化量Δβ的公式为:

$$\begin{cases} \Delta\alpha = \frac{\Delta R \times \cos\varphi \times \cos\gamma}{2\pi \times R_e \times \cos\beta} \times \frac{180}{\pi} \\ \Delta\beta = \frac{\Delta R \times \cos\varphi \times \sin\gamma}{2\pi \times R_e} \times \frac{180}{\pi} \end{cases} \quad (1)$$

到达P<sub>1</sub>点,经过下一个ΔR,到P<sub>2</sub>,同样计算Δα<sub>2</sub>,Δβ<sub>2</sub>。但是由于地球是球体,波束向下传输过程中视线和水平线的夹角随着距离的增加而减小,P<sub>1</sub>点的角φ<sub>1</sub>和M点的俯角φ不同,如图4所示。根据式(2)计算P<sub>1</sub>点的角φ<sub>1</sub>,再计算Δα<sub>2</sub>,Δβ<sub>2</sub>。

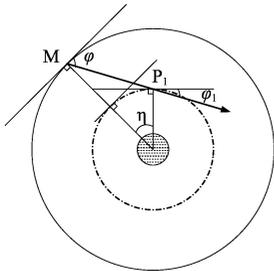


图4 波束指向和水平夹角随高度降低的变化  
Fig.4 Angle φ between the beam and horizon at different range

$$\begin{cases} \cos\eta = \cos(\Delta\alpha) \times \cos(\Delta\beta) \\ \varphi_1 = \varphi - \eta \end{cases} \quad (2)$$

依此类推,更新每一点的φ<sub>k</sub>,计算P<sub>k</sub>和P<sub>k-1</sub>之间的经纬度变化量(Δα<sub>k</sub>,Δβ<sub>k</sub>),然后根据飞机位置和(Δα<sub>k</sub>,Δβ<sub>k</sub>)计算各点的经纬度。

### 3.2 杂波带计算

计算得到的各点地理位置坐标(α,β),就可以从

GE(Google Earth)提取各点DEM高度数据,GE数据是卫星影像与航拍的数据整合,其全球地貌影像的有效分辨率至少为100米,高程精度完全可满足应用要求。提取DEM数据后,即可根据图5视线和地形剖面相交分析某个波束的通视距离。图5中第k个点P<sub>k</sub>斜距是R<sub>k</sub>,其实际的地形高度记为h'<sub>k</sub>(图中实线)。同时,在△OMP<sub>k</sub>中计算视线上点的高度h<sub>k</sub>(图中粗虚线):

$$h_k = ((R_e + h_a)^2 + R_k^2 - 2(R_e + h_a)R_k \cos(\frac{\pi}{2} - \varphi))^{1/2} - R_e \quad (3)$$

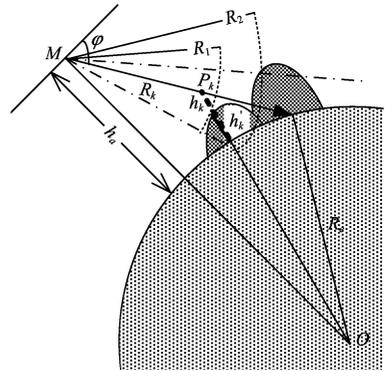


图5 波束某一俯角的剖面图  
Fig.5 Profile of beam at a tilt

在视线的剖面地形上,根据视线高度判断可视性。如果视线上的地形高度大于波束经过该点的高度,那么该点可视。即比较视线上的高度h<sub>k</sub>和实际DEM数据h'<sub>k</sub>,可以判断波束是否触地:

当h<sub>k</sub>>h'<sub>k</sub>时,点P<sub>k</sub>可视即波束没有触地,继续计算下一点的高度h<sub>k+1</sub>;

当h<sub>k</sub>≤h'<sub>k</sub>时,等号成立时,点P<sub>k</sub>可视,波束刚刚触地;否则点P<sub>k</sub>不可视,这两种情况下该距离的回波信号都是地杂波,将此距离单元置零,并停止该视线方向的计算。

在前面计算中,为了简化分析假设波束为一条线,但实际雷达天线波束是立体波束,天线主瓣具有一定的宽度。如图5中的点划线示意了波束垂直面上的两个边界,视线是在

$$\left[ \varphi - \frac{\varphi_{3dB}}{2}, \varphi + \frac{\varphi_{3dB}}{2} \right]$$

范围内。精确计算时,需考虑这个视线范围内所有波束的触地情况,即计算每个视线对应存在地杂波的距离单元,这样将会大大增加计算量。为了减少计算量,对视线进行采样细分时增大细分间隔,而且飞机巡航时重点关注航路上的而不是近地面的气象,所以考虑波束触地情况时,计算波束两边界对应的触地距离单元R<sub>1</sub>和R<sub>2</sub>(图5中虚线对应的距离),那么它们之间的距离单元都是波束触地的距离范围,即杂波带。同理,对其他方位的计算杂波带,即可计算得到一次完整扫描的杂波带情况。

判断出回波中杂波带出现的位置后,地杂波抑制就变得容易了。在雷达屏幕显示时将杂波带对应距离范围内的回波剪辑掉,以背景替代,屏幕上显示的即为

地杂波抑制后的画面。实际的回波数据中,并不是所有距离单元存在回波。根据前述方法,需要逐距离单元分析计算,运算量大。利用回波的幅度信息的基于 DEM 的地杂波时域剔除方法,可以降低运算量。

### 4 利用幅度信息的基于 DEM 的地杂波剔除方法

第二部分分析了气象和地杂波的回波幅度沿距离的表现形式,可以利用回波幅度信息将回波数据分成若干数据区域。图 2 中的回波信号根据最小可检测电平门限判断,对幅度高于门限的回波标记其距离位置  $R_1, R_2, R_3, \dots$ , 就将回波数据利用幅度信息划分了数据区域,是连续的高于最小可检测电平的几段数据。之后,对于每一个数据区域,利用 DEM 分析判别其是气象还是地杂波。图 6 是基于幅度信息和 DEM 联合的地杂波剔除方法的处理流程。首先对雷达每一个扫描方位的数据进行门限判决,就是将回波数据分段,并标记每一数据的起始和结束位置。其次利用 DEM 判断每段数据,若其起始和结束位置都不触地,判为气象;若都触地,判为杂波;若只能判断起始或者结束触地,是气象和杂波粘连的数据区域,需要进一步细化确定气象和杂波的分界。确定杂波的位置,计算下一个扫描方位的回波数据。最后,确定一次完整扫描的杂波带情况。

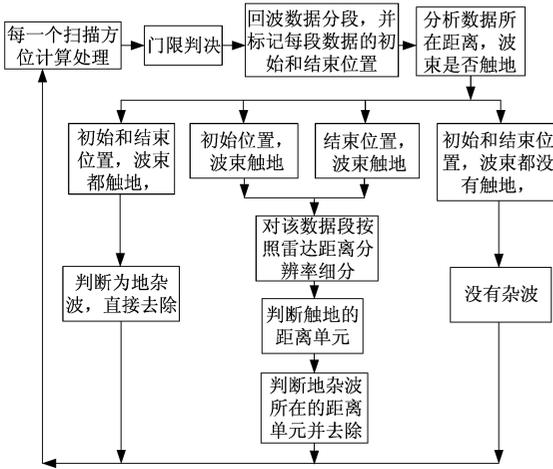


图 6 数据处理流程  
Fig. 6 Data processing flow

### 5 实测数据处理结果与分析

为了验证提出方法的有效性并分析其性能,对某型号机载气象雷达实测的数据进行了实验。如图 7 所示,为某次完整扫描采集的雷达回波信号。因为是晴空时进行的数据采集,实测数据中只有地杂波。从机载的电子设备可以得到采集时的飞机参数和雷达参数,图 7 所示的数据是在飞机高度 3083 m 采集的,扫描开始时飞机位于(E 109.7289, N 34.7162),航向北偏东 70°,雷达波束俯角向下 7.5°,扫描的方位为  $[-65^\circ, 50^\circ]$ 。从图 7 中可以清楚的看出地杂波带的存在,位于大约 18-25 km 的距离范围。对图 7 的实测数据通过最小可检测电平门限,门限以下的数据用背景显示。

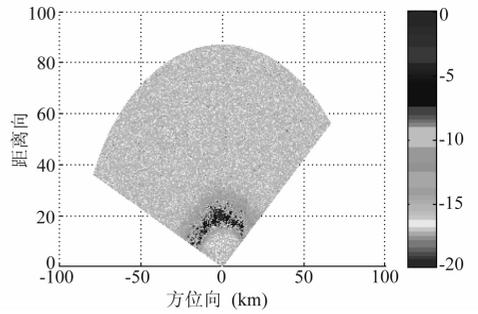


图 7 俯角 7.5° 的实测回波信号幅度  
Fig. 7 Amplitude of Radar Measured Echo at  $\varphi=7.5^\circ$

仅根据 DEM 剔除地杂波的数据处理结果如图 8 所示,幅度信息和 DEM 联合的地杂波剔除结果如图 9 所示。两者都准确判断杂波的位置,将杂波用背景代替后的雷达信号显示。可以看出,绝大部分的地杂波单元已经被剔除,仅有少量剩余,表明提出的方法能够准确地判断杂波带的存在范围并在时域剔除。

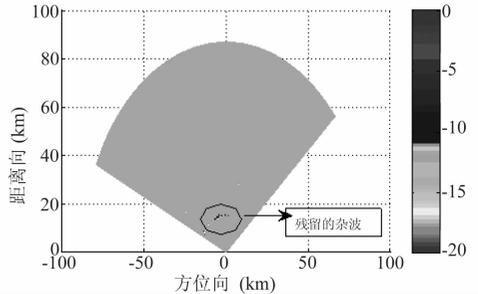


图 8 仅利用 DEM 剔除的结果  
Fig. 8 Censoring only by DEM

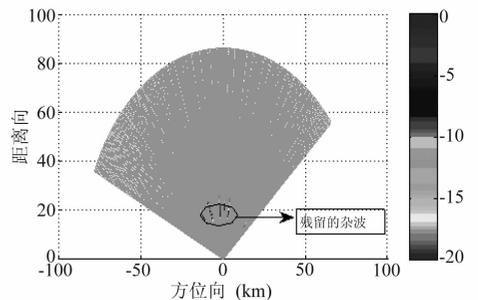


图 9 回波幅度和 DEM 联合处理后的结果  
Fig. 9 Combined processing of echo amplitude and DEM

图 8 残余杂波位于较近距离处,这是因为我们只考虑了 3dB 主瓣宽度。实际上主瓣并不是在半功率处陡然下降,而是缓慢下降,仍然能接收到近距离上的地杂波。图 9 这种利用回波幅度信息将数据分段处理的方式,针对性强,目的明确,数据处理量大大减小。尤其在晴空平原地区远距离时,波束触地前的每个途经点返回的信号幅度较弱,在最小可检测电平以下,这些数据不需要逐一分析判断,减少需要处理的数据量,进而提高运算速度。

### 6 结论

在气象模式时,机载气象雷达的回波中地杂波和气象目标在距离是可分离的,即分别位于不同的距离

单元。本文根据这一特性,利用可视域的分析方法,提出了基于 DEM 数据的时域地杂波抑制方法。建立了计算所需的地理位置关系模型,并从 Google Earth 提取地形高度,根据可视性判断算法的高度比较确定波束触地位置,即确定地杂波所在距离单元,最后在时域将杂波剔除。经过分析表明该方案可行,实测数据处理的结果也表明该方法可有效剔除地杂波。实际上,并不是所有距离单元存在雷达回波,回波数据沿距离单元逐点处理时,存在计算量大,计算速度慢的问题。本文又提出了利用了回波的幅度信息将回波分段处理,针对分段的数据区域进行 DEM 分析判断,大大降低了计算量,并提高运算速度。

### 参考文献

- [1] Rockwell Collins Inc. Collins WXR-2100 MultiScan™ Radar Fully Automatic Weather Radar[R]. Cedar Rapids, Iowa; Copyright 2007 Rockwell Collins Inc, 2007. (12-28).
- [2] Honeywell Aerospace. RDR-4000 3-D Weather Radar Overview[EB/OL]. <http://www.Honeywell.com>,2008.8.
- [3] Bassem R. Mahafza. Radar Signal Analysis and Processing Using Matlab[M]. Boca Raton: CRC Press Inc, 2009.373-376
- [4] Yoshikawa Eiichi, Mega Tomoaki, Morimoto Takeshi, Ushio, Tomoo. Real-time Spectral Moments Estimation and Ground Clutter Suppression for Precipitation Radar with High Resolution[J], IEICE Transactions on Communications, 2009, vE92-B (2):578-584.
- [5] 王飞行,陈建军,付强. 高重频频率步进雷达抑制折叠杂波方法[J]. 信号处理,2010, 26(3): 387-393.  
Wang F X, Chen J J, Fu Q, A Method of Suppressing Folded Clutter in High PRF Stepped Frequency Radar [J], Signal Processing, 2010, 26(3): 387-393. (in Chinese)
- [6] Steven R. Sweet. Automatic Weather Radar System and Method[P]. U. S. A. : 7205928, 2007.4.
- [7] Daniel L. Woodell, Gregory J. Koenigs, Charles J. Dickerson. Antenna Adjustment System and Method for an Aircraft Weather Radar System[P]. U. S. A. : 7307583, 2007.12.
- [8] Kevin M. Krofled, Mathew S. Chackalackal. Method of Generating Three-dimensional Weather Information from Airborne Weather Radar Imagery[P]. U. S. A.:7427943, 2008.9.
- [9] Roland Y. Szeto, Bill G. Cornell. Terrain Database Based Ground Return Suppression [P]. U. S. A. : 6690371, 2004.
- [10] Daniel L. Woodell, Robins, Method and System for Suppressing Ground Clutter Returns on an Airborne Weather Radar[P]. U. S. A. : 6603425, 2003.8.
- [11] 窦泽华,张仕元,李明. 基于雷达回波识别的杂波抑制[J]. 信号处理, 2009, 25(8):1193-1197.  
Dou Z H, Zhang S Y, Li M. Clutter Suppression Based on Radar Return Classification[J]. Signal processing, 2009, 25(8):1193-1197. (in Chinese)
- [12] 李沛秦,谢剑斌,陈章永,程永茂,刘通. 一种面向目标区域的快速去模糊算法[J]. 信号处理. 2010, 26(8): 1240-1245.  
Li P Q, Xie J B, Chen Z Y, Cheng Y M, Liu T. A Fast Deblurring Algorithm For Object Region[J]. Signal processing. 2010, 26(8):1240-1245. (in Chinese)
- [13] T. Kadir, M. Brady. Unsupervised Non-parametric Region Segmentation Using Level Sets [C] // Proceedings IEEE Institute Conference of Computer Visual. France: Nice, 2003. 1267-1274.
- [14] Li S T, Yang B. Multifocus Image Fusion Using Region Segmentation and Spatial Frequency[J]. Image and Vision Computing, 2008, 26(7): 971-979.
- [15] Li Z., Zhu Q. and Gold C. Digital terrain modeling: principles and methodology [M]. Boca Raton U. S. : CRC Press. 2005.247-266.
- [16] Lee J. Analyses of Visibility Sites on Topographic Surfaces [J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1991, 5(5): 413-429.
- [17] Zhang J F, Li L, Wang Y X. Analysis of Terrain Visibility[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(8): 1916-1921.
- [18] De Florian L, Marzano P, Puppo E. Line-of-sight Communication on Terrain Models[J]. International Journal of Geographic Information Systems, 1994, 4(8):329-342.

### 作者简介



秦娟(1979-),女,河北秦皇岛人,天津理工大学电子信息工程学院讲师,现为天津大学博士研究生。主要从事雷达信号处理领域的研究。  
E-mail: hai\_jane@163.com



吴仁彪(1966-),男,湖北黄陂人,博士生导师,教授,主要从事自适应信号处理、阵列信号处理、雷达信号处理的研究,IEEE高级会员,中国电子学会理事,国家杰出青年基金获得者,国家人事部百千万人才工程第一、二层次人选。  
E-mail: rbwu@cauc.edu.cn



苏志刚(1972-),男,硕士生导师,教授,主要从事雷达信号处理、阵列信号处理领域研究。  
E-mail: suzg02@mails.tsinghua.edu.cn



卢晓光(1983-),男,山西忻州人,博士研究生,主要从事合成孔径雷达图像处理、雷达信号处理领域研究。  
E-mail: xglu@cauc.edu.cn