

文章编号: 1672-2892(2010)03-0290-07

强背景杂波下月球次表面回波的识别方法

李 群, 法文哲

(复旦大学 通信科学与工程系, 上海 200433)

摘 要:为有效探测月球次表层结构,本文基于月球次表面天底点回波和表面非天底点回波(杂波)的相干与非相干特性,提出在月球次表面地形变化不大的情况下,由累积取平均的方法来减小表面非天底点回波从而识别次表面回波的方法。以数值模拟的月海与月陆表面雷达探测仪回波为例,验证了该方法的正确性与可行性,并讨论了累积平均数目对次表面回波提取结果的影响。本文所述方法也可以应用到火星等其他外星球次表层结构的探测中。

关键词: 雷达探测仪; 月表层结构; 回波模拟; 相干回波; 非相干回波; 累积平均

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

Identification of lunar subsurface echoes from radar sounder echoes with strong background surface off-nadir clutters

LI Qun, FA Wen-zhe

(Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: An effective approach for subsurface echo extraction was developed on the basis of the coherent and incoherent characteristics of the subsurface nadir echoes and surface off-nadir echoes (clutter). By stacking and averaging the received radar sounder echoes at different time series, subsurface echo could be identified if the subsurface topography variation was not too large. Taking the simulated radar sounder echoes from lunar maria and highlands area as example, this study verified the feasibility of this approach numerically. Finally, the influence on subsurface echo identification by the stacking number and surface roughness was discussed. The approach in this paper can be applied to Martian and other planetary exploration.

Key words: radar sounder; lunar layering structure; echo simulation; coherent echo; incoherent echo; stacking and averaging

月球分层构造记录着月球形成与演化的历史信息。对月球分层结构的探测,可以为了解月球物理状态与构造组成、研究月球起源与演化历史等提供科学的依据。在月球、火星等外星球探测中,高频雷达探测仪是一种用于探测星球表面以下数 km 深层地质构造的有效工具。1972 年美国 Apollo 17 探月飞行器搭载了雷达探测仪,第一次对月球表面进行雷达探测实验(Apollo Lunar Sounder Experiment, ALSE)^[1-2]。2007 年 9 月日本的探月卫星月亮女神(SELENE-1)搭载一个中心频率为 5 MHz 的月球雷达探测仪(Lunar Radar Sounder, LRS),用以探测整个月球的次表层结构^[3]。在中国未来的探月计划中,也有可能采用雷达探测仪技术,对月球次表层结构进行探测。

雷达探测仪主要通过月球表面和次表面天底点回波的时延差与强度来给出月球次表层的结构与物质状态。在以往对雷达探测仪的研究中,大多数局限于分析雷达探测仪对次表层结构的探测原理以及回波的模拟。Kobayashi 等由粗糙面电磁散射的 Kirchhoff 近似模拟了月海和月陆地区表面与次表面的回波^[4-5]。笔者曾由 Kirchhoff 近似、射线追踪和几何光学理论,提出快速高效地模拟雷达探测仪回波的方法^[6]。对于次表面回波,只计算发生镜向散射的次表面面元对散射的贡献,由射线追踪、几何光学和 Kirchhoff 近似来计算,从而极大地减少了次表面回波的计算量,突出了散射机制。本文在前述工作的基础上,基于次表面天底点回波的相干性和表面非天底点回波(杂波)的非相干特性,提出在月球次表面地形变化不大的情况下,由累积取平均的方法来抑制表面杂波从而识别次表面回波的方法。

收稿日期: 2009-10-09; 修回日期: 2009-11-08

基金项目: 复旦大学研究生创新基金资助项目

1 探测原理与存在问题

1.1 雷达探测仪的探测原理

图 1 给出了雷达探测仪对月球次表层结构探测的示意图。月球表层由两层结构模型描述，层 1 为层厚度为 D 的均匀月表物质，介电常数为 ϵ_1 ；层 2 为下垫月岩层，介电常数为 ϵ_2 ，层 1 与层 2 的交界面为月球次表面。

高度为 H 的雷达探测仪以一定的波束宽度 θ 向月球表面发射电磁波。电磁波在表面天底点 A 处发生反射和透射，反射回波时延 $2H/c$ (c 为真空中的光速)。A 处透射的电磁波通过表层 1 至次表面天底点 B 处发生反射，再经过表层 1 向上

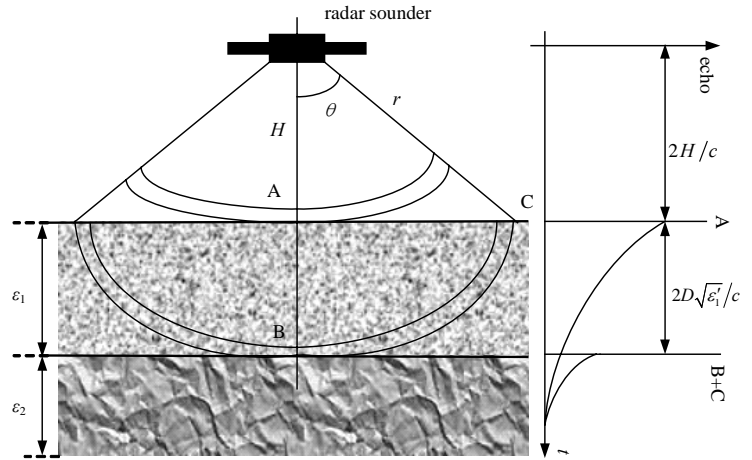


Fig.1 Principle for radar sounder detection of lunar subsurface structure
图 1 月球次表层结构探测的示意图

传播被雷达探测仪接收，该回波比 A 处的回波时延晚 $2D\sqrt{\epsilon_1}/c$ (ϵ_1' 表示介电常数 ϵ_1 的实部)。如果表层 1 介电常数 ϵ_1 已知，则由月球表面和次表面天底点回波的时延差可以确定次表面的深度 D ，而由这两点回波的强度差异可以估算次表层介电常数 ϵ_2 ，从而来判断次表层(层 2)的物质成分。

如果月球表面和次表面都是光滑平表面，则雷达探测仪只接收到 A 处和 B 处的回波。实际上月球表面的地形是高低起伏的，这样雷达探测仪也会接收到月表面非天底点 C 处的回波。电磁波在月表层内部传播时，受到表面透射、表层衰减以及次表面反射(散射)等的影响，次表面天底点 B 处的回波往往很微弱。如果月球表面非天底点 C 处的回波时延和次表面天底点 B 处的回波时延相等，则雷达探测仪将同时接收到这两点的回波。这样 B 处微弱的回波有可能被表面 C 处回波所淹没，从而无法直接由雷达探测仪的观测结果识别出次表面回波。

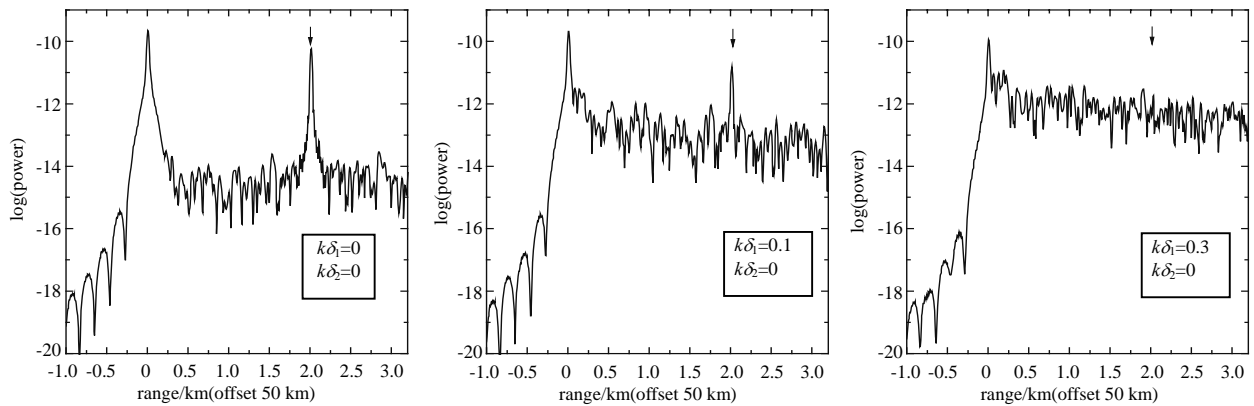
定义 A 点的回波为表面天底点回波，B 点的回波为次表面天底点回波，C 点的回波为表面非天底点回波。表面非天底点回波对于探测次表层结构不但没有任何帮助，反而是识别次表面回波的最大障碍，因此非天底点回波也称为表面杂波。

1.2 表面杂波的影响

一般地，整个月球表面总体上可以分为相对平缓的月海和多坑洞的月陆。月海是月球表面宽广的平原，约占月表面积的 17%，月陆是指月球表面高出月海的地区，一般高出月球水准面约 2 km~3 km，约占月表面积的 83%^[7]。一般情况下，与月陆相比，月海表面相对比较光滑，除零星分布的环形山之外，月海表面没有任何明显的地形特征^[7]。由于受到陨石小天体的撞击，月陆表面分布着大量的大小不同的环形山。

本文主要讨论强表面杂波背景下月海和月陆次表面回波的提取问题。在现有缺少月球表面高分辨率数字高程模型的情况下，可以按已有的月表地形的统计特征用数值方法来模拟月球表面地形。对于相对比较平滑的月海表面，用三维高斯随机粗糙面来模拟构造月海表面地形^[6]。对于多坑洞的月陆表面，按照环形山直径分布与形状特征的统计规律用 Monte Carlo 方法数值模拟表面地形^[8]。数值构造月表地形的优点是可以控制月表地形的参数，譬如月海表面粗糙度、月陆表面环形山的数目、直径分布、形状等，以实现月球表面的参数化建模，从而可以定量讨论这些参数对次表面回波提取结果的影响。本文模拟中，雷达探测仪位于表面中心之上，轨道高度 $H=50$ km，中心频率 $f=5$ MHz，带宽 $B_w=8$ MHz。雷达探测仪采用偶极子天线，天线长度 $L=30$ m，发射功率 800 W，天线阻抗 50 Ω ，这样偶极子天线上的电流强度 $I=4$ A。

月海表面为高斯随机粗糙面，相关长度 60 m，表面与次表面的粗糙度由参数 $k\delta_1$ 和 $k\delta_2$ 描述，其中 δ_1 和 δ_2 分别为表面和次表面的高度起伏方差， k 为真空中的波数。取层 1 厚度 $D=1.0$ km，层 1 介电常数 $\epsilon_1=4+0.01i$ ，下垫面介电常数 $\epsilon_2=8+0.5i$ ， $k\delta_2=0$ 。图 2 给出 $k\delta_1=0, 0.1$ 和 0.3 时雷达探测仪接收到的回波功率随射程距离的变化。其中射程距离减掉 50 km，这样射程距离为 0 km 时正好对应于表面天底点。可以看出，射程距离为 0 km 时表面天底点回波非常明显，受粗糙度影响不大。在月表面粗糙度 $k\delta_1=0$ 和 0.1 时，射程距离为 2 km 处的尖峰是次表面天底点回波(图中箭头所示)，也比较明显。射程距离大于 0 km 的回波是表面非天底点回波，随着月表粗糙度 $k\delta_1$ 的增大而变大。当表面粗糙度 $k\delta_1=0.3$ 时，表面非天底点回波过大而遮盖了次表面天底点回波，此时无法识别出次表面天底点回波。

Fig.2 Radar echoes versus range for different roughness of lunar surface, $H=50$ km图2 $H=50$ km时月球表面不同粗糙度的雷达探测仪回波

在 $40\text{ km}\times 40\text{ km}$ 区域内随机生成 1 000 个环形山, 环形山密度为每平方千米 0.625 个, 如图 3(a)所示。在模拟中取层 1 的厚度 $D=0.5\text{ km}$, 介电常数 $\varepsilon_1=4+0.01i$, 层 2 为平表面, 介电常数 $\varepsilon_2=8+0.5i$ 。雷达探测仪的飞行速度为 1.6 km/s , 脉冲发射率为 20。图 3(b)给出雷达探测仪沿图 3(a)中箭头飞行时月表层沿射程距离方向的回波成像, 其中射程距离减掉 50 km。可以看出, 受月表地形起伏的影响, 强烈的表面天底点回波的射程距离并非正好位于 0 km 处, 而在 0 km 附近振荡。一些较大的环形山在回波图像中呈弧形, 较小的环形山使得回波强度增加, 但是很难辨认。在星下点为 $(-2.5\text{ km}, -2.5\text{ km})$ 到 $(0.5\text{ km}, 5\text{ km})$ 时, 强烈的月球表面非天底点回波淹没了次表面天底点回波(对应的射程距离为 1.0 km), 而在其他位置时, 次表面回波仍然可以辨认。

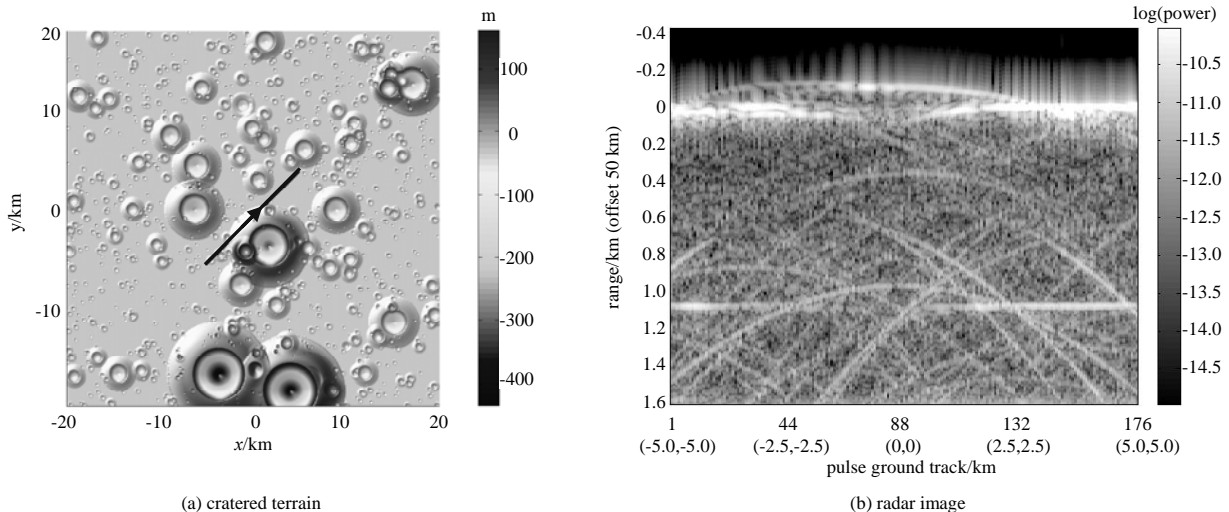
Fig.3 Radar echo image of a cratered lunar surface with 1 000 craters:crater density $0.625/\text{km}^2$

图3 月陆表面雷达探测仪回波成像: 环形山密度每平方千米 0.625 个

随着表面环形山密度的增加, 来自月表非天底点的回波强度增大, 将会使得次表面的回波很难识别。在 $40\text{ km}\times 40\text{ km}$ 区域内随机生成 4 000 个环形山, 即环形山密度为每平方千米 2.5 个, 如图 4(a)所示。图 4(b)给出了这一区域内的雷达回波成像。可以看出, 较大的环形山在回波图形中呈弧形, 小的环形山使回波强度变大, 这与图 3(b)是一致的, 但位于射程距离 1 km 处的次表面天底点回波变得很微弱, 很难辨认。图 4 模拟结果表明, 月表环形山密度越大, 表面非天底点回波强度越大, 次表面的回波功率越小, 次表面回波越难辨认。

从图 2~图 4 的数值模拟结果可知, 当月海表面粗糙度变大或月陆表面环形山密度增加时, 强烈的表面非天底点回波会淹没微弱的次表面天底点回波, 从而无法直接由雷达探测仪的观测结果来识别出次表面回波。

2 累积平均法对次表层回波提取的原理

当月海表面粗糙度变大或者月陆表面环形山密度增加时, 强烈的表面非天底点回波会淹没次表面天底点回

波，成为次表层结构探测中的最大障碍。随着雷达探测仪沿卫星轨道的飞行对月表进行连续多次观测，受月表地形起伏的影响，不同观测时刻表面非天底点回波的相位是随机变化的。如果次表面地形起伏变化不大，则次表面天底点回波的相位变化将不大，可近似认为是固定的。这样，表面非天底点回波强度大，属于非相干回波，在多次观测中相位是随机的；次表面天底点回波虽然微弱，但是其相位变化不大，可近似为相干回波。根据相干回波和非相干回波的特性，可利用雷达多次观察对各次观测时接收到的电场强度取平均来消除表面杂波的影响，进而识别出次表面回波。

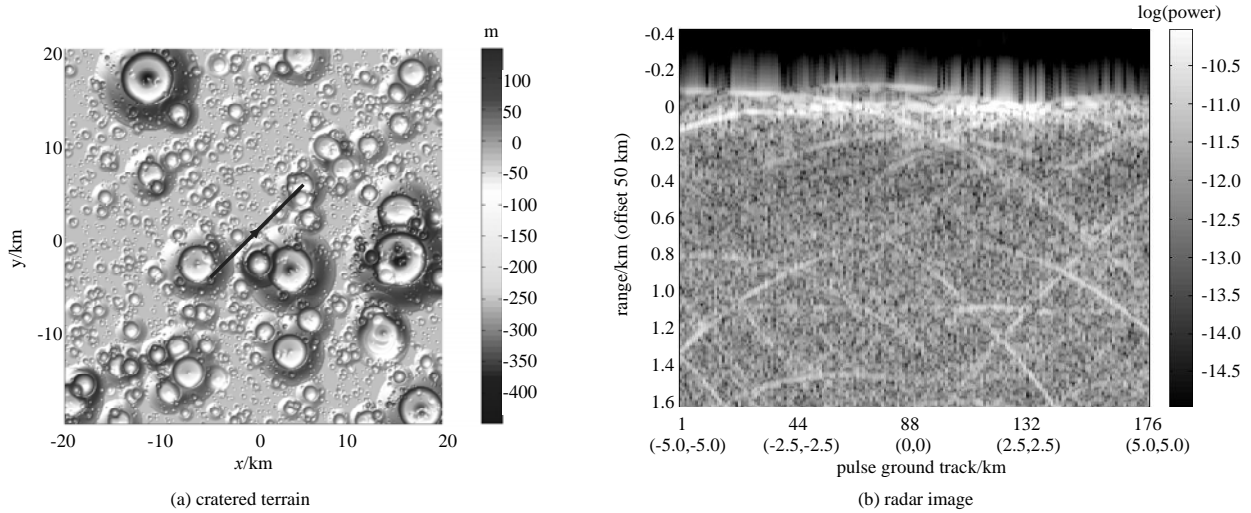


Fig.4 Radar echo image of a cratered lunar surface with 1 000 craters:crater density 2.5/km²

图4 月陆表面雷达探测仪回波成像：环形山密度每平方千米2.5个

如图5所示，雷达沿着轨道飞行时，对月表进行系列观测。假设第 n 次观测时接收到的电场强度为：

$$\mathbf{E}_n(t) = A_{n,sur} \exp[i(\phi_{n,sur} + \omega t)] + A_{n,sub} [i(\phi_{n,sub} + \omega t)] \quad (1)$$

式中： $A_{n,sur}$ 、 $A_{n,sub}$ 和 $\phi_{n,sur}$ 、 $\phi_{n,sub}$ 分别表示第 n 次观测时表面非天底点回波和次表面天底点回波的幅度与相位； ω 为角频率。

对 N 次观测结果取累积平均，则回波的平均强度为：

$$\begin{aligned} \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{E}_n(t) \right|^2 &= \frac{1}{N^2} \left\{ \sum_{n=1}^N A_{n,sur} \exp[i(\phi_{n,sur} + \omega t)] + \sum_{n=1}^N A_{n,sub} \exp[i(\phi_{n,sub} + \omega t)] \right\} \times \\ &\quad \left\{ \sum_{n=1}^N A_{n,sur} \exp[i(\phi_{n,sur} + \omega t)] + \sum_{n=1}^N A_{n,sub} \exp[i(\phi_{n,sub} + \omega t)] \right\}^* = \\ &= \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N A_{n,sur}^2 + \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N A_{n,sur} \exp(i\phi_{n,sur}) \sum_{k=1, k \neq n}^N A_{k,sur} \exp(-i\phi_{k,sur}) + \\ &\quad \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N A_{n,sur} \exp(i\phi_{n,sur}) \sum_{k=1}^N A_{k,sub} \exp(-i\phi_{k,sub}) + \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N A_{n,sur} \exp(-i\phi_{n,sur}) \sum_{k=1}^N A_{k,sub} \exp(i\phi_{k,sub}) + \\ &\quad \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N A_{n,sub} \exp(i\phi_{n,sub}) \sum_{k=1}^N A_{k,sub} \exp(-i\phi_{k,sub}) \end{aligned} \quad (2)$$

当雷达沿着轨道对月表进行一系列观察时，受月表地形的影响，不同观测时刻月表非天底点回波的相位 $\phi_{n,sur}$ 是随机的。如果月球次表面地形变化不大，则可以认为次表面天底点回波的相位 $\phi_{n,sub}$ 近似于恒定值，由 ϕ_{sub} 表示。这样式(2)可以简化为：

$$\left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{E}_n(t) \right|^2 \approx \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N A_{n,sur}^2 + \frac{1}{N^2} \left(\sum_{n=1}^N A_{n,sub} \right)^2 \approx \frac{1}{N} \langle A_{sur}^2 \rangle + A_{sub}^2 \quad (3)$$

式(3)右边第1项表示取累积平均后表面非天底点的回波强度，第2项表示次表面天底点回波强度。如果累积数

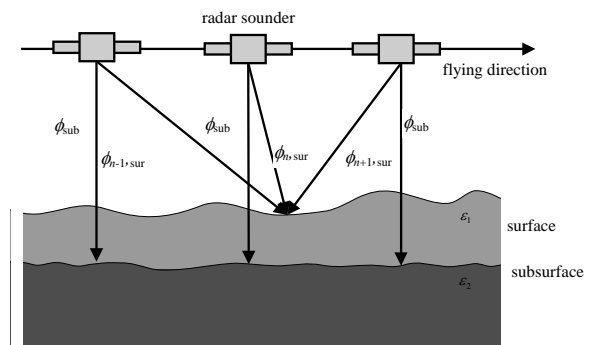


Fig.5 Stacking and averaging method for lunar subsurface echo identification
图5 累积平均法对次表层回波提取原理

目 N 足够大, 则右边第 1 项在数值上会远小于第 2 项。这表明可以通过取累积平均的办法来消除表面杂波的影响, 从而识别出次表面天底点回波。

3 数值结果与讨论

3.1 数值结果

图 2 中, 当 $k\delta_1=0.3, k\delta_2=0$, 层 1 的厚度 $D=1$ km 时, 次表面天底点回波被表面杂波所淹没, 无法识别出次表面天底点回波, 图 6(a)给出了此时雷达探测仪回波随射程距离的变化。对月表进行多次观测取累积平均, 图 6(b)~图 6(d)分别给出了累积数目 N 为 10, 20, 30 时雷达探测仪回波随射程距离的变化。可以看出, 取累积平均之后, 射程距离为 0.25 km~2.0 km 之间的表面非天底点回波(杂波)强度明显降低, 位于 2.0 km 处的次表面回波峰值比较明显, 尤其在 $N=30$ 时。随着累积平均数目 N 的增加, 表面杂波的抑制越明显, 次表面回波越容易识别。

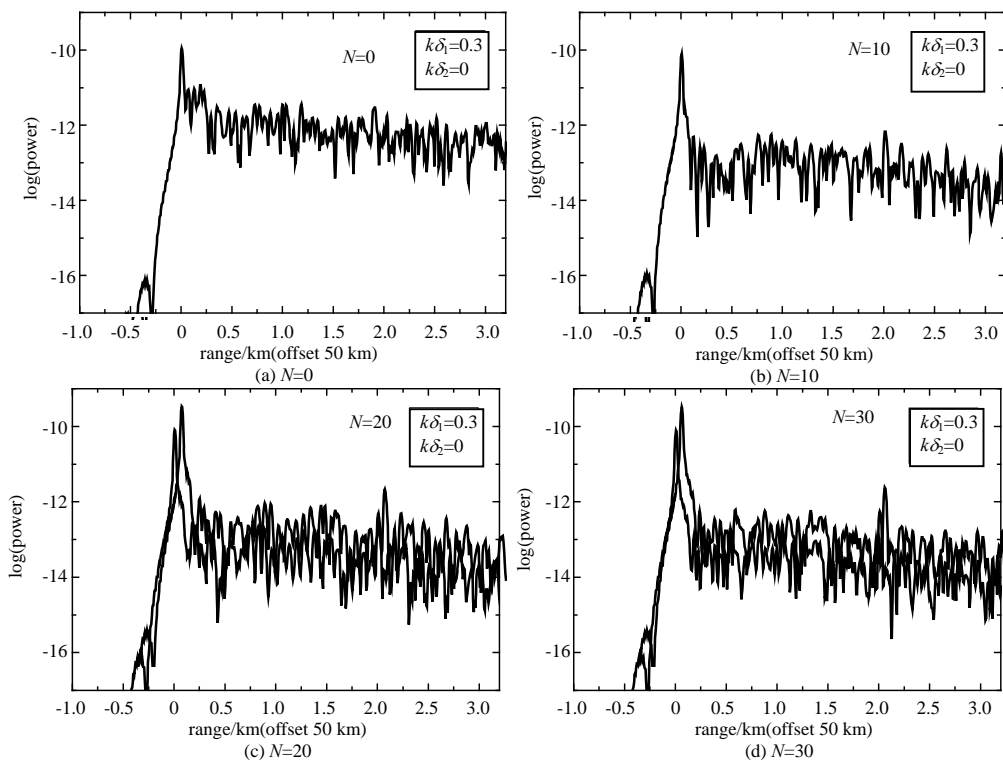


Fig.6 Radar echoes versus range for different roughness after stacking and averaging

图 6 累积平均之后雷达探测仪回波随射程距离的变化($k\delta_2=0$)

图 7 给出了 $k\delta_1=0.1, k\delta_2=0.1$, 层 1 的厚度 $D=1$ km 时, 雷达探测仪接收到的原始回波以及累积数目 N 分别为 10, 20, 30 时雷达探测仪回波随射程距离的变化。对图 7(a)所示原始回波, 无法识别出位于射程距离 2 km 处的次表面天底点回波。取累积平均之后, 位于 0.5 km~2 km 之间的表面杂波强度降低, 累积平均数目 N 越大, 对表面非天底点回波强度的抑制越明显, 2 km 处的非天底点回波峰值清晰可见。可以看出, 即使对于粗糙的次表面, 取累积平均之后次表面回波依然可以有效识别。

对图 3 中雷达探测仪随射程距离成像结果进行累积处理, 图 8 给出了 $N=10$ 和 20 时雷达探测仪回波随射程距离的变化。可以看出, 经过累积平均处理之后, 呈弧线形状的强烈的环形山回波强度变得很小, 受到明显抑制。在图 3 中, 星下点为 $(-2.5$ km, -2.5 km) 到 $(0.5$ km, 0.5 km) 时的次表面回波无法识别, 但在图 8 中则比较容易识别。比较图 8(a)与 8(b)可以发现, 累积取平均数目越多, 次表面回波越容易识别。

对图 4 中月陆表面回波的模拟结果做累积处理, 图 9 给出了累积数目 $N=30$ 时雷达探测仪回波随射程距离的成像结果。可以看出, 在对回波进行累积平均之后, 射程距离为 1.0 km 处的次表面回波比较明显, 尤其是星下点为 $(-2.5$ km, -2.5 km) 到 $(2.5$ km, 2.5 km) 处的次表面回波, 图 9 表明, 即使对于环形山密度较大的月陆地区, 本文方法也是有效的。

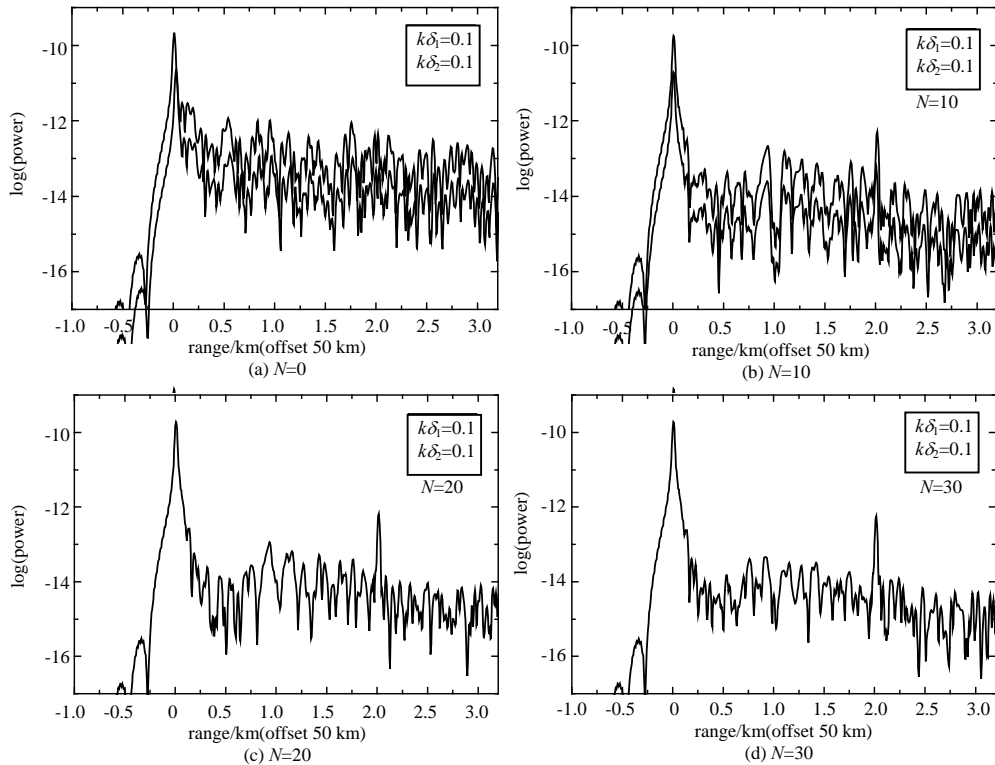


Fig.7 Radar echo versus range with different stacking and averaging number
图7 累积平均之后雷达探测仪回波随射程距离的变化($k\delta_1=0.1$)

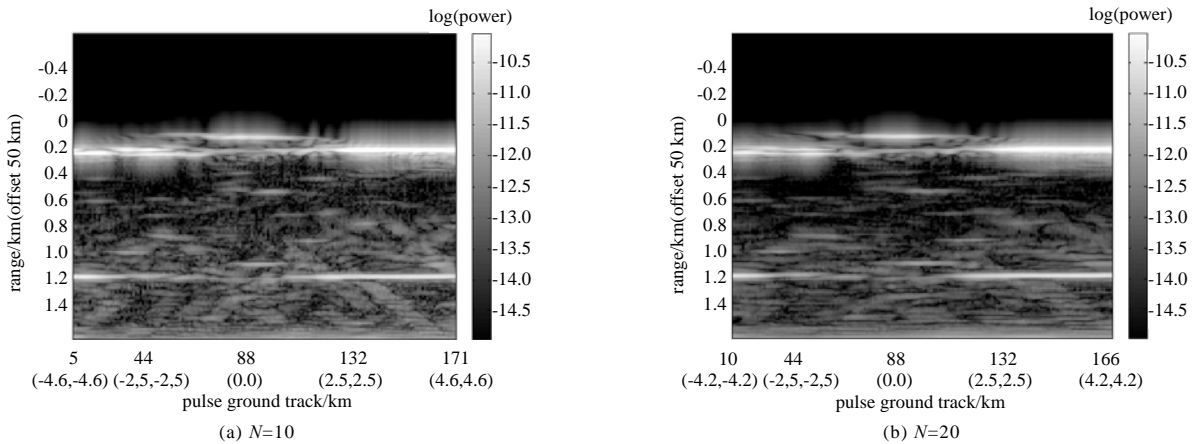


Fig.8 Radar images of figure 3(a) after stacking and averaging
图8 累积平均处理之后月陆表面回波成像

3.2 分析与讨论

累积数目 N 越大，累积平均之后表面杂波的强度越小，次表面回波越容易识别。为定量描述累积平均对表面杂波的抑制，定义表面非天底点回波平均功率为：

$$P_{\text{off-nadir}} = \frac{1}{P_0} \left[\prod_{n=N_1}^{N_3} P_n \right]^{1/(N_3-N_1+1)} \quad (4)$$

式中： P_n 表示射程距离为 n km 时表面非天底点的回波功率； N_1 和 N_3 表示射程距离为 1 km 和 3 km 时距离间隔的数目； P_0 表示当表面与次表面均为平表面，射程距离为 0 km 时(即表面天底点处)的回波功率。

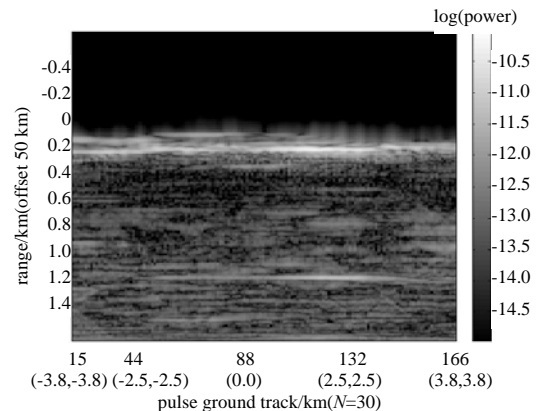


Fig.9 Radar image of figure 4(a) after stacking and averaging
图9 累积平均处理之后月陆表面回波成像

图 10 给出了表面粗糙度 $k\delta_1$ 为 0.1 与 0.3 时, 表面非天底点回波(杂波)的平均强度与表面天底点回波的强度之比随累积数目 N 的变化, 其中取次表面为平表面。可以看出, 随着 N 的增加, 表面非天底点回波(杂波)与表面天底点回波强度之比变小, 说明了累积取平均方法可以有效抑制表面非天底点回波(杂波)的干扰, 从而提取出次表面天底点回波。

累积取平均的方法基于次表面天底点回波的相干性和表面杂波的非相干性, 为满足次表面回波属于相干回波的近似, 需要月球次表面的地形在连续多次观测的区域内变化不能太大。一般地, 累积数目 N 越小, 累积平均时选取的月表范围就越小, 次表面深度变化不大的要求就越容易满足; 累积数目 N 越大, 对表面杂波的抑制会越明显, 次表面回波越容易识别。因此, 取累积数目 N 的选取应该综合考虑对表面杂波的抑制和次表面回波相干特性这 2 个因素。

4 结论

本文给出了一种从雷达探测仪回波的强烈背景杂波中提取次表面天底点回波的方法, 基于次表面天底点回波的相干性和表面杂波的非相干性, 提出在次表层地形变化不大的情况下, 由累积取平均的方法来消除表面杂波从而识别次表面回波的方法。数值结果表明, 当月海表面粗糙度或月陆表面环形山密度增加时, 表面杂波强度变大使得次表面回波很难辨认, 通过累积平均的方法, 可以明显降低表面杂波的影响, 有效识别出次表面回波。累积平均数目越大, 次表面天底点回波越容易识别。本文方法简单、有效、可行, 可作为未来月球探测中雷达探测仪对月球次表面结构探测的一种有效辅助工具, 也可应用到火星表面对水(或冰)的探测中。

参考文献:

- [1] Phillips R J, Adams G F, Brown J W E, et al. Apollo lunar sounder experiment[M]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 1973.
- [2] Porcello L J, Jordan R L, Zelenka J S, et al. The Apollo lunar sounder radar system[J]. Proceeding of the IEEE, 1974, 62(6): 769-788.
- [3] Ono T, Oya H. Lunar Radar Sounder(LRS) experiment on-board the SELENE spacecraft[J]. Earth Planets Space, 2000, 52: 629-637.
- [4] Kobayashi T, Oya H, Ono T. A-scope analysis subsurface radar sounding of lunar mare region[J]. Earth Planets Space, 2002, 54: 973-982.
- [5] Kobayashi T, Oya H, Ono T. B-scan analysis of subsurface radar sounding of lunar highland region[J]. Earth Planets Space, 2002, 54: 983-991.
- [6] Fa W Z, Jin Y Q. Simulation of radar sounder echo from lunar surface and subsurface structure[J]. Science China Earth Sci., 2010, 40(4): 473-485.
- [7] Heiken G, Vaniman D, French B. Lunar Source-Book: A User's Guide to the Moon[M]. New York: Cambridge University Press, 1991.
- [8] Fa W Z, Xu F, Jin Y Q. SAR imaging simulation for an inhomogeneous undulated lunar surface based on triangulated irregular network[J]. Science in China F, 2009, 39: 185-198.

作者简介:



李 群(1985-), 女, 湖南省汉寿县人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为探月遥感、数据处理及验证等. email: liyingqun@gmail.com.

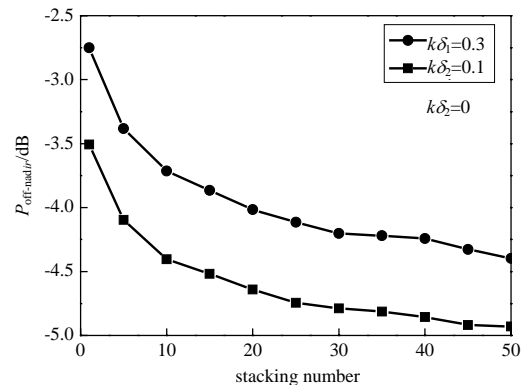


Fig.10 Intensity of surface off-nadir echo as a function of stacking number
图 10 表面杂波与表面天底点回波强度之比

法文哲(1981-), 男, 陕西省扶风县人, 博士, 研究方向为微波遥感建模、探月遥感、数据处理及验证等。