

大尺度分层介质电特性参数的反演方法研究*

张宇^{1)2)†} 张晓娟¹⁾ 方广有¹⁾

1) (中国科学院电子学研究所, 电磁辐射与探测技术重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 北京 100190)

(2012年8月21日收到; 2012年9月6日收到修改稿)

针对大尺度分层介质电磁场散射回波数据, 提出了一种用于分层介质特性参数反演的新方法, 实现了分层介质的介电常数、电导率和介质厚度的同时反演. 方法首先将这些参数的反演转化为最优化问题进行求解, 然后应用模拟退火算法搜索最优解, 充分利用算法的全局寻优能力, 同时改善了算法的搜索控制策略, 使算法在最优解的搜索过程中可以自适应地调整搜索步长, 提高了算法的搜索效率. 结果表明, 本文方法可以实现大尺度分层介质特性参数的准确反演, 且具有较强的抗噪声能力. 该方法可以应用于火星/月球雷达探测回波数据的反演以及地下分层结构特性的分析.

关键词: 电磁散射, 分层介质, 模拟退火算法, 最优化

PACS: 42.25.Fx, 02.30.Zz

DOI: 10.7498/aps.62.044204

1 引言

大尺度分层介质电磁散射以及地下分层介质结构的探测在地球物理与遥感科学、宇宙空间科学探测等方面有重要的应用价值^[1-3], 而分层介质电磁参数的反演则是该领域的难点. 近年来, 在分层介质电磁散射正演方法的研究中, 针对不同的表面特征, 有全波分析方法、相位近似方法、双尺度方法和微扰法以及分形粗糙面分析方法等新方法出现^[4-8]. 随着各国空间科学探测进程的加快, 对行星地下分层结构的探测与数据反演的新方法也不断出现, 文献[9, 10]采用 B-scan 成像的方法定性给出了月球地下分层结构分析方法, 但该方法无法定量的计算相关的介质特性参数值; Nouvel 等^[11,12]基于面元法采用微扰理论分析了火星北部地区地下分层介质的介电常数, 该方法没有考虑介质的电导率及其引起的电磁波传播损耗; Zhang 等^[13]基于贝叶斯推理模型和遗传算法分析了火星南极冠地区地下分层介质的特性.

电磁波在给定表面地貌的分层介质中传播的

过程中, 介质的介电常数、电导率以及介质厚度在电磁波的透射和散射过程中占据主导位置, 这些参数的获得对于我们开展行星地下物质及其结构的探测具有重要的应用价值. 在反演这些参数的研究工作中, 国内外较少有文献同时考虑这些参数对电磁波的影响. 同时, 在雷达回波的接收和处理过程中, 需要对接收回波进行脉冲压缩、频率偏移和截断等操作, 这使得得到的雷达回波无法显式地表达为介质特性参数的函数, 给介质参数反演的过程中使用确定性的梯度搜索方法带来了极大的困难. 本文针对这些反演中的难点, 提出了一种用于大尺度分层介质特性参数反演的新方法: 将参数的反演转化为最优化问题进行求解, 然后将模拟退火算法应用于搜索最优解, 同时改善了算法的搜索控制策略, 使算法在最优解的搜索过程中可以自适应地调整搜索步长, 提高了算法的搜索效率. 结果表明, 方法实现了上下层介质的介电常数、电导率和介质厚度的同时反演, 改进的模拟退火算法在解决本文的非线性最优化问题时, 可以有效地摆脱局部最优, 寻找到全局最优解. 本文方法可以实现大尺度分层介质特性参数的准确反演, 且具有较强的抗噪声能

* 国家自然科学基金(批准号: 61172017, 60890071-01)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhangyubin@163.com

力. 该方法可以应用于火星/月球雷达探测回波数据的反演以及地下分层结构特性的分析.

2 雷达回波计算方法概述

在利用星载雷达探测仪对行星地下结构探测的过程中, 一般采用正下视模式进行探测. 正演的模型是一个由两层介质所构成的分层结构, 其中上层介质介电常数 ϵ_1 , 电导率 σ_1 , 下层介质介电常数 ϵ_2 , 电导率 σ_2 , 上层介质厚度 H , 分层介质上方为真空, 介电常数记为 ϵ_0 . 天线系统 (偶极子天线) 向星体表面发射电磁波, 电磁波在表面发生反射和折射, 后向散射波被天线系统接收, 而透射波穿过表层介质在次表面被反射然后又经表层折射而被天线系统接收 [14].

雷达探测仪接收到回波强度可以通过 Stratton-Chu 积分方程计算 [15]:

$$\mathbf{E}(r) = - \int_S [(\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}^r) \nabla \mathbf{G} + (\mathbf{n} \times \mathbf{E}^r) \times \nabla \mathbf{G} + \{(\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{E}^r)\} \mathbf{G}] ds, \quad (1)$$

式中 \mathbf{E}^r 为入射电场经表面面元反射或透射后的电场, \mathbf{n} 为面元的法向矢量, s 为仿真区域的大小, \mathbf{G} 为真空中的格林函数, 根据远场近似条件 $1/|k| \ll |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|$ 可以得到

$$\mathbf{E}(r) = \int_S \left[-i\mathbf{k}\hat{\mathbf{k}}_{sc} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{E}^r) + i\mathbf{k}\hat{\mathbf{k}}_{sc} \times (\hat{\mathbf{k}}_{sc} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{H}^r)) \right] \mathbf{G} dS_0 \quad (2)$$

式中 $\hat{\mathbf{k}}_{sc}$ 表示由面元指向观察点的单位矢量, r 为电磁波传播的射程, 当电磁波在相对介电常数为 ϵ_r 的介质中传播时, 射程 r 与电磁波实际传播的距离 r_0 的对应关系是 $r = r_0 \cdot \sqrt{\epsilon_r}$.

通过 (2) 式计算出的 $\mathbf{E}(r)$ 相当于分层介质对雷达探测仪的冲击响应函数, 为了使雷达探测仪有足够的距离向分辨率, 雷达探测仪一般加载以一定带宽的线性调频信号. 设雷达探测仪加载的线性调频信号起始频率为 f_0 , 带宽为 B , 脉冲宽度为 T , 调频率为 $K = B/T$, 则探测仪最终接收到的时域电场强度可以表示为

$$\mathbf{E}(t) = \sum_{n=1}^N \mathbf{E}(r_n) T_r(t, \tau_n), \quad (3)$$

在 (3) 式中, T 是加载的线性调频信号, r_n 为雷达探测仪到模拟区域各面元的距离, τ_n 是雷达接收到的回波的延迟, $\tau_n = 2r_n/c$. 采用距离向的脉冲压缩, 可

以得到雷达回波随距离 (对应于时间延迟) 的变化关系.

3 反演方法概述

分层介质特性参数包括上层介质介电常数 ϵ_1 , 电导率 σ_1 , 下层介质介电常数 ϵ_2 , 电导率 σ_2 , 以及上层介质厚度 H 等, 将这些参数看成一个数组序列, 记为 \mathbf{x} . 考虑到雷达天线接收到的分层介质散射场回波是介质特性参数的非线性映射, 电磁散射的反演属于非线性最优化问题, 将其转化为一个迭代过程, 且每次迭代过程中都通过随机数控制变量的变化, 目标函数 $S(\mathbf{x})$ 随着迭代深入进行而下降, 从而达到逼近最优解的目的. 即参数组的最优解 \mathbf{x}^{opt} 满足

$$S(\mathbf{x}^{opt}) = \min S(\mathbf{x}) = \min_{\mathbf{x} \in X} \sum_i \left[\frac{r_i(\mathbf{x}) - r_i^{obv}(\mathbf{x}_{real})}{r_i^{obv}(\mathbf{x}_{real})} \right]^2, \quad (4)$$

式中, \mathbf{x}_{real} 表示介质特性参数序列的真实值, $r_i^{obv}(\mathbf{x}_{real})$ 表示雷达天线接收的回波数据序列, $r_i(\mathbf{x})$ 表示通过正演算法计算得到的雷达回波数据.

模拟退火算法可以应用于求解多元函数全局最小值, 可以有效地摆脱局部极小值, 以任意接近于 1 的概率达到全局最小值点, 因此在组合优化问题和连续空间优化问题上都有广泛的应用 [16-19]. 在电磁学领域, 模拟退火算法作为一种全局寻优的反演方法, 已成功应用于近场超分辨反演与成像等相关领域 [20]. 算法通过内部温度和外部温度控制迭代的进行, 通过判断决定迭代是否被接受. 开始时先设定 \mathbf{x} 的初始分布值 \mathbf{x}_0 , 然后利用正演算法计算出雷达接收到的回波序列 $\mathbf{r}(\mathbf{x}_0)$, 根据 (4) 式的定义计算出 $S(\mathbf{x}_0)$. 分别在 \mathbf{x}_0 各元素附近邻域内取扰动 \mathbf{x}' 构成新的数列 $\mathbf{x}^* = \mathbf{x}_1 + \mathbf{x}'$, 称之为一次“跳跃”. 利用正演算法计算出 $\mathbf{r}(\mathbf{x}^*)$ 以及 $S(\mathbf{x}^*)$. 将 $S(\mathbf{x}^*)$ 和上一步计算出的 $S(\mathbf{x}_0)$ 进行比较, 如果前者较后者小, 即目标函数由于这次参数的“跳跃”而变小了, 说明这次“跳跃”是成功的, 那么就接受这次跳跃, 即令 $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$, 然后继续开始新的“跳跃”; 如果前者较后者大, 就说明这次产生的新的 \mathbf{x}^* 没有能使目标函数减小, 那么就计算出 $\Delta S = S(\mathbf{x}^*) - S(\mathbf{x}_0)$, 同时产生一个随机数 $\xi \in (-1, 1)$, 比较 $\exp(-\Delta S/T)$ 和 ξ 的大小 (式中 T 是控制循环的正整型变量), 如

果前者较大,也同时接受这次“跳跃”,即令 $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}^*$, 这样的“跳跃”虽然使目标函数变大了,但它有助于方法在寻优过程中不至于陷入局部优化,即能使该方法在寻优过程中跳出局部优化而达到全局优化,所以也接受这样的“跳跃”.这是本方法的一个特点,也是一个重要优点.反过来,如果后者大,就不接受这次“跳跃”,再在上一次的基础上重新“跳跃”,这样迭代下去,直至寻找到最优解 $\boldsymbol{x}^{\text{opt}}$.迭代的流程图如图 1 所示,在图 1 中,以反演的变量序列 \boldsymbol{x} 是 (σ, ε) 为例进行演示.

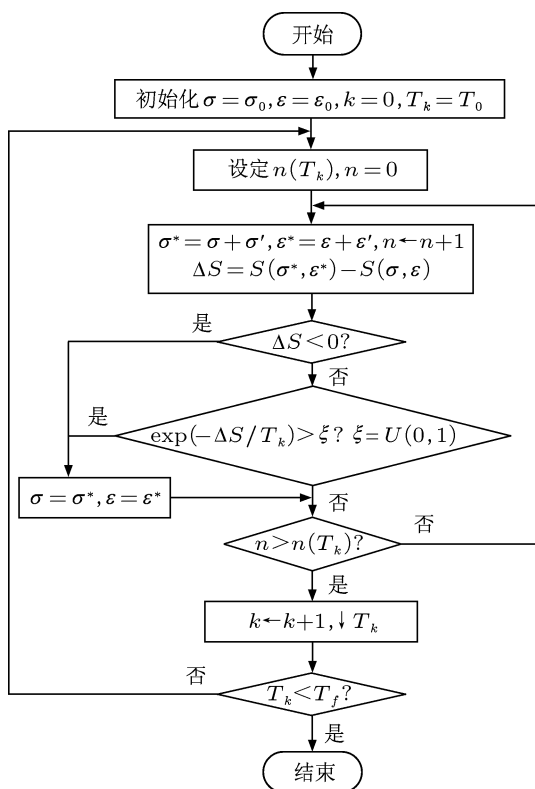


图 1 模拟退火算法进行参数反演的流程

4 反演结果与分析

为了验证上述反演方法的有效性,本文设置了一个大尺度分层介质结构的场景,尝试采用上述反演方法来获得该分层介质的特性参数.在仿真的过程中,天线发射的电磁波中心频率 $f_0 = 5 \text{ MHz}$, 带宽 $B = 8 \text{ MHz}$, 偶极子天线长度为 $L = 30 \text{ m}$, 天线发射功率 $P = 800 \text{ W}$. 选取雷达高度 $H = 20 \text{ km}$, 表面区域大小为 $L = 10 \text{ km}$ 的方形区域, 表面的地貌地形已知. 选取次表面为平面, 次表面深度为 -100 m . 表层介质复介电常数 $4.0 + 0.03i$, 次表层介质复介电常数 $8.0 + 0.5i$. 采用本文的正演方法, 得到的雷

达回波波形如图 2 所示. 在图 2 中, 横坐标表示回波与回波最前端之间的射程差 (对应于时延), 纵坐标为归一化的电场, 取表面和次表面均为平面时的天底点回波强度 E_0 作为归一化因子. 由图 2 可以看出, 天线接收的回波包含强烈的表面天底点回波 (峰值在 $r = 0 \text{ m}$ 处)、表面非天底区域回波 (杂波) 和次表面天底点回波 (峰值在射程 $r = 200 \text{ m}$ 处).

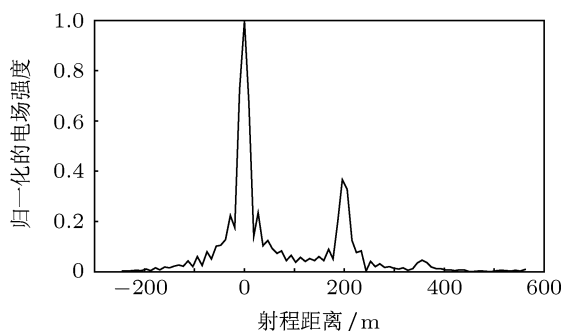


图 2 正演结果 —— 雷达天线接收到的分层介质散射回波

在本文的反演中, 将上述正演结果作为雷达天线接收的实际回波, 亦即被反演对象. 针对分层介质五个特性参数: 上层介质介电常数 ε_1 , 电导率 σ_1 , 下层介质介电常数 ε_2 , 电导率 σ_2 , 以及上层介质厚度 H , 采用上述模拟退火算法反演得到其真实值. 首先针对这五个参数中最重要的三个参数: 上层介质介电常数 ε_1 , 下层介质介电常数 ε_2 和上层介质厚度 H 进行反演 (其他两个参数作为已知条件), 待验证算法的有效性后, 再对五个参数同时进行反演.

4.1 三参数问题 ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, H$) 的反演

4.1.1 搜索策略

首先设定反演的初始的经验值 $(2.0, 6.0, -150)$, 在算法中, 设定流程中的内部循环次数 $N_s = 50$ 并保持不变, 这意味着内部循环每次都进行 50 次, 然后进行外部循环. 设定外部循环的温度控制变量的初始值 $T_0 = 100$, 且按照 $T_{k+1} = T_k \cdot 0.95^{k+1}$ 的规律变化. 在每次循环的过程中, 需要对每个参数的变化量设置变化区间, 即扰动区间, 对第 i 个参数, 设其扰动区间用 ζ_i 表示, 本文采用以下方式来设定每个参数的扰动区间:

$$\zeta_i = (-\delta_i, \delta_i) \cdot \exp\left(5.0 \cdot \frac{N_{\text{na}}}{N_s}\right), \quad (5)$$

式中 δ_i 为扰动区间的初始范围阈值, N_s 为内部循环的总次数, N_{na} 为每个内部循环中“跳跃”没有被

接受的次数, 系数 5.0 是通过多次实验得到的优化经验值. 该策略具有以下特点:

1) 通过 (5) 式可以看出, 设置的参数的扰动区间是动态变化的, 它可以根据“跳跃”没有被接受的次数动态变化, “跳跃”没有被接受的次数增大时, 扰动区间也随之增大, 这样就可以扩大搜索范围, 进行全局搜索, 进而找到全局最优解;

2) 当一次内部循环结束之后, N_{na} 将被归 0, 这样扰动区间重新从 $(-\delta_i, \delta_i)$ 开始动态变化.

4.1.2 反演结果与分析

设置目标函数 S 的收敛阈值为 0.5, 即当 $S < 0.5$ 时, 算法停止搜索, 认为此时的参数序列 \mathbf{x} 就是满足收敛条件的最优解. 在搭载 Intel Core i5-240, 主频 3.1 GHz, 2 G 内存的 PC 机上, 算法运行 35 min 24 s 收敛. 图 3 为该问题的目标函数的收敛曲线. 从图 3 所示的目标函数的收敛曲线可以看出模拟退火算法进行最优化求解时的搜索特点. 在最优解的求解过程中, 目标函数不是依次减小, 而是波动式地减小, 在搜索陷入局部最优解时, 模拟退火算法通过改变搜索策略, 扩大搜索范围, 从而跳出局部最优解, 在跳出局部最优的过程中, 目标函数是增大的. 纵观整个搜索过程, 目标函数最终收敛至设定的阈值以下, 从而找到全局最优解.

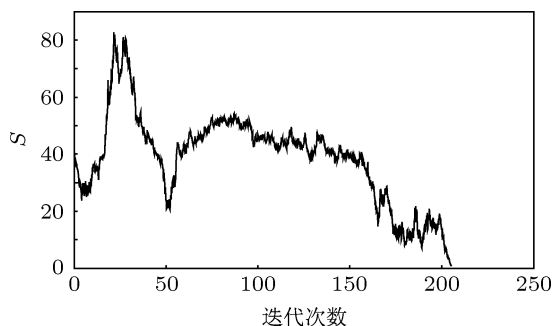


图 3 目标函数的收敛曲线

为了验证反演算法的有效性, 实施了三组仿真实验. 针对原始回波数据、加入 5% 随机噪声的回波数据和加入 15% 随机噪声的回波数据, 分别进行了 20 次反演计算 (参数的反演初值也改变), 并对计算结果求平均值. 表 1 给出了在给定的收敛条件下, 这三组反演实验结果的平均值.

以下是对该结果的分析.

1) 从表 1 给出的反演结果与真实值的比较中可以看出, ϵ_1 的反演结果较 ϵ_2 和 H 误差率小, 这主要因为这三个参数对雷达回波的影响程度不同, 从

图 1 可以看出, 表面天底点 ($r = 0$ m 处) 回波要远强于次表面天底点 ($r = 200$ m 处) 回波, 对于待反演的三个参数, ϵ_1 主要决定表面回波强度, 而 ϵ_2 和 H 决定次表面回波的强度和峰值位置, 所以雷达回波对 ϵ_1 的变化更敏感. 因此 ϵ_1 的反演结果较 ϵ_2 和 H 更准确.

2) 比较加入噪声前后的反演结果可以发现, 随着加入噪声比例的增大, 反演结果的误差也增大. 同时也可以看到, 在对原始信号加入 15% 的噪声后, 反演误差控制在 5% 以内, 这说明通过多次计算求平均值的方法, 可以提高计算结果的精度.

表 1 三参数问题的反演结果

	ϵ_1	ϵ_2	H
真实值	4.0000	8.0000	-100.00
反演结果 (无噪声)	3.9963	8.0821	-100.47
反演结果 (5% 噪声)	3.9424	7.8358	-102.46
反演结果 (15% 噪声)	4.1263	8.3521	-95.62

4.2 五参数问题 ($\epsilon_1, \epsilon_2, H, \sigma_1, \sigma_2$) 的反演

分层介质中上下层介质的电导率 σ_1 和 σ_2 对于确定各层介质类型具有重要的意义, 因此在通过三参数问题验证了算法的有效性之后, 在反演过程中有必要将这两个参数考虑进去. 在五参数的反演中, 雷达波照射场景与分层介质特性参数设置与三参数问题相同. 五个参数在反演中的初始值设置为 (2.0, 6.0, -150, 0.05, 0.3), 设置目标函数 S 的收敛阈值为 0.5, 即当 $S < 0.5$ 时, 算法停止搜索. 在相同的计算机硬件平台, 采用相同的反演流程和参数设置, 算法搜索 1 h 12 min 5 s 后收敛. 通过 10 次反演计算后求平均值, 得到的计算结果如表 2 所示.

表 2 五参数问题的反演结果

	ϵ_1	ϵ_2	H	σ_1	σ_2
真实值	4.0000	8.0000	-100.00	0.0300	0.5000
反演结果	3.9716	7.8325	-100.34	0.0354	0.4645

以下是对计算结果的分析. 首先, 对于 ϵ_1, ϵ_2 和 H 三个参数, 其反演精度较三参数问题的反演结果降低了, 这是因为加入了 σ_1 和 σ_2 两个参数, 对雷达回波的影响因素增加, 算法搜索的复杂度增加, 在相同的收敛阈值下, 反演结果精度降低. 其次, σ_1 和 σ_2 的反演结果与真实值之间有一定的误差, 这是因为雷达回波对 σ_1 和 σ_2 这两个参数较 ϵ_1, ϵ_2 和 H 这三个参数变化的敏感度低, 因此这两个参数反

演出的结果误差增大.

需要指出的是,通过增大内循环次数 N_s ,降低目标函数的收敛阈值可以提高反演结果精度,但是达到收敛所需要的时间则会相应增加.

5 结论

本文基于模拟退火算法,提出了一种用于反演大尺度分层介质电特性参数的新方法.针对分层介质的五个重要参数:上层介质介电常数 ϵ_1 ,电导率 σ_1 ,下层介质介电常数 ϵ_2 ,电导率 σ_2 ,以及上层介质厚度 H ,对新方法进行了仿真实验,给出了三参数问题 $(\epsilon_1, \epsilon_2, H)$ 和五参数问题 $(\epsilon_1, \epsilon_2, H, \sigma_1, \sigma_2)$ 的反演结果,并对结果作出了分析.主要结论有以下几点:

1) 采用本文方法可以有效实现分层介质特性参数的反演,在进行最优解的求解过程中,目标函

数不是依次减小,而是波动式的减小,在搜索陷入局部最优解时,算法通过改变搜索策略,扩大搜索范围,从而跳出局部最优解,达到全局寻优的目的;

2) 参数反演结果的精确度和参数对雷达回波的影响程度有关,雷达回波对某参数的变化越敏感,该参数的反演越准确;

3) 比较加入噪声前后的反演结果后发现,随着加入噪声比例的增大,反演结果的误差也增大,通过多次计算求平均值的方法,可以提高计算结果的精度.

由于每次反演迭代都伴随着一次正演过程,因此正演算法的效率是影响整个计算过程的重要因素,快速的正演方法能大大减少程序的运行时间,因此寻找更快速准确的正演方法,同时提高反演算法在最优解搜索过程中的效率,减少迭代次数将是下一步工作的重点.

-
- [1] Ilyushin Y A 2007 *Planet. Space Sci.* **55** 100
- [2] Kobayashi T, Oya H, Ono T 2002 *Earth Planets Space* **54** 973
- [3] Spagnuolo M G, Grings F, Perna P, Franco M, Karszenbaun H, Ramos V A 2011 *Planet. Space Sci.* **59** 1222
- [4] Zhang Y Q, Ge D B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4573 (in Chinese) [张玉强, 葛德彪 2009 物理学报 **58** 4573]
- [5] Guo L X, Wang Y H, Wu Z S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5130 (in Chinese) [郭立新, 王运华, 吴振森 2005 物理学报 **54** 5130]
- [6] Ilyushin Y A 2004 *Planet. Space Sci.* **52** 1195
- [7] Ye H X, Jin Y Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4579 (in Chinese) [叶红霞, 金亚秋 2009 物理学报 **58** 4579]
- [8] Ren X C, Guo L X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1627 (in Chinese) [任新成, 郭立新 2009 物理学报 **58** 1627]
- [9] Kobayashi T, Oya H, Ono T 2002 *Earth Planets Space* **54** 982
- [10] Fa W Z, Jin Y Q 2010 *Sci. China: Earth Sci.* **40** 473 (in Chinese) [法文哲, 金亚秋 2010 中国科学: 地球科学 **40** 473]
- [11] Nouvel J F, Herique A, Kofman W, Safaenili A 2004 *Radio Sci.* **39** RS1013
- [12] Nouvel J F, Martelat J E, Herique A, Kofman W 2006 *Planet. Space Sci.* **54** 337
- [13] Zhang Z F, Hagfors T, Nielsen E, Picardi G, Mesdea A, Plaut J J 2008 *J. Geophys. Res.* **113** E05004
- [14] Zhang Y, Zhang X J, Fang G Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184203 (in Chinese) [张宇, 张晓娟, 方广有 2012 物理学报 **61** 184203]
- [15] Fung A K 1994 *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications* (London: Artech House) p55
- [16] Kirkpatrick S 1983 *Science* **220** 671
- [17] Li S Y, Du Z H, Wu M Y, Zhu J, Li S L 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1260 (in Chinese) [李树有, 都志辉, 吴梦月, 朱静, 李三立 2001 物理学报 **50** 1260]
- [18] Yang X P, Zhai H C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1578 (in Chinese) [杨晓苹, 翟宏琛 2005 物理学报 **54** 1578]
- [19] Guo L P, Cheng Z X, Han F T, Liu Y, Zhao Z X 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2842 (in Chinese) [郭立平, 成之绪, 韩甫田, 柳义, 赵志祥 2003 物理学报 **52** 2842]
- [20] Garnero L, Franchois A, Hugonin J P, Pichot C, Joachimowicz N 1991 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **39** 1801

A data inversion method for electromagnetic scattering from large-scale layered medium*

Zhang Yu^{1)2)†} Zhang Xiao-Juan¹⁾ Fang Guang-You¹⁾

1) (*Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology of Chinese Academy of Sciences, Institute of Electronic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(Received 21 August 2012; revised manuscript received 6 September 2012)

Abstract

An inversion method for electromagnetic scattering echo data from large-scale layered medium is presented to simultaneously retrieve the electromagnetic property parameters of the medium. Firstly, the inversion is converted into an optimization problem. Then the simulating annealing algorithm is adopted to find the optimal solution by taking full advantage of the algorithm global optimization. Besides, the search control strategy of the algorithm is optimized so that the algorithm can adaptively adjust the search step in the optimal solution search process. The search efficiency of the algorithm is improved by these optimizations. Results show that the proposed method can achieve an accurate result in the inversion of the characteristic parameters of large-scale layered media as well as a strong anti-noise ability. The inversion method presented can be applied to the Mars/lunar radar echo data inversion and analysis of underground layered medium.

Keywords: electromagnetic scattering, layered medium, simulated annealing algorithm, optimization

PACS: 42.25.Fx, 02.30.Zz

DOI: 10.7498/aps.62.044204

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61172017, 60890071-01).

† Corresponding author. E-mail: zhangyuinbit@163.com