Modern Physics 现代物理, 2026, 16(6), 269-281
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mp
https://doi.org/10.12677/mp.2026.166028

Hans汉斯

有限含水体与连续层的航空探地雷达响应差异

邓高源[1]，卢涵宇[1,2]，陈小青[2*]，袁咏仪[2]

[1]贵州大学大数据与信息工程学院，贵州 贵阳
[2]贵州工程应用技术学院毕节市大数据应用工程研究中心，贵州 毕节

收稿日期：2026年10月9日；录用日期：2026年11月2日；发布日期：2026年11月6日

摘 要

理想化三维航空探地雷达正演常以连续层代替有限含水体，但横向截断可能改变响应。本文构建空背景、有限体和连续层严格配对模型，在10、20和30 m高度、三种含水状态下完成69组FDTD比较，以接收道能量代理、峰值幅值和包络到时偏差为联合判据，并用形状、频率、网格和合成扰动控制约束解释。能量代理比在$L/r_P = 1.43$~1.48首次达到2.50~2.77后振荡回落；等面积形状仍产生不同响应。69个逐状态样本中66个由能量偏差主导，3个由振幅偏差主导。10%容差下，10 m和20 m序列分别发生3次和2次相邻变类，30 m无变类；2%合成扰动下两场景全状态通过率为45%和43%。结果表明替代误差非单调、依赖形状且对容差敏感，不能据此给出唯一最小尺寸或现场检出阈值；本文提供的是受控数值正演中的模型替代风险审查方法。

关键词

有限含水体，连续层，三维有限差分时域法，航空探地雷达，计算物理

Airborne-GPR Response Differences between Finite Water-Bearing Bodies and Continuous Layers

Gaoyuan Deng[1], Hanyu Lu[1,2], Xiaoqing Chen[2*], Yongyi Yuan[2]

[1]College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou
[2]Big Data Application Engineering Research Center of Bijie City, Guizhou University of Engineering Science, Bijie Guizhou

[*]通讯作者。

文章引用：邓高源，卢涵宇，陈小青，袁咏仪. 有限含水体与连续层的航空探地雷达响应差异[J]. 现代物理, 2026, 16(6): 269-281. DOI: 10.12677/mp.2026.166028

Received: October 9, 2026; accepted: November 2, 2026; published: November 6, 2026

Abstract

Idealized three-dimensional airborne ground-penetrating radar forward models often replace finite water-bearing bodies with continuous layers, although lateral truncation may alter the response. We constructed strictly paired empty-background, finite-body, and continuous-layer models and performed 69 FDTD comparisons at heights of 10 m, 20 m, and 30 m under three water-content conditions. Receiver-trace energy proxy, peak-amplitude deviation, and envelope arrival-time deviation formed a joint criterion; shape, frequency, grid, and synthetic-perturbation controls constrained the interpretation. The energy-proxy ratio first reached 2.50~2.77 at L/rP = 1.43~1.48 before declining with oscillations; equal-area shapes still produced different responses. Energy deviation dominated 66 of the 69 state-specific samples, and amplitude deviation dominated the remaining three. At a 10% tolerance, the 10 m and 20 m sequences underwent three and two adjacent classification changes, respectively, whereas the 30 m sequence showed none. Under 2% synthetic perturbations, the all-state passing rates for the two scenarios were 45% and 43%. These results show that substitution errors are nonmonotonic, shape-dependent, and tolerance-sensitive. They do not establish a unique minimum size or a field detection threshold; the method provides a way to audit model-substitution risk in controlled numerical forward modelling.

Keywords

Finite Water-Bearing Body, Continuous Layer, Three-Dimensional FDTD, Airborne GPR, Computational Physics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

降雨入渗可通过短时孔隙水压力变化影响部分滑坡的发生；地球物理方法可用于调查滑坡水文地质结构，探地雷达也已用于土壤含水状态的非侵入性表征[1]-[3]。

机载和无人机平台可在地面进入困难的场景下开展非接触式 GPR 测量；已有系统综述、现场试验和天线－实验－仿真研究表明，平台、天线与地空耦合条件共同限定可解释的测量几何[4]-[6]。

近期 UAV-GPR 研究已把介电常数与电导率联合估计、波形反演和不确定性表征纳入分析。这些进展同时说明，将理想化数值结果外推到工程判断前，必须保留外部对照和剩余不确定性[7] [8]。

三维 FDTD 模型已在 GPU 框架、真实沉积模型与复杂地形航空 GPR 处理中被用于分析三维传播和处理效应；这些工作提示，二维/连续化近似需要针对问题边界另行验证。Mao 等(2025)在航空 GPR 滑坡模型中构造了有限三维含水体和层状含水模型，并展示了相应的波形与场分布对照；复杂地形研究则提供了三维正演结合处理方法的案例[9]-[13]。

在这一最接近的工作基础上，尚待回答的不是两类模型是否可能不同，而是：当含水体横向尺寸、飞行高度和含水状态系统变化时，差异如何演化；直接样本能否形成稳定的替代尺度；形状、频率和数值控制能排除哪些简单解释。本文的增量因此是完整离散序列上的条件分类和证据边界，而不是再次证

明有限体与连续层存在差异。

表观孔径与 Fresnel 体积研究表明，横向尺度会影响 GPR 照明与反射响应；二维和三维空气耦合建模的幅值与传播特征也可能不同。因此，本文不把 Fresnel 半径直接当作捕获能量比例，而只把它作为待检验的横向尺度坐标[14]-[17]。

本文只回答一个主问题：在理想化三维航空 GPR 模型中，连续层替代有限横向含水体的误差如何随尺度变化，为什么不能把一次失败–通过变化写成唯一阈值。为此，先用全部直接样本检验误差是否单调，再用形状、频率和数值控制限制简单机制，最后以三项联合指标枚举完整序列中的每一次类别变化，并用合成扰动检验分类脆弱性。答案只对本文声明的模型族有效。

2. 理论与可检验预期

2.1. 配对响应与归一化观测量

每个飞行高度和含水状态都使用相同的背景、网格、域、源和接收机，分别计算空背景 M_0、有限体 M_F 和连续层 M_S。以接收机记录的 y 极化电场分量构造目标诱导配对迹线：

$$e_F(t)=E_y^{\mathrm{MF}}(t)-E_y^{\mathrm{M0}}(t),\ e_S(t)=E_y^{\mathrm{MS}}(t)-E_y^{\mathrm{M0}}(t) \tag{1}$$

主要观测量是接收道时窗平方场积分 E_j 及接收道能量代理比 R_E，连续层对应 $R_E=1$。该量既不是空间电磁总能量，也不是 Poynting 通量。有限侧向截断可能移除连续层中相消的部分，因此 $R_E>1$ 不违反能量守恒；它只描述单接收点、单分量在固定时窗内的相对响应。

$$R_E=\frac{E_F}{E_S},\ E_j=\int_{t_1}^{t_2}e_j^2(t)\mathrm{d}t \tag{2}$$

2.2. 孔径类比的假设边界

为检验有限孔径干涉是否与数值序列定性相容，采用可分离的方形孔径积分。单频表达式及其宽带加权形式分别为：

$$Q_{\mathrm{mono}}(x)=4\left[C^2\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)+S^2\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)\right]^2,\ x=\frac{L}{r} \tag{3}$$

$$Q_W(x)=\frac{\sum_f W(f)Q_{\mathrm{mono}}\left(x\sqrt{\frac{f}{f_c}}\right)}{\sum_f W(f)} \tag{4}$$

源谱权重只使用源信号；M_S 谱权重则使用同一目标响应时窗中的连续层响应，因此不是独立预测。规划尺度和两层旁轴尺度分别为 $r_P=\left[\lambda_0(h+d_c)/2\right]^{1/2}$ 及 $r_L=\left[\lambda_0\left(h+d_c/\sqrt{\varepsilon_c}\right)/2\right]^{1/2}$。孔径计算在观察到 FDTD 模式后才形式化，省略了矢量辐射、有限厚度、斜入射、损耗非均匀性和近场天线物理，故即使曲线相似也只能支持定性类比。

3. 数值模型与判定方法

3.1. 物理模型、材料律与源

背景为上覆 1 m 干燥覆盖层和泥岩基底；M_F 中含水体为 $L\times L\times 1$ m，M_S 中同一材料沿横向连续铺展。相对介电常数采用 Topp 等在矿质土样品上建立的经验关系作为情景材料律，电导率采用声明的情景

律：[18]

$$\begin{aligned}\varepsilon_r(\theta_v) &= 3.03 + 9.3\theta_v + 146\theta_v^2 - 76.7\theta_v^3 \\ \sigma(\theta_v) &= 0.001 + 0.05\theta_v\end{aligned} \tag{5}$$

三种状态为 θ_v = 0、0.075 和 0.30；对应 ε_r 分别为 3.0300、4.5164 和 16.8891，电导率分别为 0.0010、0.00475 和 0.0160 S/m。源为中心频率 100 MHz 的一阶 Blackman-Harris 子波，记录理想 y 极化 E_y 分量，收发距为 0.2 m。模型电学参数见表 1，窗口函数选择依据来自经典频谱窗研究[19]。

Table 1. Electrical properties of the model
表 1. 模型电学参数

组分或状态	θ_v	ε_r	σ/(S·m^{-1})
干燥覆盖层	0	3.0300	0.0010
滑移材料(干)	0	3.0300	0.0010
滑移材料(7.5%)	0.075	4.5164	0.00475
滑移材料(30%)	0.30	16.8891	0.0160
泥岩基底	—	12.0	0.0300

3.2. FDTD 矩阵、指标与直接边界样本

计算采用 gprMax 及其 CUDA 求解器；空间步长为 0.05 m，时间步长服从三维 Courant 限制，边界使用 10 层 CFS-PML。GPU 加速软件和原始 gprMax 方法分别见文献[9] [10]和文献[20]。系统样本集包括 69 组配对：10 m 和 20 m 高度的 L = 2~16 m 序列，以及 30 m 高度的 L = 2~12 m 序列；三高度共同采样范围到 L/r_P = 1.760。观察 10 m 序列后，另在 15 m 高度增加 L = 17.0 和 18.2 m，仅作后验敏感性检查。

所有分析窗均由理论到时预先确定并在配对模型间共用：顶界面峰值窗为 t_{top} − 3 ns 至 t_{top} + 12 ns，目标响应与平方场积分窗为 t_{top} − 3 ns 至 $t_{\text{bot}} + T_{\text{BH}}$ + 3 ns，其中 T_{BH} 为 Blackman-Harris 子波时长。为避免连续层分母过小时放大数值误差，采用全主矩阵固定保护量 $\varepsilon_E = 10^{-3}\max(E_S)$ 与 $\varepsilon_A = 10^{-3}\max|A_S|$，不按单个样本重新调节。

三项偏差分别是接收道能量代理偏差、峰值幅值偏差和包络峰到时偏差。只有当三个含水状态同时满足 $\max(D_E, D_A, D_t) \le$ 容差时，某个直接样本才被判为通过。以 10%为主要报告容差，同时计算 5%、10%和 20%的完整离散序列；枚举每一次相邻变类，不连接未采样尺寸。若通过段延伸至采样终点，只报告为右删失的终端通过段，不解释为持续阈值。

作为不改变主判据的后验波形诊断，进一步在同一预定义目标响应窗内比较 $M_F - M_0$ 与 $M_S - M_0$ 的峰值极性和零时滞归一化内积；该诊断不参与 PASS/FAIL 分类。

$$\begin{aligned}D_E &= \frac{|E_F - E_S|}{\max(E_S, \varepsilon_E)} \\ D_A &= \frac{\big||A_F| - |A_S|\big|}{\max(|A_S|, \varepsilon_A)} \\ D_t &= |t_F - t_S|\, f_c\end{aligned} \tag{6}$$

为回应超调的相位解释，在每个高度–含水状态序列内，将相邻嵌套方形的目标诱导接收道之差定义为尺寸增量 Δe。同一预定义目标响应窗内，较大有限体的平方场积分可严格分解为原有限体项、增量

自身项和交叉项 C；以 Γ 表示交叉项相对于前两项之和的比例。$\Gamma>0$、$\Gamma<0$ 分别表示该接收道增量在这一时窗内净相长或净相消，但该后验恒等分解不是目标中心与边缘的独立空间分区，也不改变主分类。

$$\Delta e_{L_0\to L_1}(t)=e_{L_1}(t)-e_{L_0}(t)$$

$$E_{L_1}=E_{L_0}+E_{\Delta}+C,\ C=2\int_{t_1}^{t_2}e_{L_0}(t)\Delta e(t)\mathrm{d}t \tag{7}$$

$$\Gamma=\frac{C}{E_{L_0}+E_{\Delta}}$$

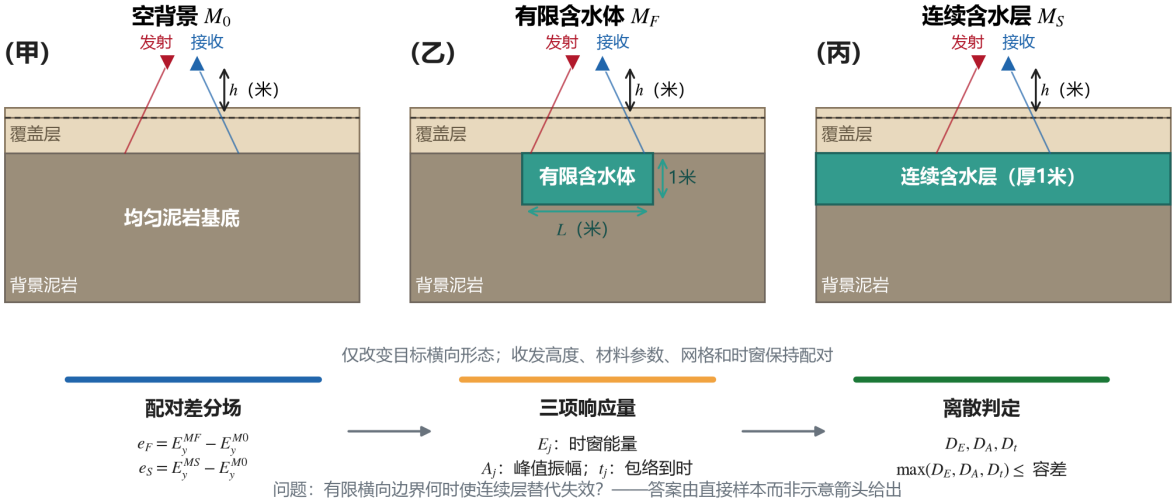


Figure 1. Paired model design and inference chain. M_0, M_F, and M_S differ only in the lateral target configuration; transmitter-receiver height, material parameters, grid, and time windows remain paired. The sequence below shows the difference fields, three response quantities, and discrete joint classification

图 1. 配对模型设计与推断链。M_0、M_F 和 M_S 只改变目标横向形态，收发高度、材料参数、网格与时窗均保持配对；下方依次给出差分场、三项响应量和离散联合判定

3.3. 针对主要观察的数值检验

域/网格端点检验覆盖 L = 14/15 m 样本；局部峰形检验在 h = 10 m 比较 L = 4、6、8 m。端点一致性要求各指标变化不超过 0.02 且分类不变；局部峰形要求三种含水状态均保留 L = 6 m 峰值，峰值裕度不低于 0.75。这些检验仅覆盖所列样本。0.05 m 网格在最高介电常数材料中约为 4 个网格单元/波长，估计最大相速度误差为−5.41%；代表性的 1/30 m 细网格约为 7 个网格单元/波长，误差仍为−2.19%。因此，本文只讨论端点和局部顺序的一致性，不声称全参数域网格收敛。

面积匹配长宽比、75/100/125 MHz、5˚坡面、0.15 m 正弦粗糙度、极化和离轴位置用于约束机制。以顶界面窗内共同峰值的 2%独立扰动 M_0、M_S 和 M_F 迹线；每个场景用 100 个固定种子，并共用同一重复的 M_0 背景。该压力测试仅评价合成读数敏感性，不代表仪器噪声、SNR 或现场检出率；配对设计见图 1。

4. 结果

4.1. 有限尺寸产生局部非单调超调

图 2 显示，随着 L/r_P 增大，M_F 从接近空背景响应开始，越过连续层响应后出现超调，再以振荡方式向 R_E = 1 回落。九个状态－高度组合的首个直接采样峰位于 L/r_P = 1.426~1.478，峰值 R_E = 2.495~2.771；

最大响应并不对应最大的体尺寸。有限截断和干涉是合理的定性解释，但不是唯一已识别机制。

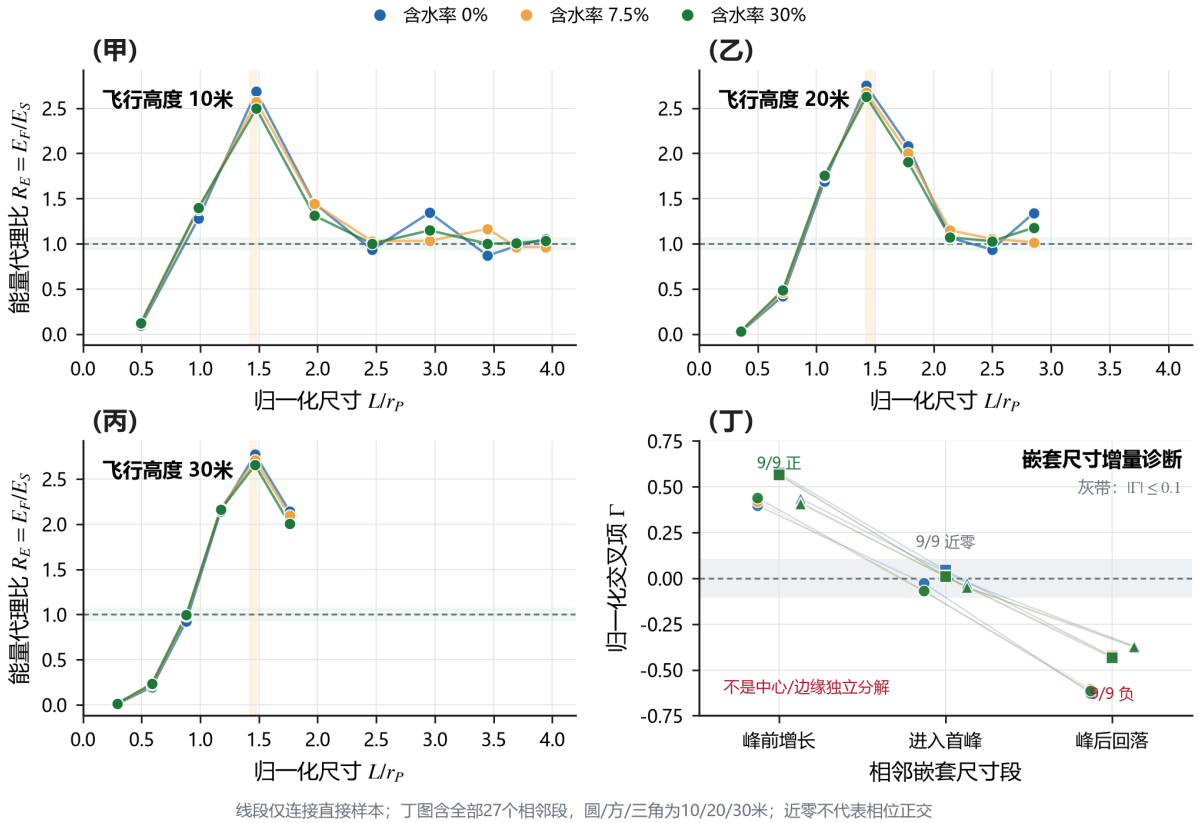


Figure 2. Finite-body-to-continuous-layer receiver-trace energy-proxy ratios and a post hoc interference diagnostic based on nested-size increments. Panels (a)~(c) show all direct samples at the three flight heights; line segments connect only adjacent sampled points and represent neither fitted curves nor interpolation at unsampled sizes. Panel (d) shows 27 adjacent-size-increment cross-term ratios Γ around the first directly sampled peak of each sequence. This is an identity-based decomposition of the whole receiver trace within the time window, rather than an independent spatial decomposition into central and edge contributions

图 2. 有限体－连续层接收道能量代理比与后验嵌套尺寸增量干涉诊断。甲－丙为三个飞行高度的全部直接样本；线段仅连接相邻已测点，不是拟合或未采样尺寸插值。丁给出围绕各序列首个直接采样峰的 27 个相邻尺寸增量交叉项比例 Γ；它是接收道时窗内的整体恒等分解，不是中心与边缘的独立空间分解

嵌套尺寸增量诊断覆盖全部 9 个高度－含水状态组合。峰前增长段、进入首峰段和峰后回落段的归一化交叉项 Γ 分别为 0.397~0.575、−0.070~0.044 和−0.626~−0.364；进入首峰段的接收道能量比为 1.23~2.10，峰后为 0.53~0.78。这些量刻画相邻整模接收道的差异。峰后积分下降必然对应负交叉项，故其符号不能独立验证相消机制；进入首峰段的近零值也不能判定空间分区的相位关系。这里的增量不是目标中心与边缘的独立空间分解。

局部拓扑检验在全域 0.05 m、紧凑域 0.05 m 和紧凑域 1/30 m 三种数值层级中都保留 $R_E(6) > R_E(4)$和 $R_E(6) > R_E(8)$，最大域变化为 6.07×10^{-4}，最大网格变化为 0.0503，最小细网格峰值裕度为 1.031。由于 $L = 4$、6、8 m 是在既有曲线被查看后选择的，这一结果支持局部数值稳定性，不构成独立发现或全曲线收敛证明。

4.2. 形状和频率约束解释但不确定唯一机制

图 3 甲－乙显示，面积相同的矩形仍给出明显不同的响应。36 m² 组在 $\theta_v = 0$ 时方形、中间矩形和长

矩形的 R_E 分别为 2.685、0.950 和 0.737，在 $\theta_v = 0.30$ 时分别为 2.495、1.056 和 0.749；六个状态－面积区块的组内差异均超过 10%。因此，面积不是充分描述量。M_S 谱矩形计算复现六个组内排序，源谱计算复现四个，但这仍不能把侧向相位/边缘敏感性与矢量指向性、有限厚度或近场耦合分开。

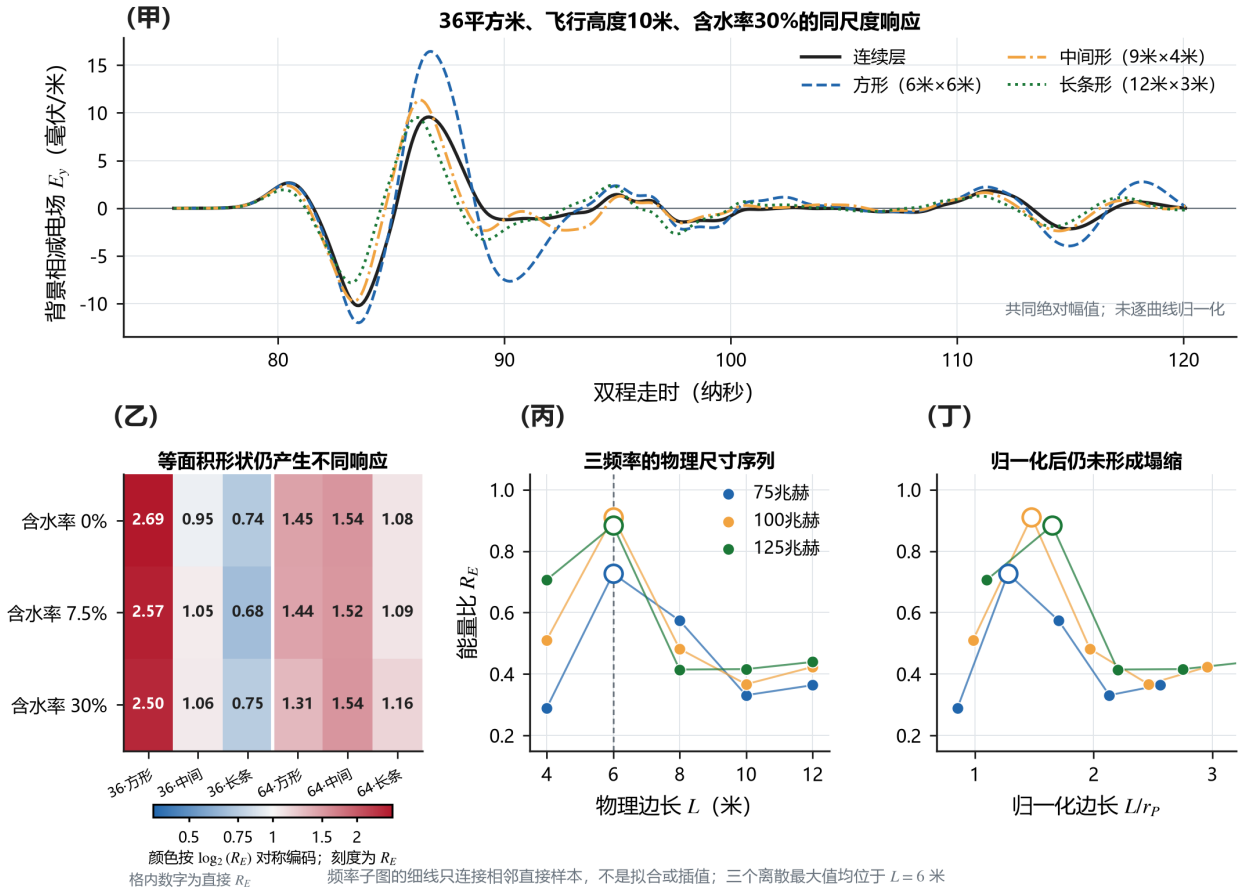


Figure 3. Shape and frequency controls. Panel (a) shows background-subtracted A-scans for the continuous layer and three finite shapes of 36 m^2 using a common absolute-amplitude scale, without normalizing individual curves. Panel (b) retains all 18 shape-water-content effects, with colors encoded symmetrically in $\log_2(R_E)$ and cell values and color-bar ticks expressed as R_E. Panels (c)~(d) use all 15 direct frequency samples, with thin lines connecting adjacent points only. All three discrete maxima occur at L = 6 m; the available data establish neither strict frequency collapse nor a peak shift

图 3. 形状与频率控制。甲以共同绝对幅值展示连续层与 36 平方米三种有限形状的背景相减 A 扫，不作逐曲线归一化；乙保留 18 个形状－含水状态效应，色彩按 $\log_2(R_E)$对称编码、格内数字和色条刻度为 R_E；丙－丁使用全部 15 个直接频率样本，细线只连接相邻点。三个离散最大值都位于 L = 6 米，现有数据未形成严格频率塌缩或峰移证据

图 3 丙－丁显示，75、100 和 125 MHz 的采样峰均在物理尺寸 L = 6 m，但归一化位置分别为 1.280、1.478 和 1.652，均落入预设[1.0, 1.9]带内，排序一致度为 0.700、0.800 和 0.700。由于三个峰落在同一粗离散物理样本上，现有数据不能区分固定物理峰与有限的归一化缩放，也不能解析严格的物理峰位移动或建立频率缩放定律。

4.3. 完整序列显示替代误差反复进出容差带

图 4 的逐样本比较显示，能量偏差在 66/69 个逐状态样本中是三项指标的最大值；其余 3 个例外均位于 h = 30 m、L = 6 m，并由振幅偏差主导，到时偏差没有成为最大项。这一结构说明接收道能量代理通常控制最坏偏差，但不能据此删除峰值振幅和到时约束；单个界面到时或峰值幅值的一致也不等于完

整反射迹线一致。

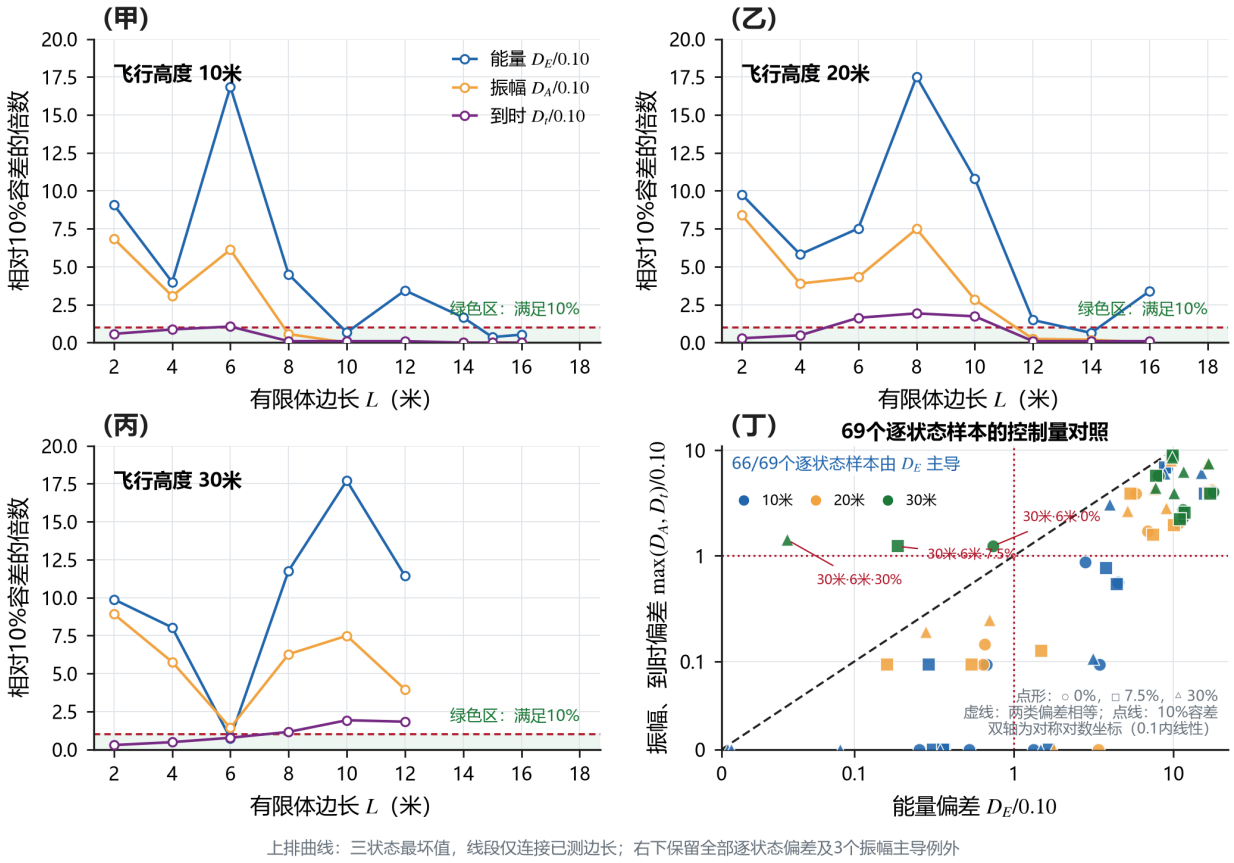


Figure 4. Comparison of the three deviation metrics on a common scale. Panels (a)~(c) express the worst-case deviations across the three water-content states at each height as multiples of the 10% tolerance; line segments connect sampled side lengths only. Panel (d) retains all 69 state-specific samples and compares energy deviation with the larger of amplitude and arrival-time deviations. Energy deviation dominates 66 of the 69 samples; the other three are amplitude-dominated samples at a height of 30 m and L = 6 m. Symmetric logarithmic scales on both axes display zeros and a wide dynamic range without excluding extreme values

图 4. 三项偏差指标的同尺度比较。甲–丙把各高度三状态最坏偏差统一换算为 10%容差的倍数，线段只连接已测边长；丁保留 69 个逐状态样本，以能量偏差对照振幅、到时中的较大者。66/69 个逐状态样本由能量偏差主导，其余 3 个例外均为 30 米高度、L = 6 米的振幅主导样本；双轴对称对数坐标用于同时显示零值与大动态范围，不裁除极值

逐状态而非汇总均值的比较，是为了避免不同飞行高度和含水状态的相反偏差相互抵消。任一单项读数低于容差并不能替代三项联合判据；控制指标随尺寸切换，也提示替代误差并非固定的单一幅值缩放。因而，图 4 先给出三项偏差的相对量级，图 5 再检验联合分类是否会随相邻离散尺寸反复改变。

图 5 甲–乙显示，10%容差下，10 m 完整离散序列在 8→10 m、10→12 m 和 14→15 m 发生相邻变类，依次为失败→通过、通过→失败和失败→通过；20 m 序列在 12→14 m 和 14→16 m 发生失败→通过与通过→失败；30 m 序列没有变类。正文保留 10 m 和 20 m 两条代表序列，以突出失败→通过→失败及再次通过的非单调过程。10 m 的 L = 15~16 m 终端通过段抵达采样上限，属于右删失，不能外推为 $L \geq 15$ m 持续通过。

4.4. 分类拓扑依赖容差并对合成扰动敏感

将容差从 10%改为 5%或 20%会改变通过点及变类位置，说明类别拓扑不是数据自身携带的唯一阈

值。15 m 高度的后验复核由 $L = 17.0$ m 失败变为 18.2 m 通过，但它是在主矩阵结果可见后增加的，只作为自适应证据单列，不并入主序列或解释为独立重复。

图 5 丙显示，确定性的 5°坡面和 0.15 m 正弦粗糙场景仍保持 L = 15 m 的三状态分类。在固定种子 2%原始迹线扰动下，两场景的全状态通过率分别为 45%和 43%；对应威尔逊 95%区间为 35.6%~54.8%和 33.7%~52.8%，30%含水状态的单状态通过率为 51%和 47%。逐种子三状态最坏偏差的经验累积分布进一步显示两场景具有相近但不相同的分布宽度和右尾。因此，确定性控制中的分类保留不等于对读数扰动稳健；这些比例是合成压力测试结果，不是测量不确定度、现场信噪比或检出概率。

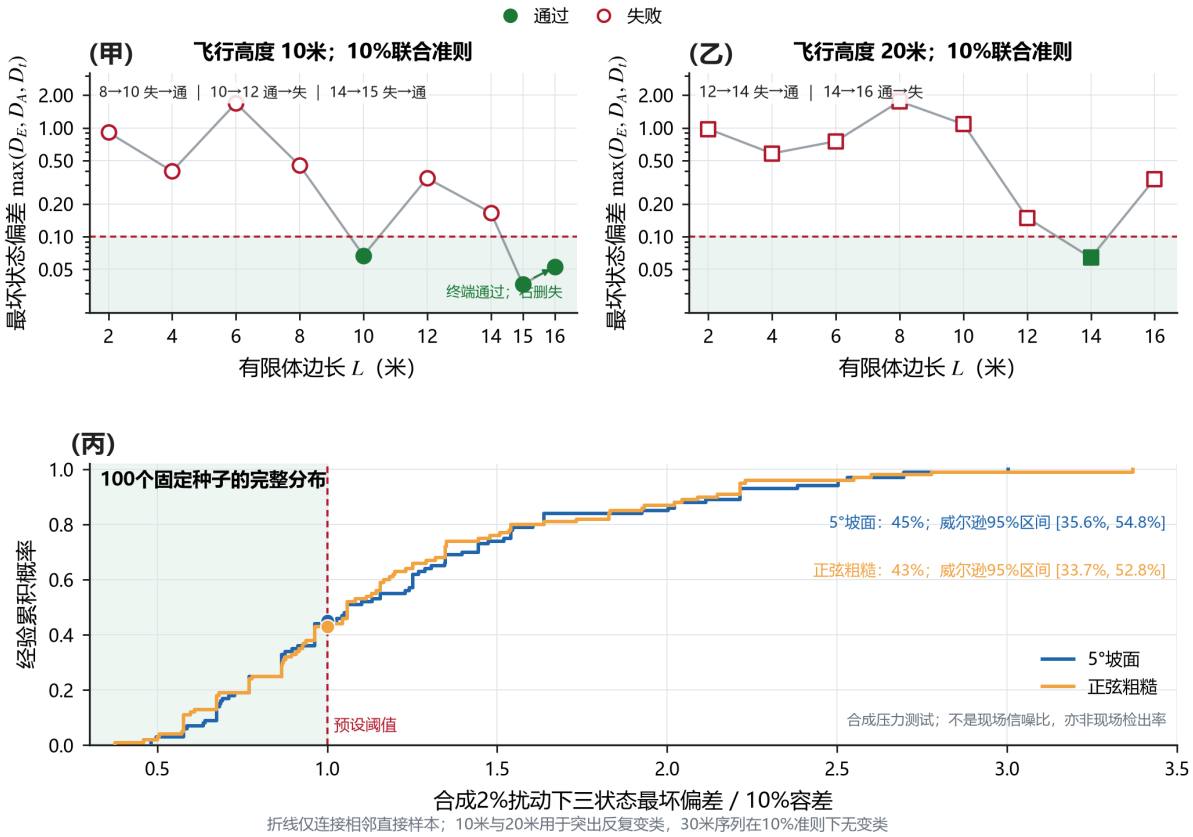


Figure 5. Representative classification sequences at a 10% tolerance and fixed-seed synthetic-stress distributions. Panels (a)~(b) show the complete directly sampled sequences at heights of 10 m and 20 m, respectively, their adjacent classification changes, and the right-censored endpoint of the 10 m sequence. Panel (c) shows empirical cumulative distributions of the worst-case deviation across the three water-content states for two synthetic scenarios using 100 fixed seeds. All points are direct samples or fixed-seed derived quantities; they provide no interpolation at unsampled sizes and represent neither field signal-to-noise ratios nor detection probabilities

图 5. 代表性 10%容差分类序列与固定种子合成压力分布。甲 - 乙分别展示 10 米和 20 米高度的完整直接样本序列、相邻变类及 10 米序列的右删失终端；丙以 100 个固定种子的经验累积分布给出两种合成场景的三状态最坏偏差。所有点均为直接样本或固定种子派生量，不对未采样尺寸插值，也不代表现场信噪比或检出概率

4.5. 波形显示峰值响应和端点形态

图 6 显示，θ_v = 0.30、h = 10 m 的 A 扫中 L = 2 m 事件较弱，L = 4 m 向观察到的 L = 6 m 采样峰上升，L = 15 m 在分析窗内接近连续层。独立 B 扫中，连续层呈平直事件，L = 4 m 呈衍射双曲线，L = 16 m 呈由边缘衍射界定的近水平中央事件。B 扫没有模拟 L = 6 m，因此只能说明空间形态随尺寸变化，不能直接证明峰值宽度的空间形态。

A 扫与 B 扫的并置不能以成像替代定量判据：前者把峰值变化限定在直接采样的时间窗内，后者只显示有限横向尺度伴随的空间事件形态。二者共同提供有限体边缘效应的相容证据，却不能反演真实含水体形状，也不能界定现场最小可检尺寸。

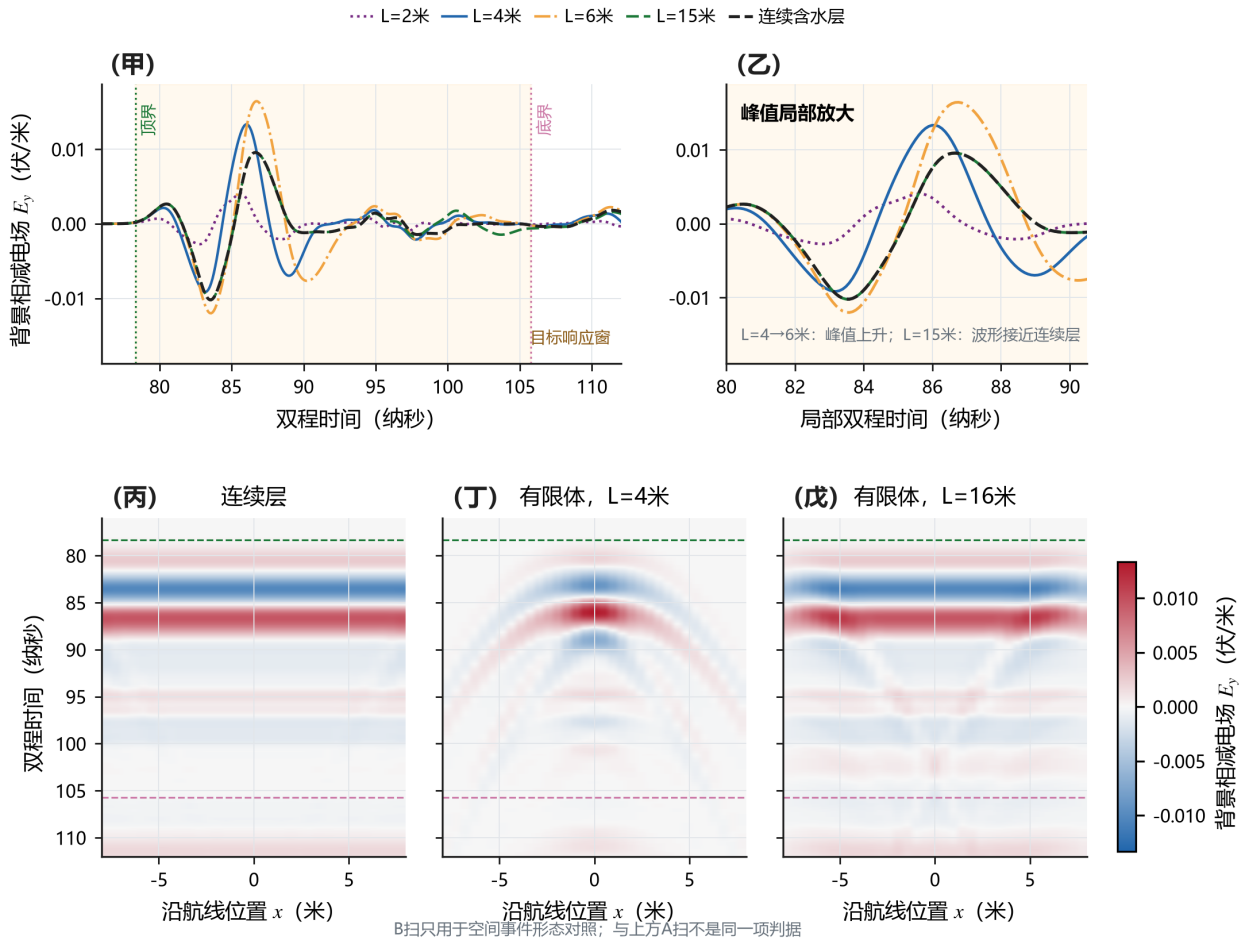


Figure 6. Background-subtracted A-scans and independently forward-modelled B-scans. Within the target-response window, the A-scans show the peak increase from L = 4 m to L = 6 m and the approach to the continuous-layer response at L = 15 m; the local enlargement allows direct comparison of this change. The B-scans distinguish only the spatial event patterns of the continuous layer, the L = 4 m finite body, and the L = 16 m finite body. The A-scans and B-scans do not constitute the same criterion

图 6. 背景相减 A 扫与独立正演 B 扫。A 扫在目标响应窗内显示 L = 4 米到 L = 6 米的峰值上升以及 L = 15 米向连续层靠近，局部放大用于直接比较这一变化；B 扫仅用于区分连续层、L = 4 米有限体和 L = 16 米有限体的空间事件形态，二者不是同一项判据

后验波形诊断显示，用于 D_A 的顶界面窗峰值在 69 个主矩阵样本中有 13 个极性不一致，其中 12/13 位于 $L \le 6$ m；目标响应窗零时滞归一化内积中位数为 0.907 (范围−0.018~0.990)；4 个 10%全状态通过位置均无极性不一致。极性差异集中于直接采样的短边长样本，与有限体边缘相位叠加图景相容；但该后验结果既不构成唯一机制证明，也不改变三指标联合分类。

5. 讨论

5.1. 单一 Fresnel 尺度与趋势相容但尚未建立

四种孔径公式都与非单调序列保持较高相关，说明经典有限孔径干涉图景在定性上相容；但源谱权

重忽略连续层传递函数，M_S 谱权重又使用模拟分母迹线，且峰位随规划坐标或分层坐标变化。四个预设峰位重叠门中三个失败，故结果不能升级为普适 Fresnel 理论。嵌套尺寸增量诊断中，首峰前 9/9 个交叉项为正，进入首峰的 9 个归一化交叉项接近零，峰后 9/9 个交叉项为负。由式(7)，当较大模型的平方场积分下降时，交叉项必为负，因此这一符号并非独立的机制验证。近零归一化交叉项也可能由增量较小或时窗内正负贡献抵消产生，不能等同于相位正交。这一后验分析量化了波形改变的积分构成，中心与边缘的独立空间贡献仍未解析。

5.2. 控制试验缩小机制范围并暴露转移风险

面积匹配结果拒绝面积唯一描述，留出频率结果只支持有限的归一化尺度相容性；长宽比细网格计算受约 19.3 GB 显存需求限制，紧凑域/网格复核只覆盖两个代表形状，频率检查也未解析严格峰移。它们共同把解释收窄到侧向相位和边缘敏感性附近，但不能排除天线指向性、有限厚度和近场耦合。5°坡面和正弦粗糙度的确定性控制保留了 L = 15 m 分类；独立 2%合成扰动试验则给出较低且区间较宽的全状态通过比例。两组证据的问题、样本空间和统计量不同，不能直接比较效应大小或据此断言哪类扰动更显著。

5.3. 工程价值在模型替代风险控制而非设计阈值

完整序列中的失败→通过→失败及再次进入容差带表明，任一相邻变类只描述给定模型、指标、容差和离散采样下的局部状态，不能解释为唯一交叉、持续通过、最小可探测尺寸、航迹容差或推荐调查宽度。当前可用的工程含义是：当工程正演以连续层代表局部含水带或有限湿润区时，应先在候选尺度、含水状态和高度上逐点检查模型替代风险，并用接收道能量代理联合峰值和到时判断迹线一致性。10%只是报告容差，不是测量不确定度估计。

5.4. 工程转移所需的外部验证

真实天线的辐射、极化、屏蔽与地面耦合会改变响应，坡度和粗糙度也会影响离地参数估计[5]-[7]。

工程转移仍需使用经验证的物理天线模型，并引入独立测量的粗糙度、坡度、长宽比、方位和层厚；随后通过尺度物理实验以及具有含水量或地质约束的现场数据检验。完成这些验证前，不应提出现场调查设计规则。

6. 结论

在本文理想化三维配对模型中，有限尺寸响应并不单调趋近连续层。接收道能量代理比的首个直接采样峰为 2.50~2.77，对应 L/r_P = 1.43~1.48；局部上升－峰值－下降顺序在针对性的域与网格检验中仍然存在。

等面积形状仍产生不同响应，说明面积不能单独决定替代误差。孔径类比与数值序列在定性上相容，但四种预设峰位检验中有三种未通过；75~125 MHz 控制也未解析严格的物理峰移。嵌套尺寸接收道增量在首峰前、进入首峰和首峰后分别呈正、近零和负交叉项，量化了整体波形变化，却不能独立识别中心与边缘的相位关系。因此，侧向相位与边缘效应仍属于与结果相容的解释，尚未确立唯一机制。

能量偏差在 66/69 个逐状态样本中为最大，另外 3 个样本由振幅偏差主导，表明联合判据仍有必要。10%容差下，10 m 和 20 m 序列分别发生三次和两次相邻变类，30 m 序列没有变类，且 10 m 终端通过段属于右删失；2%合成扰动下两个场景的全状态通过率为 45%和 43%。这些结果支持把本文方法用于审查连续层替代有限含水体的数值风险，而不能据此给出持续最小尺寸、现场检出率或调查设计阈值。

基金项目

本研究得到贵州省基础研究计划(自然科学)面上项目(黔科合基础 MS[2026]228)；贵州省高等学校本科教学内容和课程体系改革项目(GZJG2024362)；毕节市人工智能人才团队项目([2023]09)；贵州工程应用技术学“计算机与人工智能现代产业学院”项目(CY202302)资助。

参考文献

[1] Iverson, R.M. (2000) Landslide Triggering by Rain Infiltration. *Water Resources Research*, **36**, 1897-1910. https://doi.org/10.1029/2000wr900090

[2] Su, L.J., Xu, X.Q., Geng, X.Y. and Liang, S. (2017) An Integrated Geophysical Approach for Investigating Hydro-Geological Characteristics of a Debris Landslide in the Wenchuan Earthquake Area. *Engineering Geology*, **219**, 52-63. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.11.020

[3] Klotzsche, A., Jonard, F., Looms, M.C., van der Kruk, J. and Huisman, J.A. (2018) Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Decade of Progress. *Vadose Zone Journal*, **17**, 1-9. https://doi.org/10.2136/vzj2018.03.0052

[4] Noviello, C., Gennarelli, G., Esposito, G., Ludeno, G., Fasano, G., Capozzoli, L., *et al*. (2022) An Overview on Down-Looking UAV-Based GPR Systems. *Remote Sensing*, **14**, Article 3245. https://doi.org/10.3390/rs14143245

[5] Edemsky, D., Popov, A., Prokopovich, I. and Garbatsevich, V. (2021) Airborne Ground Penetrating Radar, Field Test. *Remote Sensing*, **13**, Article 667. https://doi.org/10.3390/rs13040667

[6] Fu, L., Liu, S., Liu, L. and Lei, L. (2014) Development of an Airborne Ground Penetrating Radar System: Antenna Design, Laboratory Experiment, and Numerical Simulation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **7**, 761-766. https://doi.org/10.1109/jstars.2014.2303073

[7] Cheng, Q., Cheng, Y., Ma, Z., Binley, A., Liu, J., Zhang, Z., Huang, F., *et al*. (2025) Combined Measurement of Soil Permittivity and Electrical Conductivity Using UAV-Based Ground Penetrating Radar. *Water Resources Research*, **61**, e2024WR039519. https://doi.org/10.1029/2024wr039519

[8] Aziz, I., Soltanaghai, E., Watts, A. and Alipour, M. (2024) Bayesian Inversion of GPR Waveforms for Sub-Surface Material Characterization: An Uncertainty-Aware Retrieval of Soil Moisture and Overlaying Biomass Properties. *Remote Sensing of Environment*, **313**, Article ID: 114351. https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114351

[9] Warren, C., Giannopoulos, A. and Giannakis, I. (2016) GprMax: Open Source Software to Simulate Electromagnetic Wave Propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, **209**, 163-170. https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.020

[10] Warren, C., Giannopoulos, A., Gray, A., Giannakis, I., Patterson, A., Wetter, L., *et al*. (2019) A Cuda-Based GPU Engine for GprMax: Open Source FDTD Electromagnetic Simulation Software. *Computer Physics Communications*, **237**, 208-218. https://doi.org/10.1016/j.cpc.2018.11.007

[11] Koyan, P. and Tronicke, J. (2020) 3D Modeling of Ground-Penetrating Radar Data across a Realistic Sedimentary Model. *Computers & Geosciences*, **137**, Article ID: 104422. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104422

[12] Mao, L., Wang, X., Chi, Y., Pang, S., Wang, X. and Huang, Q. (2025) A Three-Dimensional FDTD(2,4) Subgridding Algorithm for the Airborne Ground-Penetrating Radar Detection of Landslide Models. *Remote Sensing*, **17**, Article 1107. https://doi.org/10.3390/rs17061107

[13] Chi, Y., Pang, S., Mao, L., Zhou, Q. and Chi, Y. (2024) Research on Airborne Ground-Penetrating Radar Imaging Technology in Complex Terrain. *Remote Sensing*, **16**, Article 4174. https://doi.org/10.3390/rs16224174

[14] Shakas, A. and Linde, N. (2017) Apparent Apertures from Ground Penetrating Radar Data and Their Relation to Heterogeneous Aperture Fields. *Geophysical Journal International*, **209**, 1418-1430. https://doi.org/10.1093/gji/ggx100

[15] Johnson, T.C., Routh, P.S. and Knoll, M.D. (2005) Fresnel Volume Georadar Attenuation-Difference Tomography. *Geophysical Journal International*, **162**, 9-24. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2005.02658.x

[16] Belli, K., Zhan, H., Wadia-Fascetti, S. and Rappaport, C. (2009) Comparison of the Accuracy of 2D vs. 3D FDTD Air-Coupled GPR Modeling of Bridge Deck Deterioration. *Research in Nondestructive Evaluation*, **20**, 94-115. https://doi.org/10.1080/09349840802610147

[17] Delf, R., Giannopoulos, A., Bingham, R.G., Hulton, N.R.J. and Curtis, A. (2017) A Sliced-3D FDTD Approach as an Alternative to 2D Ground Penetrating Radar Modelling. 2017 9*th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar* (*IWAGPR*), Edinburgh, 28-30 June 2017, 1-5. https://doi.org/10.1109/iwagpr.2017.7996038

[18] Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980) Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements

in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research*, **16**, 574-582. https://doi.org/10.1029/wr016i003p00574

[19] Harris, F.J. (1978) On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. *Proceedings of the IEEE*, **66**, 51-83. https://doi.org/10.1109/proc.1978.10837

[20] Giannopoulos, A. (2005) Modelling Ground Penetrating Radar by GprMax. *Construction and Building Materials*, **19**, 755-762. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.007