Stochastic Finite-Fault Method Considering Near-Field Ground Motion Directivity Effects

Dongdong Yuan[1], Xue-Liang Chen[1,*]

[1] *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

[*] *Corresponding author. Email: chenxueliang007@126.com*

Abstract

Rapid and accurate estimation of strong ground motions is critical for earthquake disaster response and engineering purposes. The stochastic finite-fault method based on dynamic corner frequency, proposed by Motazedian and Atkinson, has been proven to be a comprehensible and effective approach for generating high-frequency strong ground motion. To facilitate the adaptation of this method in software and engineering practice, we employ GMS2.0 as an enhanced program for simulating stochastic finite-fault ground motion. A key advantage of GMS2.0 is its incorporation of updated models for corner frequency and source duration, which enhances the theoretical consistency of the source model. It also provides users with greater flexibility in defining input parameters, including rupture scaling relations, baseline correction techniques, and crustal amplification models. In this study, the impact of rupture velocity is considered, introducing a relationship between corner frequency and rupture velocity. Furthermore, addressing size effects and propagation directionality of near-fault rupture in the current stochastic finite-fault method, a directionality coefficient, Drup, is proposed. The improved method is applied to simulate near-field strong motions within a 150 km range of the 2012 Ninglang MW5.5 earthquake. Our method demonstrates robust performance over a broad period range, particularly between 0.04 and 4 seconds. This improvement effectively accounts for the impact of rupture propagation direction, providing a more realistic estimation of ground motions for earthquake disaster mitigation.

Keywords:*Strong Earthquake Simulation, Random Finite Fault Method, Near-field Vibration Amplification, 2012 Ninglang Earthquake*

考虑近场地震动方向性效应的随机有限断层法

袁冬冬[1]，陈学良[1,*]

[1] *中国地震局地球物理研究所，北京 100081*

[*] *陈学良.chenxueliang007@126.com*

摘要

快速、准确地估计强地震动对地震灾害反应和工程目的具有重要意义。由 Motazedian 和 Atkinson 提出的基于动态角频率的随机有限断层方法被证明是一种可理解的、有效的高频强地震动生成方法。为了便于对程序进行改写以及在工程实践中使用，本文采用 GMS2.0 作为实现随机有限断层地震动模拟的增强型软件程序。(GMS2.0 的一个关键优势是纳入了拐角频率和源持续时间的更新模型，使源模型在理论上更加一致。并且用户可以更加灵活方便地定义输入参数，包括破裂尺度关系、基线校正技术和地壳放大模型等参数。)。文中考虑破裂速度的影响，引入了角频与破裂速度之间的关系。并且针对目前的随机有限断层法在近断层处断层的尺寸效应和传播的方向性，提出了一个与方向性相关的系数 D_{rup}。应用改进的方法模拟了 2012 年宁蒗 M_W5.5 级地震破裂 150 km 范围内的近场强运动。我们改进的方法在

© The Author(s) 2025

S. Qiao et al. (eds.), *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2024)*, Advances in Economics, Business and Management Research 367,
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-946-9_19

模拟了 2012 年宁蒗 M_W5.5 级地震破裂 150 km 范围内的近场强运动。我们改进的方法在较宽的周期范围内表现良好，特别是在 0.04-4 s。改进后的方法可以有效地考虑破裂传播方向的影响，为地震减灾提供更真实的地震动估计。

关键字：*强地震动模拟, 随机有限断层法，近场地震动放大，2012 年宁蒗地震*

1. 引言

地震地面运动的估计对于地震设计、分析、风险缓解和灾害管理等都有着重要的意义[1]。对于地震地面运动数据匮乏的地区，地震地面运动的模拟尤为重要，特别是对于需要完整地面运动记录的地震工程应用。地面运动模拟是生成各种科学和工程应用的合成加速度图的可靠方法。高性能计算的最新进展使得混合宽带地震动模拟方法（结合低频（<1 Hz）的基于物理的确定性模拟和高频（≥1 Hz）的随机模拟）在地震危害评估中更为普遍[2]。由于改进了震源特性和波传播方法，该方法可以获得更准确的地震动估计。然而，纯随机地震动模拟在估计地震动水平方面仍然发挥着重要作用，特别是在低到中等地震活动性地区，强地震动数据往往是稀缺的。

随机地震动模拟方法的基本原理是基于带限高斯白噪声和确定性地震学模型的结合[3]。地震学模型用于定义傅立叶振幅谱（FAS），通常分为震源分量、路径分量和站点分量。基于源模型，确定了随机点源模型和随机有限断层模型两种不同类型的随机地震动模拟，开发了 SMSIM 和 EXSIM 软件，分别实现了随机点源仿真和有限故障源仿真。这两个软件程序在世界范围内广泛用于生成不同应用的合成加速度图[3-4]。相对于 SMSIM，EXSIM 的优势在于能够考虑震源的几何特性和指向性效应，从而能够更准确地模拟近距离大地震的地震动幅值。

然而，使用目前 EXSIM 仍然存在一些基本问题，首先，EXSIM 中使用的转角频率模型不是滑移相关的，因此忽略了破裂速度对转角频率的影响[5]。其次，在近场区域，EXSIM 模拟的 PGA 比观测值小得多，这可能与断层的尺寸效应和传播的方向性效应有关。对于故障距离小于 20 km 的台站，模拟 PGA 与观测 PGA 存在明显差异[6]。第三，目前的 EXSIM 是用 Fortran 语言编写的，由于难以跟踪程序的执行过程和修改程序中包含的函数，因此不便于在工程实践中使用[7]。基于上述背景，本文采用 Tang 使用 MATLAB 编写的地面运动模拟系统(GMS2.0)，用于实现随机有限断层地面运动模拟。与目前分布的 EXSIM 相比，GMS2.0 在几个方面都有优势：

(1) GMS2.0 提供了拐角频率和震源持续时间（也称为上升时间）的两种不同模型，其中一种模型依赖于破裂速度[5]；

(2) GMS2.0 在不同目标区域采用了 4 种不同的断层大小标度关系；

(3) GMS2.0 提供了 5 种主要用于基线校正的时间序列处理方法，包括滤波法和经验分段法；

(4) GMS2.0 纳入了两种构造横波速度剖面的模型，可用于计算随频率变化的地壳放大因子[8]；

GMS2.0 利用 MATLAB 进行编写，方便后续使用者对程序进行改写以及追踪程序运行中的函数。且通过 MATLAB 自带的并行计算工具箱，显著提高了计算速度

2. 方法

模拟强地震动场对确定地震灾害范围和强度具有重要意义。GMS2.0 已被证明是模拟近场强地面运动最重要的工具，下面将介绍 GMS2.0 的工作原理。

2.1. GMS2.0 原理

能与断层的尺寸效应和传播的方向性效应有关。对于故障距离小于 20 km 的台站，模拟 PGA 与观测 PGA 存在明显差异[6]。第三，目前的 EXSIM 是用 Fortran 语言编写的，由于难以跟踪程序的执行过程和修改程序中包含的函数，因此不便于在工程实践中使用[7]。基于上述背景，本文采用 Tang 使用 MATLAB 编写的地面运动模拟系统(GMS2.0)，用于实现随机有限断层地面运动模拟。与目前分布的 EXSIM 相比，GMS2.0 在几个方面都有优势：

(1) GMS2.0 提供了拐角频率和震源持续时间（也称为上升时间）的两种不同模型，其中一种模型依赖于破裂速度[5]；

(2) GMS2.0 在不同目标区域采用了 4 种不同的断层大小标度关系；

(3) GMS2.0 提供了 5 种主要用于基线校正的时间序列处理方法，包括滤波法和经验分段法；

(4) GMS2.0 纳入了两种构造横波速度剖面的模型，可用于计算随频率变化的地壳放大因子[8]；

GMS2.0 利用 MATLAB 进行编写，方便后续使用者对程序进行改写以及追踪程序运行中的函数。且通过 MATLAB 自带的并行计算工具箱，显著提高了计算速度

2. 方法

模拟强地震动场对确定地震灾害范围和强度具有重要意义。GMS2.0 已被证明是模拟近场强地面运动最重要的工具，下面将介绍 GMS2.0 的工作原理。

2.1. GMS2.0 原理

根据有限故障仿真的基本思想，将子故障加速度的傅立叶振幅谱(FAS)表示为：

$$FA(M_{0ij},R_{ij},f)=E(M_{0ij},f)\times G(R_{ij})\times Ae(R_{ij},f)\times Am(f)\times An(f) \quad (1)$$

式中 FAij 为第 i 个次断层加速度的 FAS；E(M0ij, f)是震源谱模型；G(Rij)表示距离 Rij 处的几何扩展模型；Aeij 为全径非弹性衰减模型；Am 和 Ae 分别为上地壳放大系数和衰减系数。各组分的详细表达式如式(2)至式(8)所示。

震源谱模型表示为：

$$E_{ij}=(2\pi f)^2\frac{CM_{0ij}}{1+(1+f/f_{0ij})^2}S_{ij} \quad (2)$$

式中 f 为频率，C 为中地壳比例因子；M_{0ij}、f_{0ij}、S_{ij} 分别为第 i j 次断层的地震矩、角频率和标度因子。

在式(2)中，C 被表示为：

$$C=\frac{R_pFV}{4\pi\rho_0\beta_0^3R_0} \quad (3)$$

式中 R_0 = 1 km；R_p 为辐射方向图因子(0.55)；F 为自由表面放大系数(2.0)，严格来说 2.0 的值只对横波有效；V 表示横波总能量分成两个水平分量的分配因子($1/\sqrt{2}$)；ρ_0 和β_0分别为震源附近的密度和横波速度，单位为 g/cm^3 和 km/s。

在式(2)中，M_{0ij} 使用式(4)确定：

$$M_{0ij}=\frac{M_0W_{ij}}{\sum_{l=1}^{nl}\sum_{l=1}^{nl}W_{lw}} \quad (4)$$

式中，M_0 为地震总震级；W_{ij} 为第 i j 次断层相对滑动量；n_l 和 n_w 分别为有限断层沿走向和倾向的次断层数目。

在式(2)中，f_{0ij} 使用式(5)确定：

$$f_{0ij}=4.9\times10^6\,\beta_0\left(\frac{\Delta\sigma}{p\times M_0}\right)^{1/3} \quad (5a)$$

$$f_{0ij}=4.9\times10^6\,yz\beta_0\left(\frac{\Delta\sigma}{p\times M_0}\right)^{1/3} \quad (5b)$$

式(5a)是与破裂速度无关的角频模型，目前 EXSIM 采用的该模型计算，式(5b)是与破裂速度相关的角频模型；式(5b)中的 y 为破裂速度(V_{rup})与震源横波速度(β_0)之比，z 为定义高频辐射强度的参数。式(5a)和式(5b)中，p 是定义脉冲百分比的参数，由式(6)确定：

$$p=\begin{cases}N_R/N, & N_R<\mathrm{N}\times pp\\ pp, & N_R\geq\mathrm{N}\times pp\end{cases} \quad (6)$$

其中，N_R 为脉冲子断层的累积数量，由一个参数决定，该参数给出了总破裂面积(pp)的百分比，N 为子断层的总数。

式(2)中，S_{ij} 为 Boore[9]引入的比例因子；用于消除次断层大小对低频谱幅值的非相干求和影响，计算公式为：

$$S_{ij}=CP_{ij}\frac{1+(f/f_{0ij})^2}{1+(f/f_{0eff\,ij})^2} \quad (7)$$

式中：$CS_{ij}=\sqrt{N}/H_{ij}$；$f_{0effij}=f_{0ij}/\sqrt{CS_{ij}}$。

上式中 H_{ij} 是用于消除高频下断层大小对傅里叶振幅影响的比例因子。基于加速度（而非速度）的更新 H_{ij} 由式（8）表示：

$$Hij=\sqrt{\frac{N\sum\left[\frac{f^2}{1+(\frac{f}{f_0})^2}\right]^2}{\sum\left[\frac{f^2}{1+(\frac{f}{f_{0ij}})^2}\right]^2}} \quad (8)$$

破裂从震源处开始，呈放射状延伸。随机有限断层法有助于模拟每个子断层的加速度时程，将所有加速度时程在时域上相加可得到整个断层的模拟，，计算见式(9)：

$$A(t)=\sum_{i=1}^{nl}\sum_{j=1}^{nw}H_{ij}\times a_{ij}(t+\Delta t_{ij}+\Delta T_{ij}) \quad (9)$$

式中，$A(t)$为某场点地震信号的总时间序列；Hij 是用于消除高频下断层大小对傅里叶振幅影响的比例因子；$a_{ij}(t)$为第 ij 次断层的信号，由式(1)中 FA_{ij} 的傅里叶反变换得到；Δt_{ij} 为沿路径第 ij 次断层的延迟时间；ΔT 为第 ij 个子源的延迟时间，与子断层的持续时间（T_{oij}）成正比。

2.2. GMS2.0 中近场处地震动的方向性效应优化

近年来多次破坏性地震中均观测到地震动的方向性效应对近场处的地震动空间 Benioff[10]认为这一现象与地震动辐射能量

随方位角的变化有关，而这一变化就是由震源破裂传播的方性引起的，同时将上述现象称之为“地震多普勒效应”。尤其是对于故障距离小于 25 km 的台站，模拟 PGA 与观测 PGA 存在明显差异。为了消除震源破裂方向性效应的影响，本研究将方向性系数 D_{rup}[11-12]加入 GMS2.0 程序中，优化模拟结果。D_{rup} 计算见式(10)

$$D_{rup}=\frac{k^2}{\sqrt{\left[1-\frac{v_{rup}}{\beta}\cos(\varphi)\right]^2}}+\frac{(1-k)^2}{\left[1+\frac{v_{rup}}{\beta}\cos(\varphi)\right]^2} \tag{10}$$

式中：v_{rup} 为破裂速度，v_{rup} 为剪切波速，φ为破裂方向与台站方位角的夹角；k 表示初始破裂点的相对位置。

方向性系数 D_{rup} 与破裂方向和方位角之间的夹角关系如图(1)所示，考虑到非对称双侧破裂的情况，这里 k 值取 0.65。若为单侧破裂则 k 值取 1。由图可知在破裂传播的正方向上的值最大，为 2.013，在垂直于破裂方向时，D_{rup} 最低，为 0.7023。

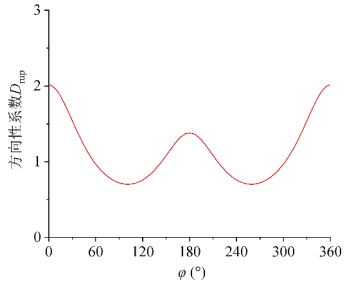

图 1 方向性系数 D_{rup} 随夹角φ的变化分布

3. 宁蒗地震强地震动模拟及验证

北京时间 2012 年 6 月 24 日 15 时 59 分 35.6 秒，云南省丽江市宁蒗彝族自治县与四川省凉山彝族自治州盐源县交界（27.7°N，100.7°E）发生 5.7 级地震，震源深度 11 km。为了验证本文提出的改进的随机有限断层法模型，本文对宁蒗地区进行地震动模拟。并比较了改进后的基于 GMS2.0 程序的随机有限断层法的加速度时程曲线以及 PSAs。所有模拟的输入参数列在表 1 中。台站位置信息见图 2。

表 1 宁蒗地震模拟的建模参数

模拟参数	参数值
断层走向，倾角	328°、44°
断层长度，宽度(km)	27、10
次断层长度，宽度(km)	3、2
断层上缘深度(km)	4
品质因子	$294f^{0.489}$
几何扩散	$D_{rup}\times 1/R$ (R ≤25 km) 1/R (25 km＜R ≤40 km) $R^{-1.3}$ (40< R ≤ 70) $R^{-0.5}$ (70< R)
地壳密度 g/cm^3	2.8
脉冲比例	0.5
破裂速度/横波速度	0.8
窗函数	Saragoni-Hart
路径持续时间	0.00 (0 < R ≤ 10) 0.16 × R (10 < R ≤ 70） 9.6-0.03*(R-70) (70 < R <= 130)
土层放大	由加速度幅值谱的平均 H/V 计算给出
地壳放大	基于喻畑川滇地区模型基岩部分经 1 /4 波长法
k_0	0.04

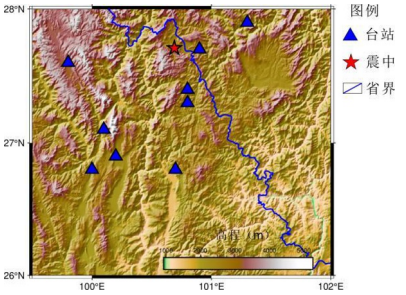

图 2 台站位置信息

根据上述模拟参数，对所选取的 9 个台站进行地震动模拟，这里仅对近断层处的 51YYL 台站进行 PGA，响应谱，傅里叶谱及加速度时程曲线进行分析。从图 3 和图 4 模拟结果可以明显看出，台站的模拟加速度时间序列在反应谱、持续时间等主要特征上与观测记录吻合。经过修订后的程序可以更好的模拟近断层处的地震动反应，为地震减灾提供更真实的地震动估计。图 4 是 PGA 分布图，其展布方向与断层走向相近，在靠近震中区域，PGA 等值线分布近似椭圆形，呈轴对称展开。具有较强的规律性。中心靠近宏观震中，最大值超过 146 Gal，震中附近变化剧烈，表现为等值线密集，震中距 60 km 以外，PGA 减小到 20 Gal 以下。

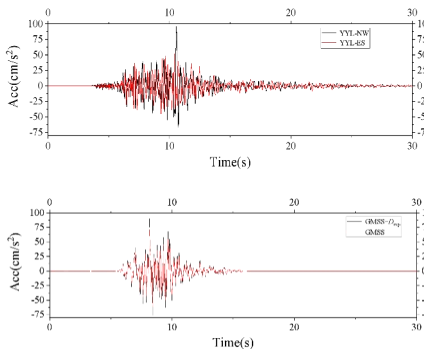

图 3 水平向强震记录与模拟地震动加速度时程曲线

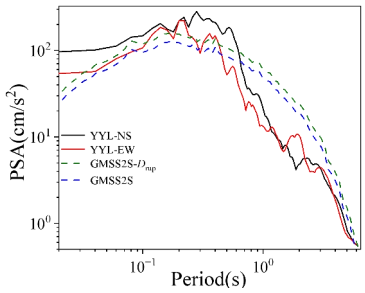

图 4 强震台站的模拟和实际加速度反应谱

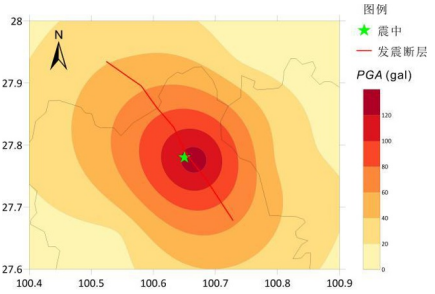

图 5 模拟地震动的 PGA 空间分布图

4. 结论

随机有限断层法是预测强地面运动的有效手段，在世界很多地区潜在地震的危害预测中取得了很好的成功。为了使得随机有限断层法适用于强地面运动重建，本文基于随机有限断层法模拟了宁蒗 5.5 级地震的强地震动，通过与实际强震记录校核，重建了强地面运动场，并与实际地震烈度图进行对比分析，主要结论如下：

1.GMS2.0 程序可以很好的实现随机有限断层地面运动模拟，在各类条件下的地面运动模拟方面表现非常出色。

2.本文考虑破裂速度的影响，引入了角频与破裂速度之间的关系。并且针对目前的随机有限断层法在近断层处断层的尺寸效应和传播的方向性，提出了一个与方向性相关的系数 Drup，很好的解决的近断层处随机有限断层法的误差。

3.使用改进的 GMS2.0 对宁蒗 5.7 级地震进行模拟，模拟了宁蒗地震强地面运动场，是呈现对称分布。

参考文献

[1] Can G, Askan A, Karimzadeh S. An assessment of the 3 February 2002 Cay (Turkey) earthquake (Mw = 6.6)：modeling of ground motions and felt intensity distribution. Soil Dynam Earthq Eng 2021;150:106832.

[2] Olsen, K. B., and R. Takedatsu (2015). The SDSU broadband ground motion generation module BBtoolbox version 1.5. Seismol. Res. Lett. 86, no. 1, 81–88.

[3] Atkinson, G. M., and D. M. Boore (1995). Ground-motion relations for eastern North America, Bull. Seismol. Soc. Am. 85, no. 1, 17–30.

[4] Motazedian, D., and G. M. Atkinson (2005). Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency, Bull. Seismol. Soc. Am. 95, no. 3, 995–1010.

[5] Tang, Y. (2022). An updated corner-frequency model for stochastic finite-fault ground motion simulation, Bull. Seismol. Soc. Am. doi: 10.1785/0120210205.

[6] Dang P, Liu Q. Stochastic finite-fault ground motion simulation for the M w 6.7 earthquake in Lushan, China[J]. Natural Hazards, 2020, 100: 1215-1241.

[7] Tang Y. GMSS2. 0: An Enhanced Software Program for Stochastic Finite-Fault Ground-Motion Simulation[J]. Seismological Research Letters, 2022, 93(3): 1868-1879.

[8] Tang Y, Xiang X, Sun J, et al. A generic shear wave velocity profiling model for use in ground motion simulation[J]. Geosciences, 2020, 10(10): 408.

[9] Boore D M. Comparing stochastic point-source and finite-source ground-motion simulations: SMSIM and EXSIM[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(6): 3202-3216.

[10] Benioff H. Mechanism and strain characteristics of the White Wolf fault as indicated by the aftershock sequence[J]. Calif. Div. Mines Bull, 1955, 171: 199-202.

[11] 姜永正，王宏伟，任叶飞等。2016 年 8 月 24 日意大利 *Mw* 6.2 地震近场地震动方向性效应[J].地震学报, 2017, 39(1): 11. DOI:10.11939/jass. 2017. 01. 011.

Jiang Y Z, Wang H W, Ren Y F, et al. Directional effect of near-site Motion of the Mw 6.2 earthquake in Italy on August 24, 2016 [J]. Acta Seismologica Sinica, 2017, 39(1): 11. DOI:10.11939/ jass.2017.01.011.

[12] Seekins L C, Boatwright J. Rupture directivity of moderate earthquakes in northern California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(3): 1107-1119.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.