

# 复杂电磁环境仿真建模及 态势显示研究

## 结题报告书



北京邮电大学电磁环境测试评估实验室

二零一三年九月二十六日

# 目录

摘要	1
ABSTRACT	2
引言	4
第一章 复杂电磁环境仿真系统整体介绍	6
1.1 传统的传播模型	6
1.2 系统的整体架构	8
第二章 仿真系统的计算内核实现	12
2.1 射线追踪法理论	12
2.1.1 理论基础	12
2.1.2 计算公式推导	13
2.2 对射线追踪法的优化改进	19
2.3 计算模块的程序流程	22
2.3.1 程序框架图	22
2.3.2 射线跟踪算法流程图	23
2.3.3 发射反射和绕射射线的流程图	24
2.3.4 整合程序流程图	24
2.3.5 射线路径信息的存储	25
第三章 仿真系统的并行控制	27
3.1 射线追踪算法的并行性	27
3.2 并行系统的实现方式	29
3.2.1 对等模式	29
3.2.2 主从模式	30
3.3 主控对任务的拆分	33
3.4 主控和数据库的交互	36
3.5 计算节点和主控的交互	37
3.6 计算机间的数据传输	38
第四章 数据库的设计	41
4.1 数据库物理模型设计	41
4.2 数据库表设计	42
4.2.1 具体表设计	43
4.2.2 表之间的关联设计	46
4.3 存储过程设计	46
4.4 数据库性能分析	48
第五章 仿真实例分析	50
5.1 仿真建模	50
5.2 仿真参数设置	51
5.2.1 辐射源参数设置	51
5.2.2 观察区域参数设置	51
5.3 仿真结果显示与分析	52
5.3.1 仿真结果显示	52
5.3.2 场强结果对比图	53

5.3.3 仿真误差原因分析.....	53
结论 .....	54
参考文献.....	55

## 摘要

基于几何光学和一致性绕射理论的三维射线跟踪算法是电波传播预测中最有效的方法之一。但是这种算法在实现时,由于从辐射源发出的射线很多,跟踪全部的射线耗时较长,特别是在地形较为复杂,辐射源数量繁多的情况下,时间复杂度将呈爆炸性增长,无法应用于实践。

本系统通过分析影响射线追踪法计算效率的因素,提出一种射线追踪加速算法。该算法通过对地形分区有效减少了射线需要处理的地形面的数目和求交点运算次数以达到提高计算效率的目标,结果表明计算效率平均提高 16 倍。通过对射线追踪过程中场强计算公式的研究,每个辐射源的射线追踪过程相互独立,研究区域的总场强是由各个辐射源在该区域共同作用产生的,可由各个辐射源在该区域产生的场强按照矢量法则合成而得到。因此,在射线追踪过程中的场强计算可以按辐射源个数分解为多个独立的计算过程,为射线追踪的并行计算提供了理论依据。

该系统是一种多用户的分布式系统,基于 C/S 架构,将复杂的计算任务放在云服务器上完成,用户只需安装一个简单的客户端便可随时随地访问服务。使用具有  $N$  个计算节点的云服务器对  $M$  个任务进行计算时,它所耗费的时间是现有仿真系统的  $1/N$ ,计算速度随着计算用户和计算节点的增多而增大。本系统在服务器上建立了辐射源数据库和地形数据库,用户只需选择浏览便可以加载相应的辐射源和地形。

**关键词:** 射线追踪 数据库 加速算法 并行计算 分布式系统

## ABSTRACT

Based on the theory of Geometrical Optics and Uniform Theory of Diffraction, 3D ray tracing algorithm is one of the most effective methods in radio wave propagation prediction. However, a lot of rays emit from the radiation source, and tracking all the rays takes long time, especially in the case of complex terrain and vast amount of radiation sources. In this situation, the time complexity will grow extremely and the algorithm could not be applied in practice.

An accelerated algorithm is proposed in the system. This algorithm reduces the number of terrain facets which are needed to deal with and the number of intersection calculation through terrain division and the result demonstrates that the efficiency has been improved by a factor of 16. Based on the research of field strength formulas, we find that ray tracing process of each radiation source is independent, and total field strength of the study area is generated by the combination of each radiation source. Therefore, the field strength calculation can be divided into multiple independent calculation process, which provides a theoretical basis for the ray tracing parallel computing.

The system is a multi-user distributed system based on C / S architecture, the complex computing tasks are completed on the cloud server, and users are allowed to call for services after installing a simple

client anytime and anywhere. Computing  $M$  tasks using the cloud server with  $N$  compute node, the time-consuming is  $1/N$  of the existing simulation systems, and the computing speed increases with the increase of computing users and compute nodes. In order to facilitate centralized management and maintenance of data, the system created radiation source database and terrain database on the server, and the user can load the appropriate radiation source and terrain by browsing the database.

**KEY WORDS:** Ray Tracing, Database, Accelerated algorithm, Parallel Computing, Distributed System

# 引言

当今世界，随着信息和电子技术的飞速发展，作为“第五维战场”的复杂电磁环境，已成为制约未来战争胜负的重要“引擎”。世界军事强国为了抢占未来战争制高点，无不重视复杂电磁环境的搭建、模拟及演习。大量的电子信息装备使得战场空间中的电磁信号非常密集，形成了极为复杂的电磁环境。它不仅仅会直接影响电子武器装备的战斗效能的发挥和在战场上的生存能力，而且增强了战场感知的难度、制约了指挥控制的效率、增加了作战保障的难度，从而直接影响了战争的胜负。因此，武器装备所处电磁环境的基础研究成为目前军事领域的热点课题。为构建真实的电磁环境，美军先后开发了“信息网络”、“仿真模拟”、“导控检测”三大技术平台，全面模拟信息作战的电磁环境。在我国，为了与国际先进水平齐头并进，很有必要进行军事电磁环境的模拟及空间电磁场分布的实时显示。目前，虽然我们的军事部门能够构造一定的电磁环境并在该环境下进行实战演习，研究所和高校对复杂电磁环境如舰船、装甲车等周围电磁场分布也进行了一些仿真，但充分考虑地理环境的系统仿真模型及动态显示系统仍属空白。

另外，目前的复杂电磁环境仿真面临着许多问题，其中由于仿真环境的复杂性导致的实时仿真耗时长、速度慢的问题最受人关注。为此有很多解决方案：多核高性能计算机对计算效率有很大提升，但花费较高；基于 **MPI** 搭建的并行计算机群同样对计算性能有很大的提升；近年来，**GPU** 技术运用于计算电磁学正日趋成熟，但仍然处于研究阶段，有很多问题需要解决。以上所述方案，均有一个共同的问题，均是基于仿真模型的算法分解，且没有为用户提供良好的编程接口与并行任务的管理功能。通过与二炮等单位的多次探讨，此类问题是亟待解决的实际问题。

众所周知，无线技术作为现代信息技术的一个重要组成部分，成为影响人类社会发展的关键性力量，无线技术的开发利用日益走向社会化、产业化，从军用走向民用。这种变化不仅迅速改变着人类社会的各种活动和社会运行机制，而且还贯穿于各种社会职业活动之中。

在一定的空间范围内，存在着形形色色的无线电子设备，它们的发射功率各不相同，并且各自占有一定的带宽，不同设备辐射的电磁波交织在一起，形成了一个非常复杂恶劣的电磁环境。如何使同处于这样一个电磁环境下的电子设备能正常工作而且又互不干扰，需要解决很多电磁兼容性问题，其中很重要的一项就是对系统所处的电磁环境进行预测和分析，在形成电磁环境的诸多因素中，辐射源是至关重要的因素，它的相关技术参数直接影响辐射的电波的强弱以及带宽等因素。

本课题拟从电磁兼容角度,综合分析军事场景中的多种电磁发射源,建立复杂电磁环境的仿真系统及模型,并实现可视化界面显示,得到多种发射源在实际环境中产生的电磁环境电子地图。另外,本课题提出了一种基于文件分割的复杂电磁环境仿真并行计算系统,在现有的电磁仿真系统中有着低成本,高效率的优点,该系统为用户提供了良好地编程接口,方便用户对并行计算任务的管理、自定义文件格式及相关参数的设置,且对已有的串行算法具有更好的移植性,对研究提高复杂电磁环境中仿真速度有着积极的意义。



# 第一章 复杂电磁环境仿真系统整体介绍

## 1.1 传统的传播模型

电波传播一直是工程电磁场理论和环境电磁特性研究领域中最为人们广泛关注和研究的方 向之一。

在自由空间中,无线电波传播是相对简单的现象。对于无限大的自由空间来说,一个有限大小的波源所发射的电磁波都是以球面波形式向外传播的,在球面上某一给定的立体角内功率密度将保持不变。但是,在地球上,由于地表特性十分复杂,这就决定了地表上的电波传播是一个复杂环境中的电波传播问题。

由于工程实践上的需要,人们建立了很多复杂环境下的电波传播预测模型,总体来说,这些模型可以分为三类:经验模型、确定性模型和理论模型<sup>[1-2]</sup>。

经验模型<sup>[3]</sup>是由大量测量数据经统计分析后所归纳出的公式。这类模型中,比较典型的有 Egli 模型、Okumura-Hata 模型、CCIR(现为 ITU-R)公式、Ibrahim-Parsons 模型, COST231-Hata 模型、Lee 模型等。经验模型方法简单,应用时不需要详细的环境信息,非常方便快捷,但通常只应用于城镇、市郊这些场景小、距离短的小尺度电波传播特性预测工程中,而且对路径损耗的预测精度也不高。经验模型是根据真实场景的电波传播损耗实测结果进行建模后得出的近似计算公式<sup>[4-7]</sup>,这种模型易于使用,但是只在具有类似于原始测量环境的场景中才具备较高的精度,且只能预测某一距离上而非某一场点的传播损耗。确定性模型将传播环境的细致结构和材质参数考虑进去并进行数值计算,能够提供更高精度的损耗预测。

确定性模型通常运用射线追踪技术或 FDTD 技术根据电磁波传播理论进行接收点场强的计算,可以预测电波传播环境中各个场点的场强,适用于城市环境下的室内、室外传播环境,其计算开销随着环境的范围和环境模型数据的精细程度的增加而增大。确定性模型是在严格的电磁理论基础上从麦克斯韦方程组导出的公式。根据电波传播的初始条件和边界条件,求解这些公式就可得到路径上的电波传播特性。初始条件由发射源决定,一般相对固定,边界条件则是由传播媒介与地表分界面的形状和电磁特性决定,通常随传播环境的变化而不同。一般来说,环境描述的精度直接决定了边界条件的精度,从而也最终决定了确定性模型的精度。由于确定性模型对具体环境中的电波传播特性有很高的预测精度,因而成为当前电波传播领域主要的研究方向。基于射线追踪法(RTM, Ray tracing method)、时域有限差分法(FDTD, Finite Difference Time-Domain method)等数值

计算方法的确定性模型成为研究电磁环境中电波传播特性的常用方法。但 FDTD 方法有两个缺陷：第一，由于数值稳定性、数值色散和各向性的影响，其仿真结果的误差会随着时间积累而越来越大，导致仿真结果的偏差甚至失真；第二，该方法计算量非常大，导致适用条件是电磁环境中的建筑物分布比较规则、简单，不适合环境日益复杂的城市环境。

理论模型是按照理想的条件，例如统一的建筑物高度和建筑物间距等，进行理论计算得出来的近似公式。理论模型在效率上比确定性模型快，在精度上比经验模型高。理论模型同经验模型一样，具有易于使用的特点，但是仅适用于有相似假设条件的场景中，且只能预测某一距离上而非某一场点的传播损耗。

表 1-1 描述了几种常用的电波传播损耗预测模型及其使用环境：

传统的传播预测模型只能应用于具有相似测量环境或相似假设条件的场景，并且大部分传播模型包括表 1-1 中的两种 Hata 模型都只能应用于具有高架天线的电磁环境中，而 SPM 模型需要实地校正后才具有较高的预测精度。传统的传播模型预测结果与真实测试结果的偏差变大。因此，必须建立有效的、精确的电波传播预测模型来分析电波传播的特性。

模型	模型实例	适用频率	适用距离	使用环境	备注
经验模型	Okumura-Hata	150~1500MHz	1~20km	城区、郊区、乡村	对微小区预测误差较大
	COST231-Hata	1500~2000MHz	1~20km	城区、郊区、乡村	对微小区预测误差较大
理论模型	Walfisch-Ikegami	800~2000MHz	0.02~5km	均匀城区	假设建筑物高度、间距一致
	SPM	50~2000MHz	0.1~100km	城区、郊区、乡村	需要进行模型校正

确定性模型	射线追踪模型	UHF 的高频段、微波频段	——	城区、郊区	需要精确的环境数字地图
	FDTD 模型	UHF 的高频段、微波频段	——	简单城区	计算量大

表 1-1. 电波传播的不同预测模型

在预测诸如室内或城市电磁环境等小尺度路径上的电波传播特性时，基于 GTD 和 UTD 的三维射线追踪方法得到人们广泛的研究和应用。射线追踪方法是基于高频场的“局部性”，将电磁波在路径上的传播简化为直射、反射和绕射，这样便可根据地形环境数据库搜索主要的传播路径，再根据各路径对场的贡献最终得出总的场。由于射线追踪算法要根据地形的面、劈尖、顶点的位置来搜索主要的传播路径，因此，当不规则地形或建筑物表面上的面、劈尖、顶点数目巨大时，需要追踪的射线就非常多，从而使得计算非常复杂。

## 1.2 系统的整体架构

射线追踪是一种被广泛用于电波传播预测过程中的算法，主要研究和预测无线电波传播特性的技术。该模型可以模拟电磁波传播中的直射、反射和绕射过程，追踪所有从辐射源发射出来的射线，从而辨认出信道中发射机和接收机之间的所有可能的射线路径。一旦所有路径辨认出来，根据相关电波传播理论计算出每条射线的相位、幅度、延迟和极化，然后结合方向图和系统带宽，就能够计算出接收机位置处所有射线的相干合成结果。

通过软件实现电波传播的计算是一种重要的方式。基于几何光学和一致性绕射理论的射三维射线追踪算法是电波预测中最有效的方法之一<sup>[8-11]</sup>。但是这种数值算法的耗时较长，特别是在地形较为复杂，高低起伏较大，射线求解过程非常复杂。因此计算速度的提高，成为该算法实用化的关键。国内外众多学者已经提出许多加速算法，如区域分块法、角度的 Z 缓存区算法等，这些算法都有效的缩短了计算时间，近年来，随着高性能分布式计算技术的发展，并行计算成为解决巨大而耗时问题的主要技术。而且随着计算机硬件价格的降低，使用局域网计算机群取代昂贵的并行计算机作为并行仿真环境，将成为廉价省时的电波预测解决方案。

仿真系统采用基于 WCF 的分布式系统结构。系统按照一定的粒度可以分为四层：表现层，服务契约层，业务逻辑层和数据访问层。表现层即 WCF 客户端程序，其功能应包括响应用户输入，调用相关服务和反馈服务调用结果，表现层

通过访问服务契约层调用 WCF 服务。服务契约层用接口(Interface)公布 WCF 服务，隐藏了服务实现，隔离了表现层与业务逻辑层，一定程度上对两者进行了解耦。在公开的服务契约不变的情况下，业务逻辑的变化不会对表现层产生影响，保证了表现层的稳定性。业务逻辑层实现了服务契约层公开的服务契约，完成业务逻辑设计。数据逻辑层可通过面向对象设计原则及相关模式隐藏数据访问细节，为业务逻辑层提供无差别的数据访问接口。数据库层提供数据的存储与访问功能，由数据库软件实现。并行计算系统的软件结构如图 1-1 所示：

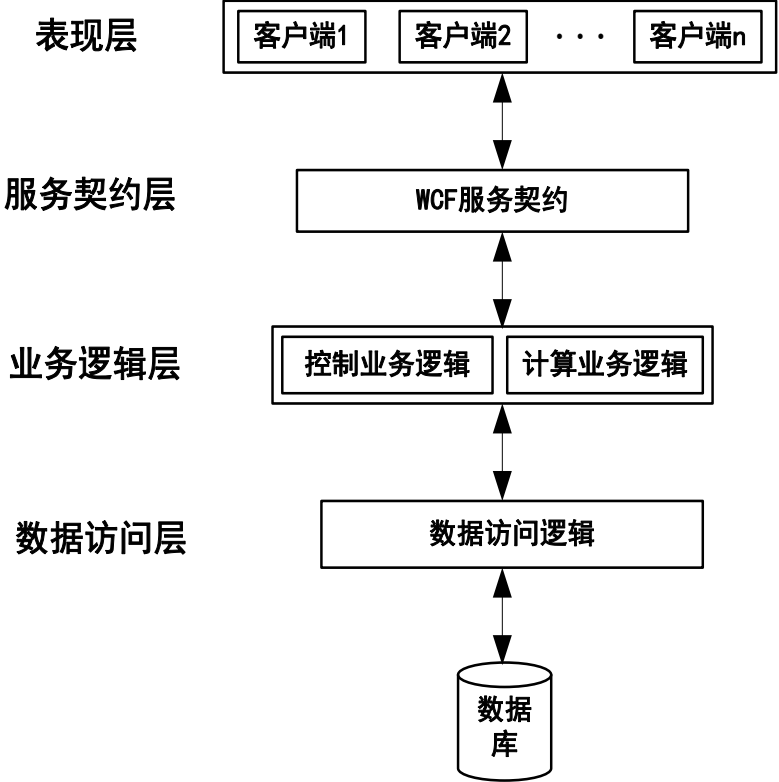


图 1-1. 并行计算系统的软件结构图

表现层是用户与系统交互的桥梁。由于 WCF 充分支持 WS-\*标准，WCF 与异构平台具有良好的互操作性。WCF 客户端可以运行在异构平台下，通过引用 WCF 提供的接口与 WCF 服务交互。客户端只关心接口的内容，不必了解具体的服务的实现形式，简化了客户端编程的复杂程序。当业务逻辑发生改变而客户端的服务不变时，客户层无需做出任何修改，因此方便了系统的维护。

服务契约层位于业务逻辑层和客户层之间。从客户端观点看，WCF 服务层是对业务逻辑层的封装与抽象。WCF 对 Windows 平台下已有的分布式处理技术进行整合，如 DCOM，WSE 等，并为分布式的开发提供了并行统一的开发模式，减少了系统维护的复杂度。服务契约层对客户层提供服务的接口，WCF 服务是由下一层即业务逻辑实现的。

业务逻辑层完全实现了 WCF 服务的具体内容。业务逻辑层可以是服务的实现，也可以是对其它 WCF 服务的调用的封装。WCF 可以将基于早期 Windows 分布式技术进行整合，在进行少量代码修改情况下迅速构建企业应用，节省了投资。

数据库连接层为业务逻辑层提供连接服务，并提供数据库操作的方法。本层将具体的数据库与数据库操作的实现方式分离，可以将现有系统顺利的转移到不同的数据库服务器上。

并行计算系统的物理拓扑结构如图 1-2 所示：

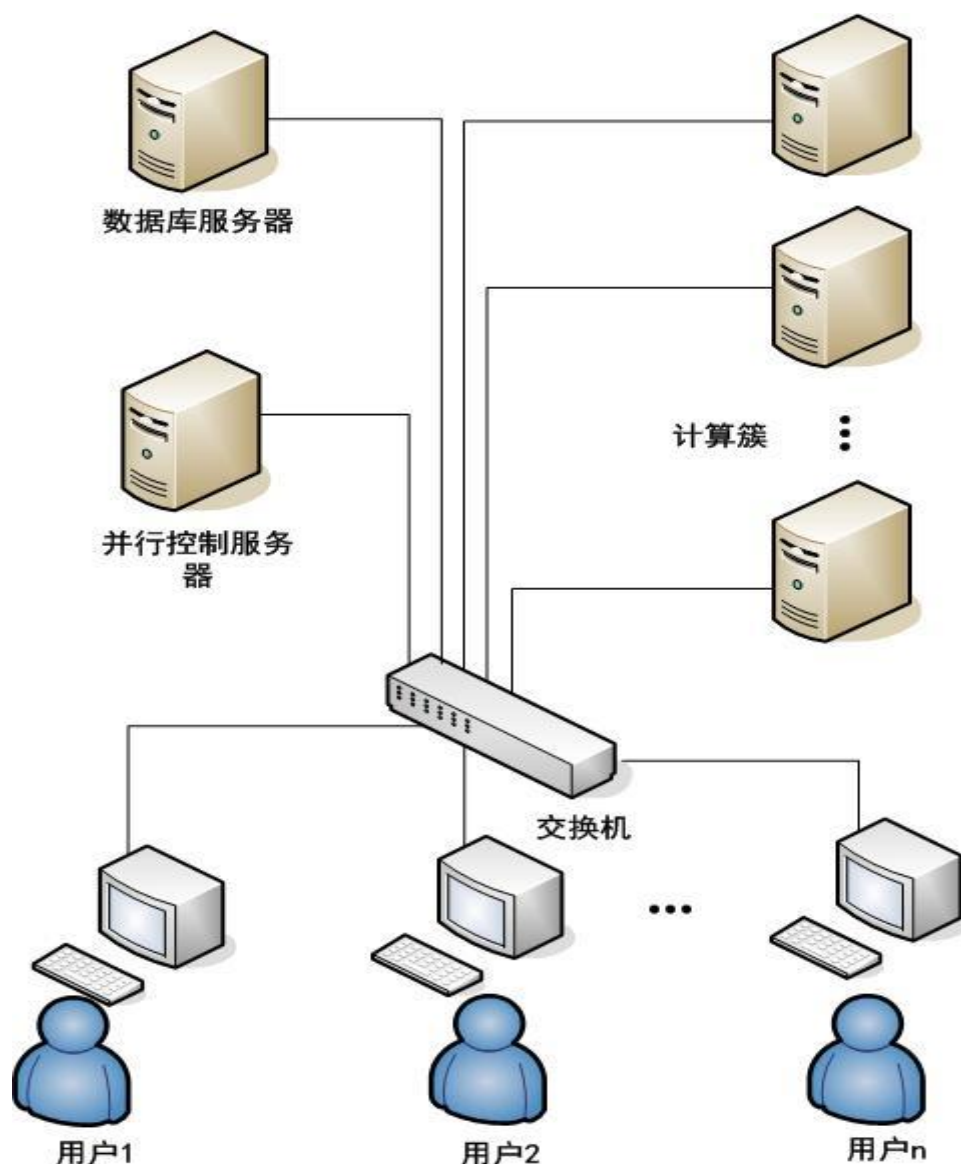


图 1-2. 并行计算系统的物理拓扑结构图

系统采用 C/S 模式，允许多个用户同时建模仿真。利用以太网将数据传输到服务器上，然后由并行控制服务器将仿真任务分解成若干个任务单元，分配给计

算簇中的节点进行计算，节点计算结束后，将结果经由网络传输至服务器，当全部任务完成后，服务器将结果进行合并。

客户端是用户和系统交互的窗口，主要负责仿真建模和三维显示。在仿真开始前首先要选择一个地形文件，将其导入到系统中，还需要建立辐射源，并设置辐射源的功率，位置等关键信息。当建模前的准备工作都准备好以后，系统将地形以三维的形式显示在屏幕上，仿真结束以后，用不同的颜色表示参考点处场强的大小，这样可以将位置和大小等信息以更为直观地方式展示给用户，利用计算机图形学的知识，可以使建模操作更为简单方便。

根据射线跟踪算法的并行性，主控将仿真任务进行分割，把子任务分配给空闲的计算节点，当子节点完成任务后，将结果传给主控，此时主控负责将计算结果进行合并。当客户端下载仿真结果时，将仿真的最终结果传送给客户端。

子节点主要是利用射线跟踪算法进行计算。首先子节点向主控请求计算任务，获取任务以后，进行计算并将最终计算结果发送给主控。

## 第二章 仿真系统的计算内核实现

本系统的计算仿真模块采用的计算模型是射线追踪模型。射线跟踪是一种被广泛用于复杂电磁环境中，主要研究和预测无线电波传播特性的技术。该模型可以模拟电磁波传播过程中的直射、反射和绕射过程，跟踪所有从辐射源发射出来的射线，从而辨认出发射机和接收机之间的所有可能的射线路径。一旦所有路径辨认出来，就可以根据相关电波传播理论计算出每条射线的相位、幅度、延迟和极化，然后结合天线方向图和系统带宽，就能够计算出接收机位置处所有射线的相干合成结果。

### 2.1 射线追踪法理论

#### 2.1.1 理论基础

射线跟踪方法最早出现在 20 世纪 80 年代初，基于几何光学(GO)原理，通过模拟射线的传播路径来确定反射、折射和阴影等。它将从辐射源发射出来的波看作很多的射线，然后追踪每一条射线的传播轨迹直到射线所携带的能量变得很小，可以忽略或者射线到达接收点为止，由追踪的结果决定射线是舍弃还是保留到最终的计算结果。对于障碍物的绕射，通过引入绕射射线来补充 GO 理论，即几何绕射理论(GTD)和一致性绕射理论(UTD)<sup>[12-13]</sup>。

射线跟踪法的基本思想是：首先确定一个发射源的位置，根据空间中的建筑物特征和分布找出发射源到每个接收位置(测试点)所有射线的传播路径，然后根据菲涅耳等式和几何绕射理论/一致性绕射理论(GTD、UTD)等，确定反射和绕射损耗等，这样相应得到每条路径到每个测试点的场强，将同一测试点处到达的所有路径的场强做相干叠加，得到每一个测试点处总的接收场强。

射线追踪过程包括两个方面的内容：射线轨迹的搜索以及射线场强的计算。

基于几何光学，我们知道，主要的射线传播机制有以下几种：直射、反射和绕射(边缘绕射、尖顶绕射和表面绕射)。

所谓直射，就是两点间的直线路径。射线传播过程中，当遇到一个光滑表面的阻挡时，就会发生反射。反射的轨迹要求满足入射角等于反射角；当遇到劈、顶点和光滑曲面时就会发生绕射现象<sup>[14]</sup>。如下图所示：

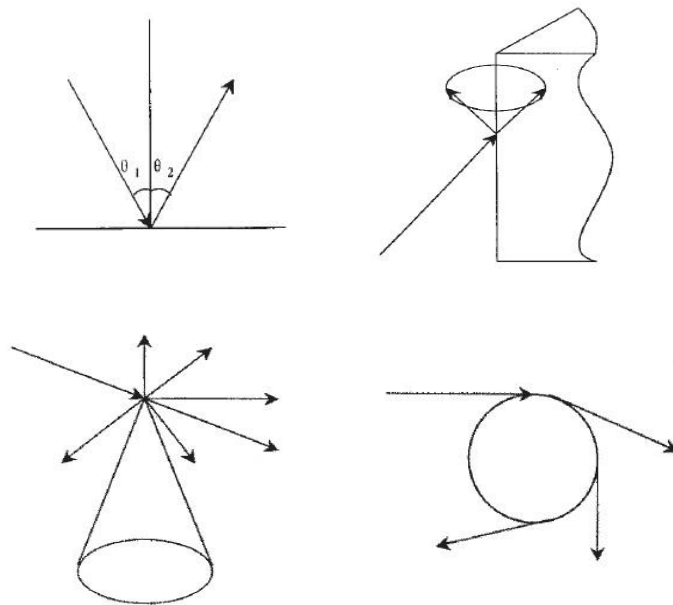


图 2.1 射线反射、绕射的情况

### 2.1.2 计算公式推导

射线追踪法有两种计算模型，一种是正向射线跟踪模型，一种是反向射线跟踪模型。本系统采用正向计算模型，也称为 SBR（射线弹跳法）。如图所示：

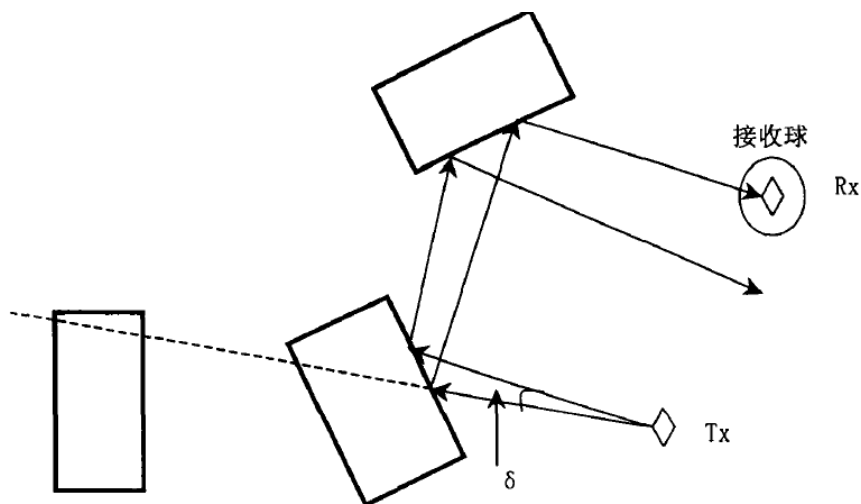


图 2.2 SBR 射线弹跳法

**SBR 原理：**从离开源（或次级源）且角距为  $\delta$  的射线开始。计算射线和地形或建筑物的反射点，由于其他的反射点被第一个墙壁所遮挡，只选择最接近源的反射点所在面作为反射墙；之后检验最终所得的射线部分，看看它是否射向了任何的接收位置；下一步，计算在反射墙壁上的入射角以得出反射射线方向，之后就可以求得它与下一个墙壁的反射点，因此也就定义了反射射线部分。对每一条



从辐射源发出的射线，重复执行这个过程直到到达所期望的反射次数。求射线和墙壁的反射点是弹跳法的程序中最耗时的部分。

另外，根据 UTD 理论，当射线射向不连续的面时，将会发生绕射，本算法主要考虑边缘绕射，射线射在棱上时将会在棱上发生绕射并发射出绕射射线。具体将在下面详解。

追踪射线路径的方法主要是记录每条到达接收点的射线所经过的反射点或绕射点，未到达接收点或达到限制的反射最大次数（一般为 3 次）时将舍弃该射线。在得到路径的同时，根据 UTD 计算出所需要的电磁值。每条路径将会以文件的形式记录<sup>[16-18]</sup>。

### 2.1.2.1 直射电场场强计算公式

方法一：采用公式

$$E = \frac{245 \sqrt{P \cdot G}}{r} * F(\theta, \Phi) \quad (2-1)$$

其中 P 代表辐射功率单位是 KW, G 代表增益, r 代表距离单位是 Km,  $F(\theta, \Phi)$  代表天线方向图函数, E 为场强单位是 mV/m。

方法二：场点场强以极坐标形式表示

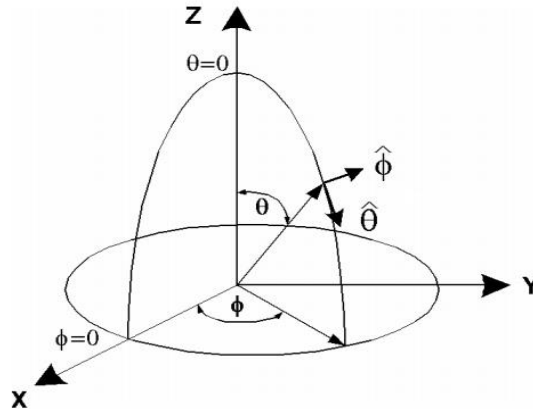


图 2.3 极坐标

采用公式

$$E(r, \theta, \phi) = (A_\theta(\theta, \phi)\hat{e}_\theta + A_\phi(\theta, \phi)\hat{e}_\phi) \frac{e^{-j\beta r}}{r} \quad (2-2)$$

其中：

$$A_\theta(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{P_T \eta_0}{2\pi}} g_\theta(\theta, \phi);$$

$$A_{\phi}(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{P_T \eta_0}{2\pi}} g_{\phi}(\theta, \phi);$$

$$g_{\theta}(\theta, \phi) = \sqrt{|G_{\theta}(\theta, \phi)|} e^{j\psi_{\theta}};$$

$$g_{\phi}(\theta, \phi) = \sqrt{|G_{\phi}(\theta, \phi)|} e^{j\psi_{\phi}};$$

$$\beta = \frac{\omega}{c}$$

$P_T$ 代表辐射功率,  $G_{\theta}(\theta, \phi)$ 代表天线增益在 $\theta$ 方向的量,  $\psi_{\theta}$ 代表电场在 $\theta$ 方向上的相位,  $r$ 代表发射源到场点的距离。

在实际解决问题的时候, 求得的场强分量均取实部计算, 总场强强度由各个分量的平方和开根号求得。

#### 2. 1. 2. 2 反射电场场强计算公式

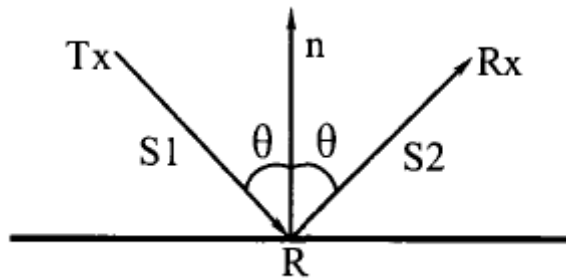


图 2.4 射线反射

如图所示,  $R$  为反射点,  $Tx$  为发射源,  $Rx$  为接收点。

$$\begin{cases} E(Rx)_{\perp} = E_{R\perp}^i \cdot R_{\perp} A(S_2) e^{j\beta(S_1+S_2)} \\ E(Rx)_{\parallel} = E_{R\parallel}^i \cdot R_{\parallel} A(S_2) e^{j\beta(S_1+S_2)} \end{cases} \quad (2-3)$$

式中,  $E(Rx)_{\perp}$ 和 $E(Rx)_{\parallel}$ 分别表示反射波末场也就是场点  $Rx$  处的垂直极化场量和水平极化场量,  $E_{R\perp}^i$ 和 $E_{R\parallel}^i$ 分代表入射波在反射点  $R$  处的垂直极化场量和水平极化场量,  $R_{\perp}$ 和 $R_{\parallel}$ 分别代表垂直极化和水平极化的反射系数,  $e^{j\beta(S_1+S_2)}$ 代表从源点  $Tx$  传到反射点  $R$  再传到场点  $Rx$  的相位积累,  $A(S_2)$ 代表从反射点  $R$  到场点  $Rx$  的振幅扩散因子。

其中, 入射波的末场 $E_R^i$ 可以根据入射波的类型(直射、反射、绕射)由公式求出,  $A(S_2)$ 定义为 $A(S_2) = S_1/(S_1 + S_2)$ 。

而反射系数公式如下

$$\begin{cases} R_{\perp} = \frac{\cos\theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}} \\ R_{\parallel} = \frac{\varepsilon \cos\theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}}{\varepsilon \cos\theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}} \end{cases} \quad (2-4)$$

其中 $\theta$ 为入射角和反射角， $\varepsilon$ 为反射面媒介的等效电参数，定义为

$$\varepsilon = \varepsilon_r - j60\sigma\lambda$$

其中 $\varepsilon_r$ 为反射面媒介的相对介电常数， $\sigma$ 为其导电率， $\lambda$ 为入射波的波长。

### 2.1.2.3 绕射电场场强计算公式

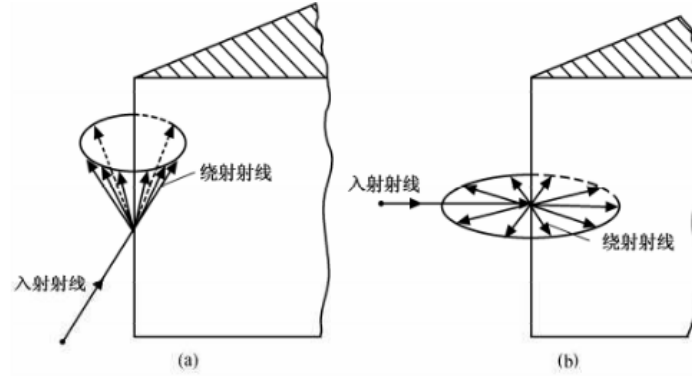


图 2.5 射线绕射

根据几何绕射理论（GTD），当入射射线遇到散射体边界的边缘、拐角、尖顶时将会发生绕射，产生新的射线。本算法只考虑边缘绕射，如上图所示。一条入射射线将会激励无数条绕射射线，它们都是在以绕射点为顶点的圆锥面上。

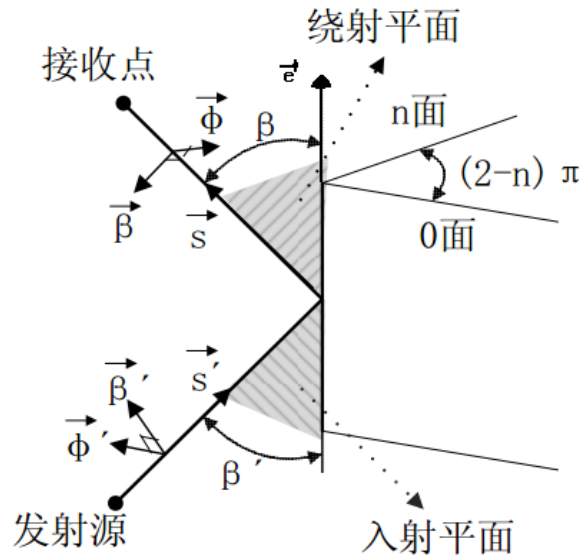


图 2.6 射线基坐标

首先介绍射线基坐标。

根据绕射理论，入射射线与棱的夹角等于相应的绕射射线与棱的夹角，如上图所示， $\beta' = \beta$ ， $\beta'$ 为入射射线与棱的夹角， $\beta$ 为绕射射线与棱的夹角，入射射线和棱构成了入射平面，绕射射线与棱构成了绕射平面。图中的各个向量均为单位矢量，这些矢量在绕射场强的求解过程中非常重要。

$$\begin{cases} \vec{\phi} = -\frac{\vec{s} \times \vec{s}'}{|\vec{s} \times \vec{s}'|} \\ \vec{\beta} = \vec{\phi} \times \vec{s} \end{cases} \quad (2-5)$$

$$\begin{cases} \vec{\phi} = \frac{\vec{s}' \times \vec{s}}{|\vec{s}' \times \vec{s}|} \\ \vec{\beta} = \vec{\phi} \times \vec{s}' \end{cases} \quad (2-6)$$

这样就形成了入射和反射的射线基坐标，入射坐标为  $(\vec{s}', \theta', \beta')$ ，反射坐标为  $(\vec{s}, \theta, \beta)$ 。

场强计算公式：

在绕射点 D 处，绕射场强初始值可以表示为：

$$E^d(D) = E^i(D) \cdot D \quad (2-7)$$

式中， $E^i(D)$ 为入射波在 D 处的末场，D 为并矢绕射系数。在射线基坐标下，D 为  $2 \times 2$  矩阵，场点 F 的场强值可以表示为

$$E^d(F) = E^d(D) A_d(s_2) e^{-jk s_2} \quad (2-8)$$

式中， $A_d(s_2)$ 为绕射点到场点的扩散因子， $s_2$ 为绕射点到场点的距离。

首先将 $E^i(D)$ 转化到射线基坐标上，如下式

$$E^i(D) = \vec{\phi} E_{\phi}^i + \vec{\beta} E_{\beta}^i = \begin{bmatrix} E_{\phi}^i \\ E_{\beta}^i \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

然后根据公式计算出场点 F 的场强，以射线基坐标系表示，然后再转换为直角坐标系。

$$E^d(F) = \begin{bmatrix} E_{\phi}^{F,d} \\ E_{\beta}^{F,d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{\perp} & 0 \\ 0 & D_{\parallel} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{\phi}^i \\ E_{\beta}^i \end{bmatrix} \cdot A_d(s_2) e^{-jk s_2} \quad (2-10)$$

$$\text{式中，} A_d(s_2) = \sqrt{\frac{s_1}{s_2(s_1+s_2)}}, \quad s_1 \text{是源点到 D 点的距离，} k = \frac{\omega}{c}.$$

绕射系数主要用于射线追踪过程中绕射路径的场强计算，绕射系数的求解公式经过了三个阶段的演化：几何绕射系数、一致性绕射系数和启发式绕射系数。目前，一致性绕射系数只针对理想导体表面，而启发式绕射系数在以一致性绕射

理论的基础上,加入了绕射棱两个绕射面的反射系数来适应非理想导体表面的绕射系数的计算。因此,本系统采用了启发式绕射系数的计算公式。

其中并矢绕射系数转化为了射线基坐标形式,由下式求出:

$$\begin{aligned} \dot{D}_{||} = & \frac{-\exp[-j(\frac{\pi}{4})]}{2n\sqrt{2\pi k}} [\Gamma_1 \cot(\frac{\pi-(\phi-\phi')}{2n}) F[kLa^-(\phi-\phi')] + \Gamma_2 \cot(\frac{\pi+(\phi-\phi')}{2n}) F[kLa^+(\phi- \\ & \phi')] + \Gamma_3 \cot(\frac{\pi-(\phi+\phi')}{2n}) F[kLa^-(\phi+\phi')] + \Gamma_4 \cot(\frac{\pi+(\phi+\phi')}{2n}) F[kLa^+(\phi+\phi')]] \end{aligned} \quad (2-11)$$

式中:

$$L = s_1 \sin^2 \beta' \quad (\beta' \text{为入射角})$$

$$\begin{cases} \Gamma_1 = 1 \\ \Gamma_2 = 1 \\ \Gamma_3 = \dot{R}_0(\phi') \\ \Gamma_4 = \dot{R}_n(\phi) \end{cases} \quad \phi, \phi' \leq \frac{n\pi}{2}; \phi' < \phi$$

$$\begin{cases} \Gamma_1 = 1 \\ \Gamma_2 = 1 \\ \Gamma_3 = \dot{R}_0(\phi) \\ \Gamma_4 = \dot{R}_n(\phi') \end{cases} \quad \phi, \phi' \leq \frac{n\pi}{2}; \phi' > \phi$$

$$\begin{cases} \Gamma_1 = 1 \\ \Gamma_2 = \Gamma_3 \Gamma_4 \\ \Gamma_3 = \dot{R}_0(\phi') \\ \Gamma_4 = \dot{R}_n(n\pi - \phi) \end{cases} \quad \phi' \leq \frac{n\pi}{2}; \phi > \frac{n\pi}{2}$$

$$\begin{cases} \Gamma_1 = \Gamma_3 \Gamma_4 \\ \Gamma_2 = 1 \\ \Gamma_3 = \dot{R}_0(\phi') \\ \Gamma_4 = \dot{R}_n(n\pi - \phi) \end{cases} \quad \phi' > \frac{n\pi}{2}; \phi \leq \frac{n\pi}{2}$$

$$\begin{cases} \Gamma_1 = 1 \\ \Gamma_2 = 1 \\ \Gamma_3 = \dot{R}_0(\phi) \\ \Gamma_4 = \dot{R}_n(\phi') \end{cases} \quad \phi, \phi' > \frac{n\pi}{2}; \phi' < \phi$$

$$\begin{cases} \Gamma_1 = 1 \\ \Gamma_2 = 1 \\ \Gamma_3 = \dot{R}_0(n\pi - \phi') \\ \Gamma_4 = \dot{R}_n(n\pi - \phi) \end{cases} \quad \phi, \phi' > \frac{n\pi}{2}; \phi' < \phi$$

$$\begin{cases} \Gamma_1 = 1 \\ \Gamma_2 = 1 \\ \Gamma_3 = \dot{R}_0(n\pi - \phi) \\ \Gamma_4 = \dot{R}_n(n\pi - \phi') \end{cases} \quad \phi, \phi' > \frac{n\pi}{2}; \phi' > \phi$$

$$\alpha^\pm(\beta) = 2\left(\cos \frac{2n\pi N^\pm - \beta^\pm}{2}\right)^2$$

$$2n\pi N^+ - \beta^\pm = \pi$$

$$2n\pi N^- - \beta^\pm = -\pi$$

其中： $\phi'$ 表示入射平面与0面的夹角， $\phi$ 表示绕射平面与0面的夹角， $(2-n)\pi$ 表示劈面的内夹角， $\dot{R}_0(\psi)$ 和 $\dot{R}_n(\psi)$ 分别表示0面和n面的反射系数。

当  $x > 0.1$  时

$$F(x) = \sqrt{2\pi x} [f(\sqrt{2x/\pi}) + jg(\sqrt{2x/\pi})] \quad (2-12)$$

式中：

$$f(\xi) = \frac{1 + 0.926\xi}{2 + 1.792\xi + 3.104\xi^2}$$

$$g(\xi) = \frac{1}{2 + 4.142\xi + 3.492\xi^2 + 6.670\xi^3}$$

$X < 0.1$  时，采用下面公式：

$$F(x) \approx [\sqrt{\pi x} - 2x \exp\left(\frac{j\pi}{4}\right) - \frac{2}{3}x^2 \exp\left(-\frac{j\pi}{4}\right)] \exp\left[j\left(\frac{\pi}{4} + x\right)\right] \quad (2-13)$$

## 2.2 对射线追踪法的优化改进

基于对射线追踪法理论的研究，发现影响射线跟踪法效率有以下几种因素：

(1) 发射端发射的射线数目，它决定了要跟踪的射线数目，计算发射射线数目的公式  $n=2\pi/\phi$ ，其中  $\phi$  为发射张角，因此发射张角的选择直接影响射线跟踪法的运算效率。

(2) 地形环境的复杂程度。地形环境的复杂程度决定了射线与地形求交点运算的运算次数，从而影响射线跟踪法的运算效率。



(3) 当射线与地形面相交时, 将会发生反射或绕射现象, 此时反射及绕射系数的经度对射线跟踪法的运算效率也会产生影响。

在上述的因素中, 发射张角是固定不变的, 即发射端发射的射线数目通常是不变的, 而反射及绕射系数也是固定不变的, 因此地形复杂程度就决定着发射点及绕射点所需要的求交点运算次数。地形越复杂, 求交点运算的次数越多, 并且多数求交运算是需要舍弃的无用运算。因此, 大量无用的求交点运算就是影响射线跟踪法运算效率的主要因素<sup>[19]</sup>。

为了提高射线追踪法的效率, 减少仿真计算的时间, 本系统对射线追踪法进行了优化改进, 主要提出动态地形分区的思想, 有效减少求交点运算的次数从而提高整个计算的效率。

本系统采用的地形使用的地形源文件是 DEM 数字高程模型, 经过转化可以产生本系统所使用的 Ter 地形文件, 其在 UI 上显示的形式如下图:

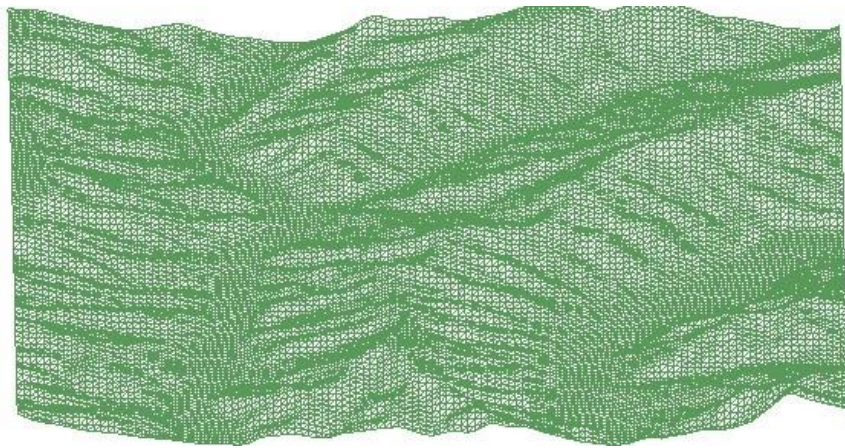


图 2.7 3D 地形显示

将上图放大后如下图所示:

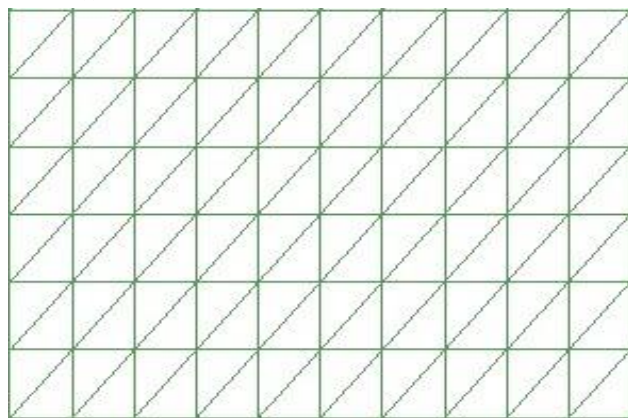


图 2.8 TER 地形组织形式

可以看出, 地形组织形式是以数以万计的三角面组成的。

传统的射线跟踪法要求求出射线与碰撞面的反射点和绕射点才能继续跟踪射线路径, 由于程序对发射源和射线的方向的未知性, 通常求射线与地形某个三角面交点是通过遍历判断整个地形的每个三角面与射线是否相交完成, 若相交,

判断交点是否在三角面内，直到得到满足条件的结果。然后从这些交点中求出射线方向上离辐射源距离最近的一个交点即得到正确的结果。

虽然这种算法可以满足需求并得到满意的结果，但是其复杂度为  $O(N)$ ，其中  $N$  为组成地形的三角面的个数。对于小的地形该算法可以满足快速计算，但是对于由上十万个三角面组成的大地形而言，该算法将耗时过长。另外程序需要计算上千条射线，因此该算法的计算量巨大，影响计算效率。

本系统提出的这种优化求交点速度的算法，基本思想是通过研究射线的特性减少需要判断是否相交的三角面的个数来减少计算的复杂度，从而达到提高计算速度的目的。具体的实现步骤如下：

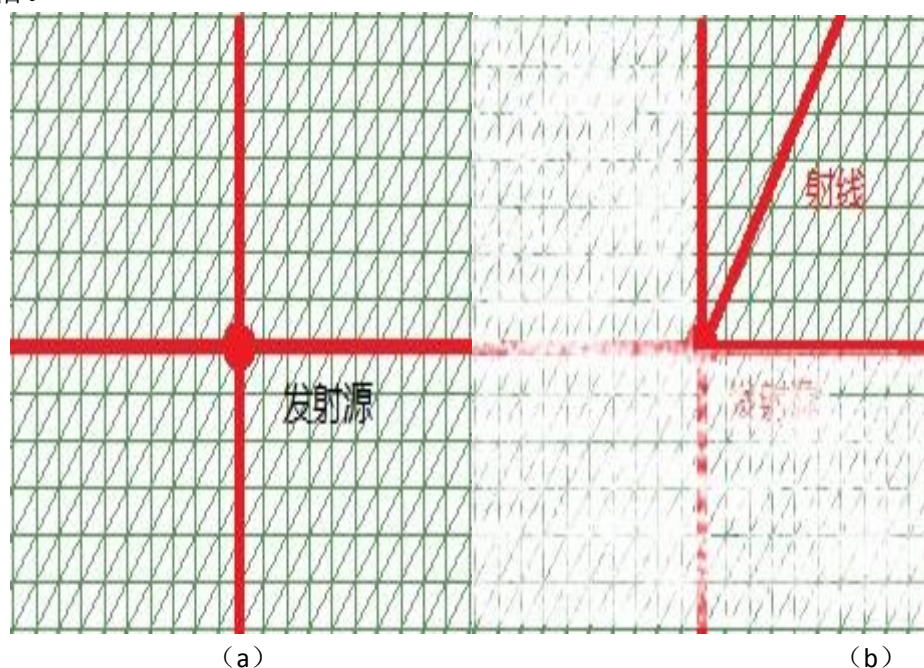
(1) 已知发射源的坐标和辐射源发出的射线的方向向量。通过查找发射源坐标的位置，可以将地形分为四块，如图 2.9 (a)所示。

(2) 根据发射源发射的射线的方向向量可以判断射线将向某个方向射出，因此射线只与该方向区域内的三角面有相遇的可能，如图 2.9 (b) 所显示的区域。

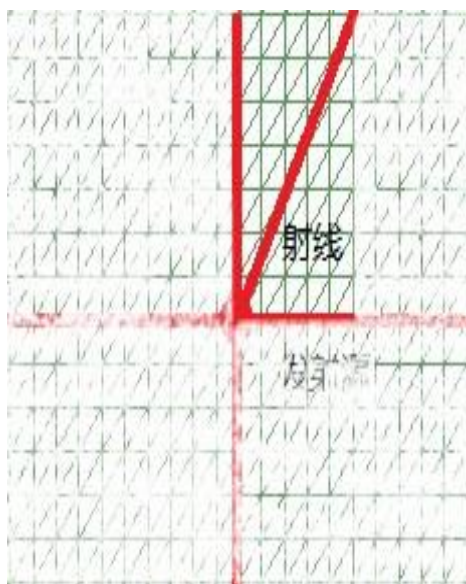
(3) 再根据射线的  $X$  和  $Y$  向量形成的夹角进一步缩小射线可能经过的三角面的范围，如图 2.9 (c) 所显示的区域。

(4) 由于发射源处于地形面上，因此有一定的高度，根据射线方向向量的  $Z$  向量判断射线是空间向上还是空间向下射出，由此再缩小可能相交的三角面的个数，只计算比发射源高或低的三角面即可。

理论上经过以上步骤可以将需要计算的三角面的个数平均减少至原算法的 16 倍。







(c)

图 2.9 加速算法步骤

## 2.3 计算模块的程序流程

射线追踪算法主要分为四个模块：射线与平面相交运算模块，射线信息模块，计算模块，射线路径追踪模块。这四个模块互相调用，最后由射线路径追踪模块返回一个发射源发射的所有符合条件的射线路径信息。

### 2.3.1 程序框架图

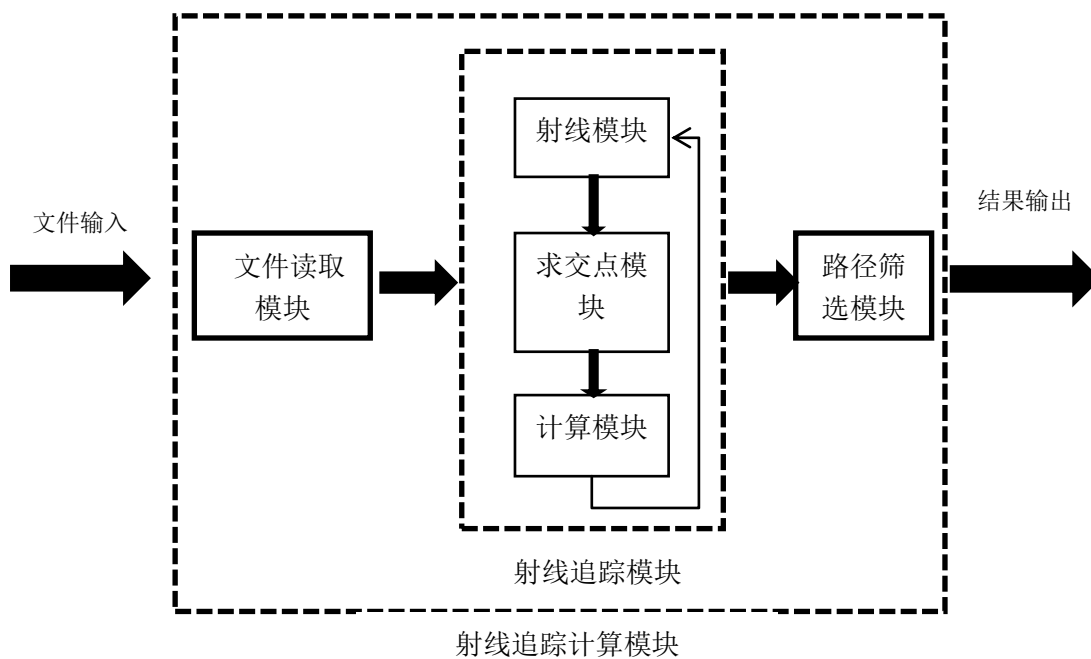


图 2.10 程序框架图

### 2.3.2 射线跟踪算法流程图

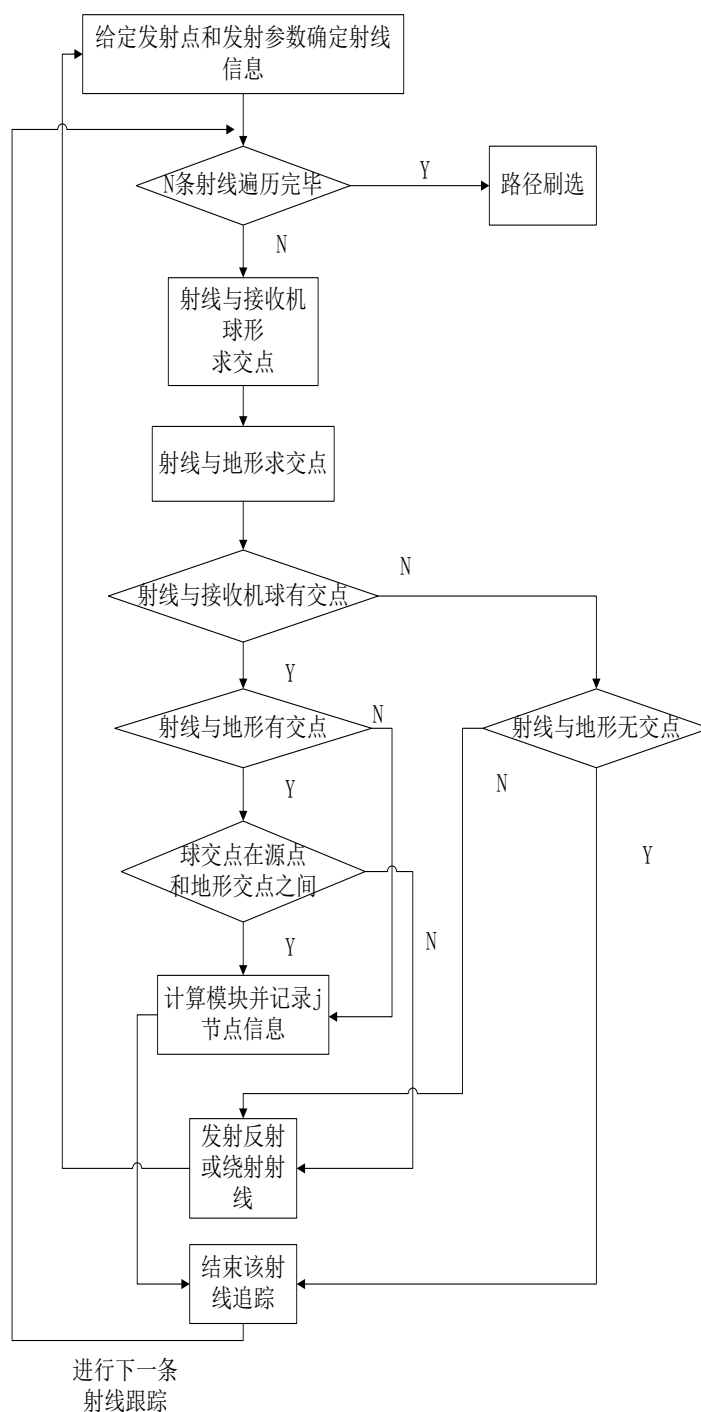


图 2.11 射线跟踪算法流程图

从流程图中可以看出前三个模块融合在射线路径追踪模块中，为射线追踪提供方法。射线与地形求交点的函数由相交计算模块提供，发射反射或绕射射线信息的函数由射线信息模块提供，计算节点场强等信息函数由计算模块提供。

上述流程只求得到一个发射源发射的所有的射线路径信息并记录路径上各节点的场强值等信息如场强、功率等。

### 2.3.3 发射反射和绕射射线的流程图

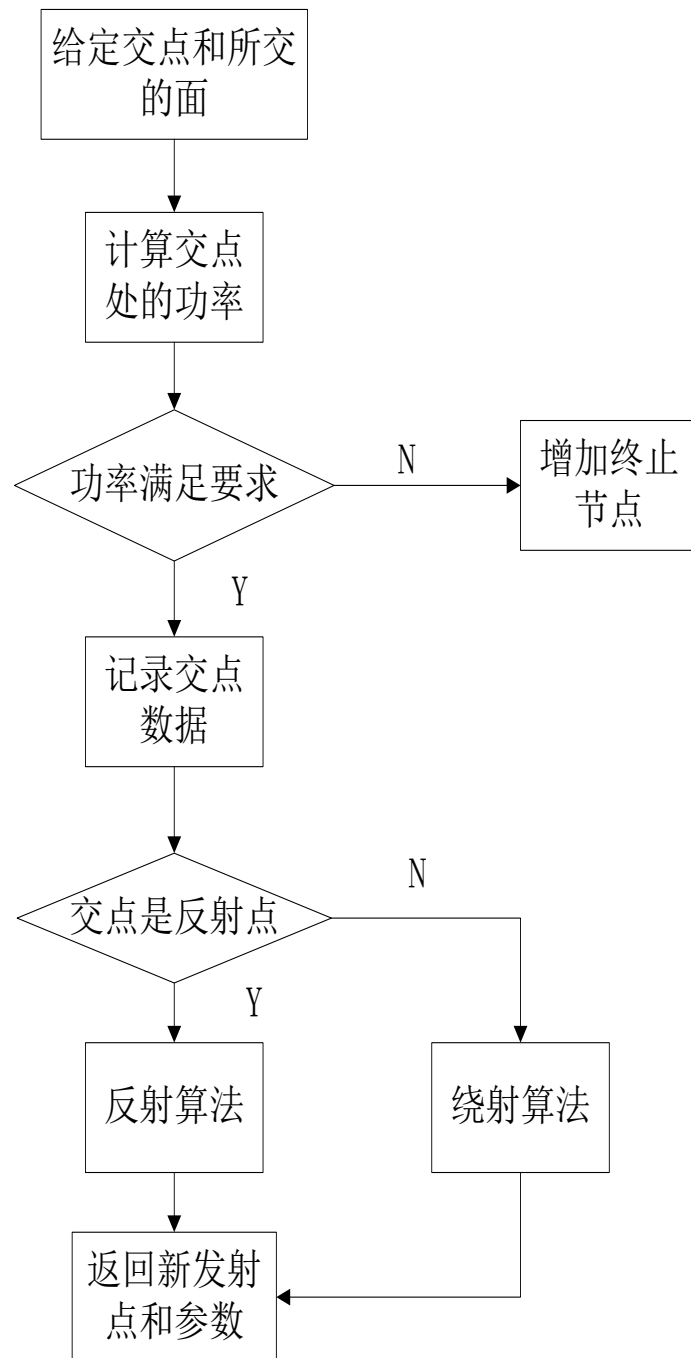


图 2.12 发射反射和绕射射线的流程图

#### 2.3.4 整合程序流程图

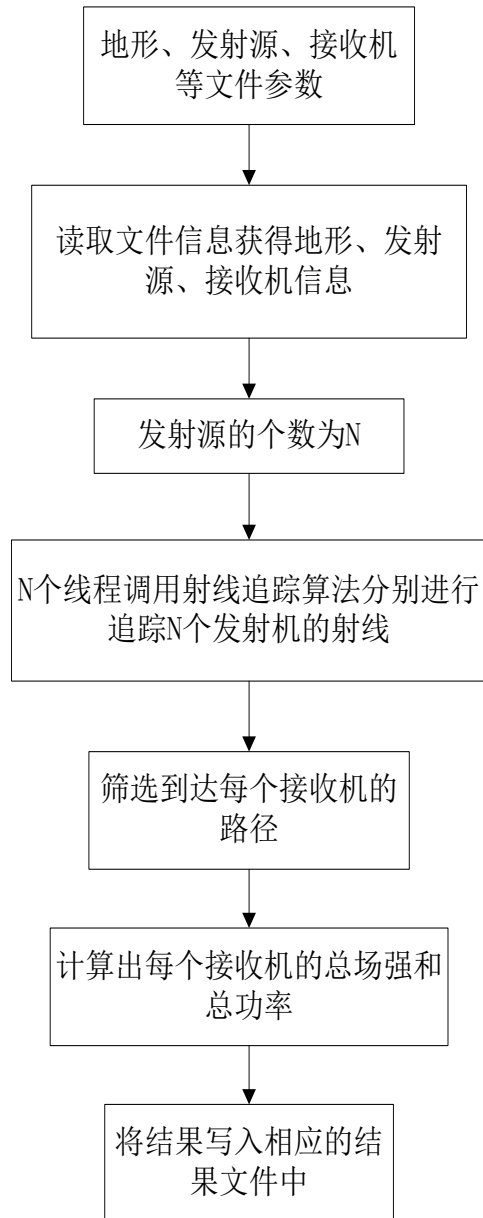


图 2.13 整合程序流程图

整合程序读入文件信息，根据工程文件的信息采用多线程技术分别跟踪每个发射机的射线信息，但是本系统中将发射机进行了分割，因此每次计算只跟踪一个发射源的射线信息。当追踪完毕后根据条件进行筛选路径，舍弃未到达接收点或达到反射绕射次数上限的射线。然后根据到达接收机每条路径计算接收机接收到的总场强和总功率等值。

### 2.3.5 射线路径信息的存储

射线追踪的另一个功能是完成对发射机发射的所有射线的追踪，在追踪的同时进行计算存储路径节点信息，在得到所有的路径信息后将路径进行刷选，舍弃符合条件的路径。

本系统中采用节点树的结构表示路径，根为发射点，树叶为终点，每个节点都记录了相关的节点信息以便计算存储，结构类似下图。

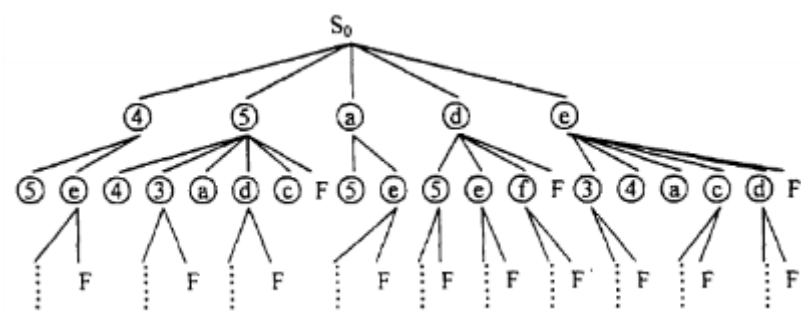


图 2.14 路径结构图

当所有路径跟踪完毕，只保留到达接收点的路径，如上图中的 F 节点，其他路径舍弃。

## 第三章 仿真系统的并行控制

### 3.1 射线追踪算法的并行性

基于几何光学和一致性绕射理论的射线追踪算法是目前城市和郊区电波预测中最有效的方法之一。该算法不同于传统的经验预测模型，它是根据具体的地形几何特点，实现精确的路径损耗预测。

射线追踪技术基于真实场景的数字地图，通过理论计算查找出信号从源点到达接收点的所有路径，包括直射路径、N阶反射路径、N阶绕射路径、反射和绕射的组合路径等，根据反射系数和一致性或启发式绕射系数计算反射和绕射场强，并确定每条路径的传播损耗和接收点的场强，最终计算出从源点到接收点的电波传播损耗或接收点的合成场强。该技术适用于超高频(UHF)的较高频段和微波频段，比经验模型和理论模型具有更高的预测精度和更广的适用范围。

射线追踪模型的应用前提是辐射源发射频谱为高频率(或短波长)，即当散射体参量和障碍物特性在一个波长距离上变化相对缓慢时，电磁波的传播和散射过程就具有局部性，在一个观察点区域内的电磁场，不需要通过整个观察区域表面上的电磁场来求得，而只根据该表面的某一部分就可以求取。这种高频率的电磁场可以利用几何光学原理的分析方法进行处理电磁波的传播问题。目前移动通信系统都工作在甚高频(VeryHighFrequency, VHF)和超高频(UltraHigh Frequency, UHF)，并且使用的频率有越来越高的趋势。然而，射线追踪模型的关键也是其计算上的瓶颈，因为在建筑物分布比较密集的城区，需要计算的面、劈和顶点数量太多，直接进行射线追踪模型的计算，耗费时间难以接受。针对这个问题，人们提出了一些加速技术。

现有的射线追踪加速技术可划分为四类，包括角度的Z-缓存区(Angular Z-Buffer)算法、射线路径搜索算法(Ray-Path Search Algorithm)、维数削减法(DimensionReduction Method)、空间分区法(Space-Division Method)。所有这些方法都可以看作是对环境数据的预处理或根据发射源和接收点的位置对环境数据信息进行简化处理。

角度的Z-缓存区算法的原理是将发射源以及发射源的N阶镜像点的周围环境区域进行等角度间隔划分为角域，从发射源或发射源的N阶镜像点出发的射线只需要与该射线所在角域内的物体表面进行求交点运算，从而加速射线追踪过程。由于这种加速算法对每个镜像点都需要进行一次等间隔的角域划分，因此其计算量随着场景的范围和阶数的增加而急剧增加。

射线路径搜索算法基于可视图或部分可视图技术，只对那些可能存在从发射源到接收点的传播路径的区域进行射线路径查找。可视图或部分可视图是一种多叉树结构，包含若干层。第一层是所有对发射源可见或部分可见的单元，单元可以是物体的面、棱或接收点，第一层用于查找一阶反射或一阶绕射路径；第二层包含的是对第一层可见或部分可见的单元，用于查找二阶反射路径、二阶绕射路径或一阶反射和一阶绕射的组合路径；如此递归下去。可视图或部分可视图建立后，对于给定的源点和接收点，求解一阶可达路径只需判断接收点是否在可视图的第一层单元的可视范围内并进行最后一段路径或全段路径的遮挡测试，若测试后没被遮挡则该路径有效；求解 N 阶可达路径只需判断接收点是否在可视图的第 N 层单元的可视范围内并进行最后一段路径或全段路径的遮挡测试，若测试后没被遮挡则该路径有效。

维数削减法基于以下前提，即并不是只有全三维的射线追踪技术才能达到期望的预测精度，二维射线追踪技术以及垂直面发射技术在某些环境中也能达到或接近期望的精度。当发射机和接收机的高度明显低于场景中建筑物高度时，无线信号的传播机制以水平面的传播为主，可以应用二维的环境地图进行射线追踪以较少计算量；二维射线追踪的路径通常是水平面上的传播路径，若将这些射线路径看成是垂直面上的越过建筑物顶部的路径时，就成了垂直面的路径查找，这就是垂直面发射技术，用于弥补二维射线追踪技术只能计算水平面上的传播路径的不足。

空间分区法的基本思想是在传播环境地图中划分网格，通常为矩形，并建立能存储这些网格内物体信息的查找表。这样，被发射的射线仅需与它所到达的网格之内的物体表面进行求交点运算。空间分区有两种形式：矩形分区和三角形分区。两种分区的不同之处在于对进入到网格内的射线，如何确定它从网格中出来时与网格的哪条边相交。

随着高性能分布式计算技术的发展，并行计算成为解决巨大而耗时问题的主要技术。而且随着计算机硬件价格的降低，使用局域网计算机机群取代昂贵的并行计算机作为并行仿真环境成为廉价省时的电波预测解决方案。本文就是依据基于射线追踪算法的自然并行性搭建了一套并行系统进行电波传播预测<sup>[20-22]</sup>。

以二维平面为例，源点的辐射角度范围为，假设以角度 $\alpha$ 为间隔，则辐射区域可以用条覆盖全平面方向的发射射线来代替，其中：

$$n = 2\pi/\alpha$$

发射射线遇到建筑物面时会发生反射，遇到建筑物棱角时，会发生绕射，针对新的反射线和绕射线，再进行递归追踪，如果射线碰到接收小球（用于判别是否接收到射线的假设小球），则记录下来，当到达一定的递归深度时（衰减到一

定的值)，本发射射线追踪完毕，再根据路径中和射线相交的建筑物电参数信息，就可以确定这条发射射线对所有接收点的场强贡献。

射线追踪算法完成一次计算所花费的时间为：

$$T_{\text{总}} = T_{\text{射线追踪}} + T_{\text{场强计算}} + T_{\text{场强合并}}$$

每条发射射线的追踪几乎是独立的，也就是说具有自然的并行性。但是，严格的说，发射射线之间也具有耦合关系。当采用固定半径的接收小球接收某条射线时，必须检验是否有任何其他先前已经接收的，具有相似方向和相同变换次数（发射或折射的次数）的射线，如果有的话，新射线是重复的，必须不予考虑。这个耦合关系称为双计数误差。为了避免双计数误差，在固定半径接收小球的前提下，追踪一条射线时必须已知或者能够查到以前追踪过的射线的相关信息，由此，必然会带来并行计算中多个处理器间的通信查询耗费。本文采用动态接收小球半径替代固定半径接收小球的方法，可以避免双计数误差。比如，在 2.5 维算法中，令接收小球半径为：

$$r = \ell\alpha/2$$

其中， $\ell$  是此射线已经走过的路程， $\alpha$  是发射射线角度间隔。而且，当射线遇到建筑物拐角发生绕射时，因为绕射点看作虚拟的源，所以将  $\ell$  置为零。这样就实现了各发射射线的独立接收性。这是采用并行射线追踪算法的基础。

根据节点之间的关系射线追踪算法的并行模式可以分为两种：对等模式和主从模式。

## 3.2 并行系统的实现方式

### 3.2.1 对等模式

对等模式的射线追踪算法，就是将所有发射射线，平均分配给机群中的  $n$  个计算节点，当计算机追踪计算完各自分配的射线后，计算出这部分射线在所有接收点产生的场强，然后第 1, 2, 3, ...,  $n-1$  号处理器将结果传递回 0 号计算节点，由 0 号计算机对场强统一进行汇总。得到最终的总的预测值。图 3.1 描述了对等模式下，并行射线追踪算法的流程。从中可以看出，并行计算时间为



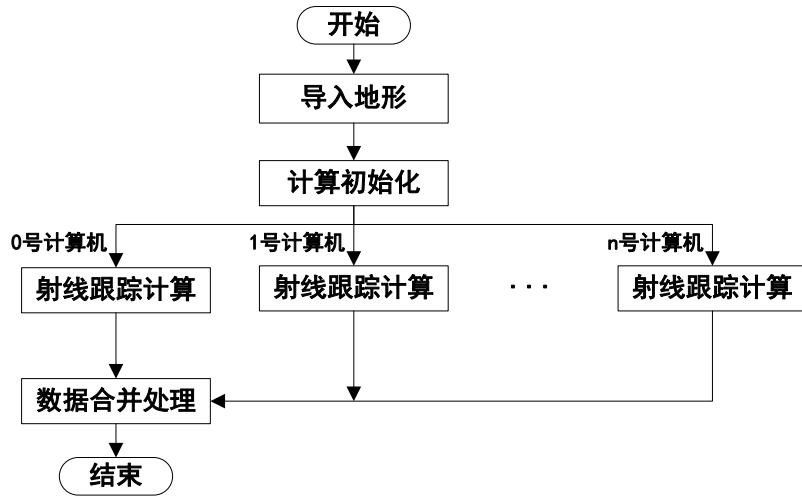


图 3.1. 对等模式下的执行过程图

$$T_{\text{总}} = \max \{T_{\text{射线追踪}} + T_{\text{场强计算}}\} + T_{\text{场强合并}}$$

假设有  $m$  条射线需要追踪，用  $n$  台计算机进行计算，其中  $\max \{T_{\text{射线追踪}} + T_{\text{场强计算}}\}$  是所有计算节点中花费的最长的时间。在理想情况下，各计算节点所需的时间相等。则：

$$\max \{T_{\text{射线追踪}} + T_{\text{场强计算}}\} = \frac{1}{n} (T_{\text{总射线追踪}} + T_{\text{总场强计算}})$$

在对等模式下，上式是难以实现的，因为射线追踪算法的耗时主要在绕射过程，一般情况下，所追踪的某条发射射线路径中有绕射情况发生时，追踪这条路径的时间是反射发生时的 100-10000 倍，对等模式的并行初始化时，按发射射线的数目平均分配给各计算节点，开始并不知道哪条发射射线会有绕射现象发生。这样，对于所有计算节点来说，虽然初始分配的发射射线数目是相同的，但是各自包含的有绕射发生的射线数目不同，也就是计算任务量不同，引起了计算时间的差异，由此，带来了负载不均衡，降低了并行加速增益。但是对等模式也有自己的优势。首先，编程简单，易于实现；其次，除处理器进程外，其他处理器进程仅在所分配的任务完成后，才和进程进行单向通信，因此通信效率高，特别适合于计算环境网络延时很大的情况。

### 3.2.2 主从模式

主从模式是一种以增加机群节点间通信为代价，来实现自适应动态任务分配的并行计算模式。图 3.2 给出了主从模式的流程图。从图中可知，参与并行计算的处理器包括一个主控制节点和  $n-1$  个计算节点。主控节点不参与射线追踪计算，它的任务在于控制整个并行计算过程，比如，动态分配任务给计算节点，收集并

合并计算节点的计算结果。计算节点的任务是接收主控节点分配的射线追踪任务单元，进行射线追踪和场强计算。

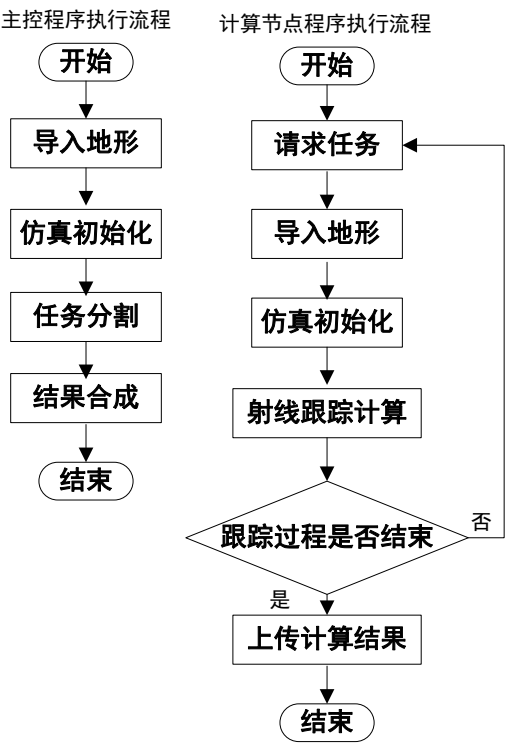


图 3.2. 主从模式下的执行过程图

主从模式的节点间通信是双向的。采用的是 Windows 平台新一代通信技术基础 WCF。当计算节点将某个任务单元追踪完毕后，立即向主控制节点发送任务请求同时将计算结果上传给主控节点，主控制节点响应此请求，并向该计算节点发送下一任务单元，如果所有射线任务单元都追踪完毕，主控制节点发送计算结束标志，此时计算节点将其计算得到的接收点场强发送给主控制节点，主控制节点完成场强合成工作。

主从模式由于采用了自适应动态的任务分配方式，可以获得更大的并行加速增益，从而较好的实现了负载均衡，最大限度的利用了网络内各处理器的功能。但是处理器进程间通信的成本却增加。

同时，由于主从模式是按照任务单元来分配工作量的，因此计算粒度的不同也会影响并行计算的效率。计算粒度，通信次数以及负载均衡三者是辩证矛盾的关系。计算粒度减小，负载均衡效果变好，每台从处理器对单个任务的处理时间减小，但是，由于总的任务一定，因此需要的通信次数会增加；反之，计算粒度增加，负载均衡的效果变差，每台从处理器对单个任务的处理时间增加，但需要的通信次数会减小。因此，主从模式下，并行计算必须考虑计算粒度对于算法计算时间的影响。

该并行仿真系统采用 WCF 实现的主从模式，按照接收机将任务进行分割。如图 3.3 所示，接收机实际上就是地形中的某个参考点。每个计算节点完成一个接收机场强的求解任务。

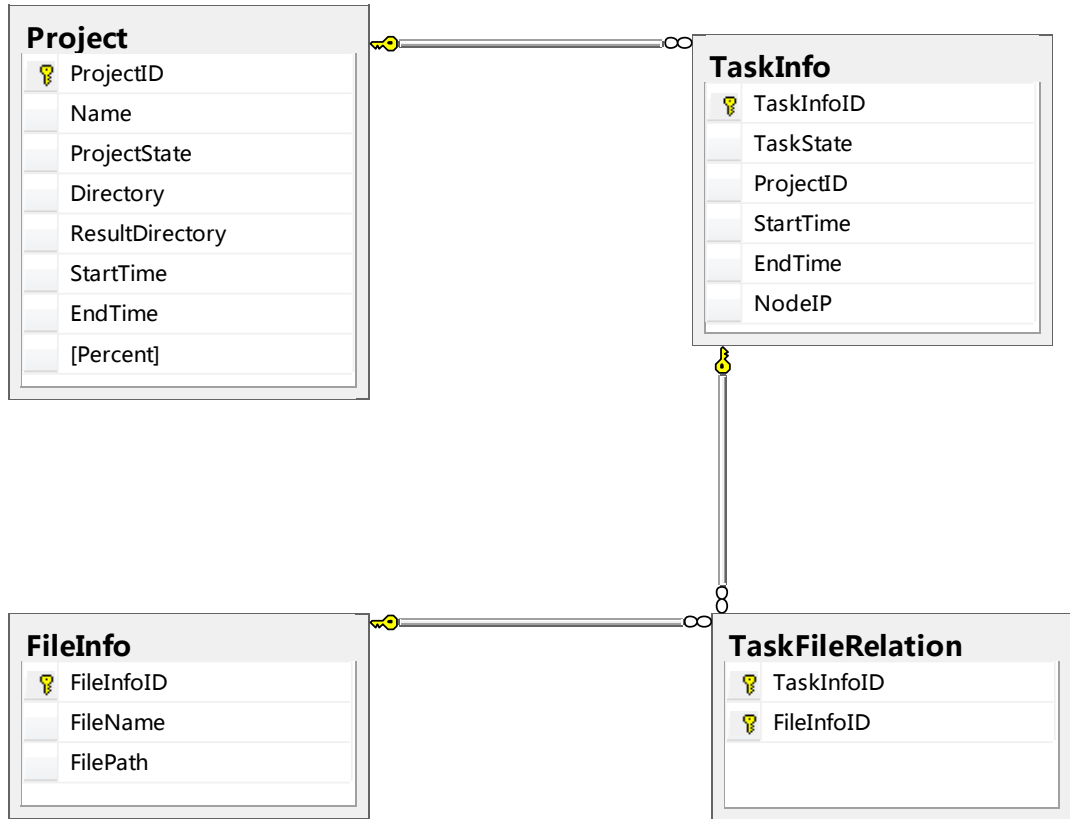


图 3.3. 主从模式下并行控制的数据库

仿真系统中，是用数据库进行并行控制的。上图中总共有四个表，表与表之间的关系如上所示。**Project** 表存储工程相关的信息，如项目名称、状态、存储路径、开始时间、结束时间等。**TaskInfo** 表中存储任务的相关信息，如任务状态、开始时间、结束时间，以及引用 **Project** 表的外键。**FileInfo** 存储文件的相关信息，如文件名、存储路径。本系统为数据库提供了灵活的接口设计。用户可调用 `getMetaData()` 获取表格式，并可通过 `setMetaData()` 更改上述 3 个表格的结构，例如添加一些用户自定义的列。这种设计可满足不同用户不同工程的要求，为本系统增强了可扩展性。由于本系统以文件作为数据的基础，因此一个任务可能设计多个文件的操作，而由于并行的需要，一个文件也可能被多个任务共用，表 **TaskInfo** 解决这种多对多的对应关系。

主控通过状态数据库并行控制的时序如图 3.4 所示：

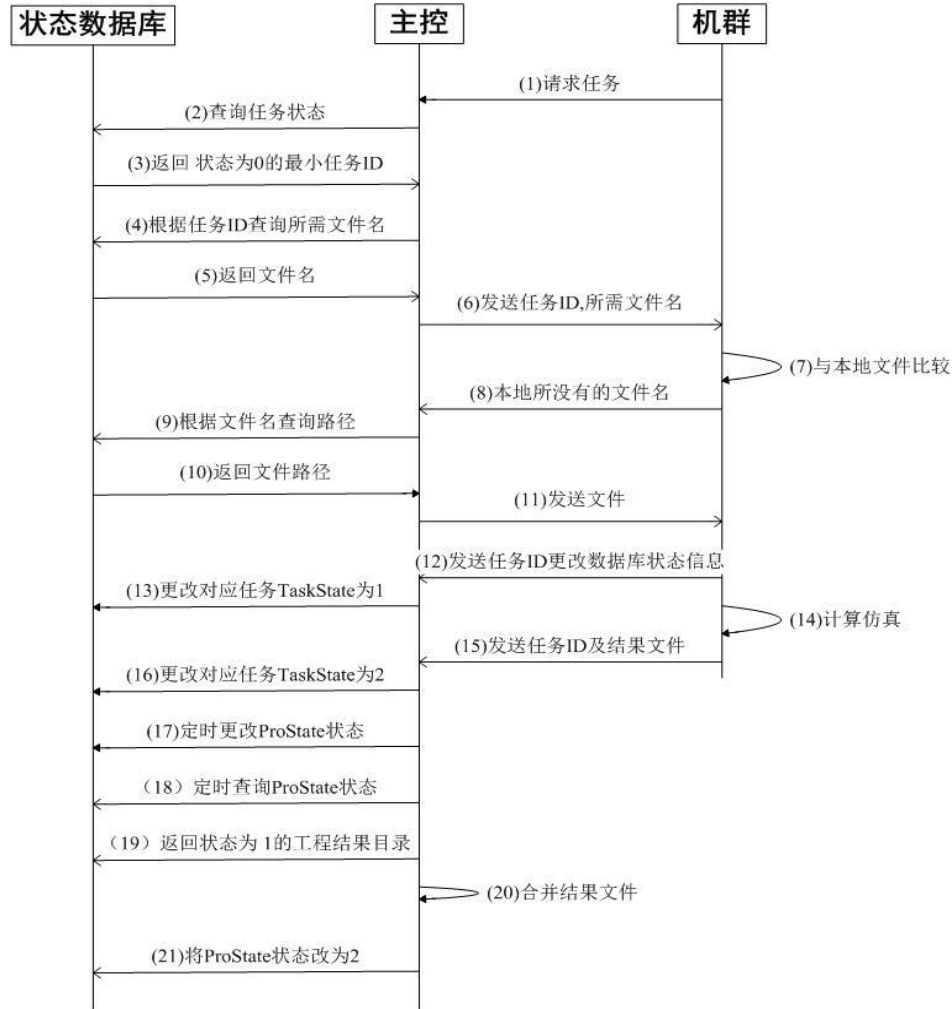


图 3.4. 并行控制的时序图

首先，子节点向主控请求任务，主控查询数据库得到待分配任务编号及所需文件，把文件发送给子节点。子节点调用用户定义的电磁计算程序，输入为所接收的文件，如地形、发射机、接收机文件，输出为计算结果文件，计算结束后，将结果发送给主控节点。相应的任务状态改为 2，表示任务已完成。主控节点会创建一个数据库监控线程，其任务为定时扫描所有任务状态，并将工程进程状况封装为借口，供 UI 调用。当某个工程任务全部完成后，将相应工程状态置为 1，表示工程计算完毕，等待文件整合。再由主控进行文件整合，整合后将工程状态置为 2，表示工程整合已完毕。

### 3.3 主控对任务的拆分

主控作为核心控制单元，负责将 UI 已配置好的工程文件进行计算分发，并将计算结果存储，传送到 UI 进行显示，其主要功能分为三个部分：文件拆分与合并、监控数据库状态、提供 WCF 服务。主控的主要工作流程如图 3.5 所示。

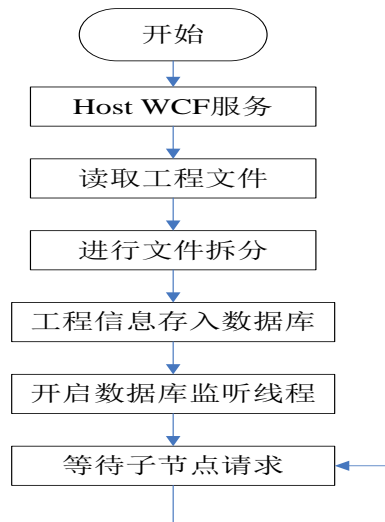


图 3.5 主控工作流程图

UI 建模完成后，将工程文件夹传送到主控端，主控按照一定的算法将文件进行分割，然后把文件的相关信息插入到相应的数据库中，分割后的文件按照一定的时序传送至三个子节点进行计算。

将.tx 文件进行拆分，即将包含 N 个发射机的.tx 文件拆分为 N 个只包含一个发射机的.tx 文件。文件拆分算法描述，其流程图如图 3.6 所示。

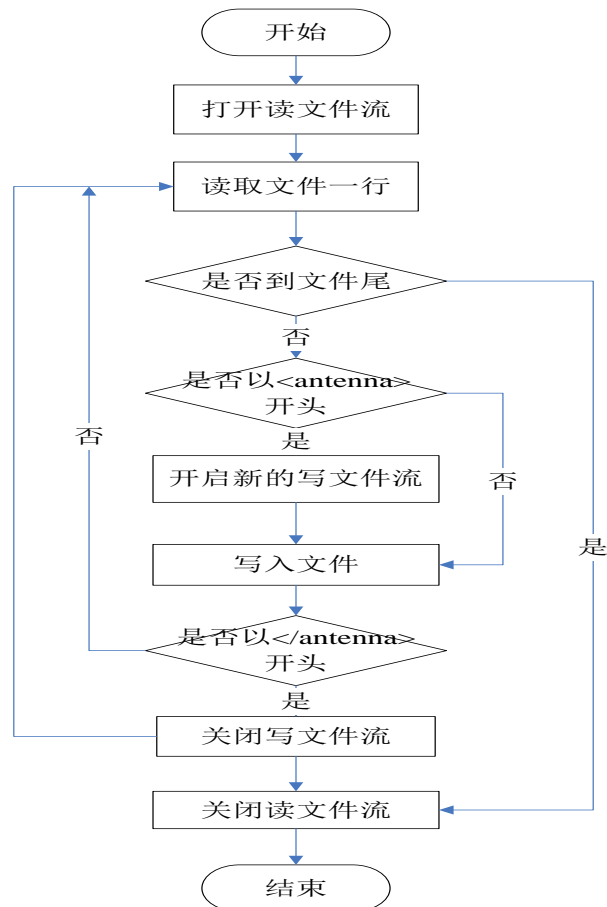


图 3.6 拆分文件流程图

子节点计算完成后，将相关文件传送到主控端，主控端一则要更改数据库的信息，二则要将相应的文件按照一定的算法进行整合，得到一个计算处理后的文件，然后主控将该工程文件传送到 UI 进行显示和分析。

子节点仿真得到两个.tx 文件，需要合并的是电场强度的模值，实部和虚部三部分，文本文件在内存中存放的是相应字符的 ASCII 码值。进行合并时必须转化为相应的数值，再进行处理，将处理后的结果转化为 ASCII 码存储。

现截取部分文件 total.tx 做为说明：

```
1 -0.3615063E-04 0.7536472E-04 2.000 3374.14 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
2 0.4999997E+02 0.7536472E-04 257.000 3313.73 6.94890E-06 1.19306E-06 -6.84572E-06
3 0.9999996E+02 0.7536472E-04 257.000 3264.19 6.55443E-06 6.48606E-06 9.44250E-07
4 0.1500000E+03 0.7536472E-04 257.000 3214.67 5.46769E-06 -3.24799E-06 -4.39843E-06
5 0.2000000E+03 0.7536472E-04 257.000 3165.16 4.69674E-06 1.51709E-06 -4.44498E-06
6 0.2500000E+03 0.7536472E-04 257.000 3115.67 4.04842E-06 -4.04832E-06 -2.77800E-08
7 0.3000000E+03 0.7536472E-04 257.000 3066.19 2.58998E-06 -1.05614E-06 -2.36486E-06
8 0.3500000E+03 0.7536472E-04 257.000 3016.73 2.31083E-06 2.12394E-06 9.10400E-07
9 0.4000000E+03 0.7536472E-04 257.000 2967.29 2.39969E-06 2.34514E-06 5.08743E-07
10 0.4500000E+03 0.7536472E-04 257.000 2917.87 3.03579E-06 2.84614E-06 -1.05619E-06
11 0.5000000E+03 0.7536472E-04 257.000 2868.47 2.78854E-06 2.52956E-06 1.17358E-06
12 0.5499999E+03 0.7536472E-04 257.000 2819.09 9.27159E-07 5.42300E-07 -7.52020E-07
```

截取部分文件 1.tx 做说明：

```
1 -0.3615063E-04 0.7536472E-04 2.000 847.31 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
2 0.4999997E+02 0.7536472E-04 257.000 761.79 0.67765E-05 0.15685E-05 -0.65925E-05
3 0.9999996E+02 0.7536472E-04 257.000 722.44 0.63961E-05 0.62524E-05 0.13481E-05
4 0.1500000E+03 0.7536472E-04 257.000 684.48 0.58196E-05 -0.37231E-05 -0.44729E-05
5 0.2000000E+03 0.7536472E-04 257.000 648.16 0.50354E-05 0.12673E-05 -0.48734E-05
6 0.2500000E+03 0.7536472E-04 257.000 613.77 0.40686E-05 -0.40328E-05 -0.53918E-06
7 0.3000000E+03 0.7536472E-04 257.000 581.65 0.30236E-05 -0.92890E-06 -0.28774E-05
8 0.3500000E+03 0.7536472E-04 257.000 552.19 0.22060E-05 0.21752E-05 0.36745E-06
9 0.4000000E+03 0.7536472E-04 257.000 525.84 0.21075E-05 0.21075E-05 -0.21675E-08
10 0.4500000E+03 0.7536472E-04 257.000 503.10 0.25617E-05 0.22760E-05 -0.11755E-05
11 0.5000000E+03 0.7536472E-04 257.000 484.47 0.28569E-05 0.22797E-05 0.17218E-05
12 0.5499999E+03 0.7536472E-04 257.000 470.43 0.25829E-05 0.23096E-05 -0.11563E-05
```

截取部分文件 2.tx 做说明：

```
1 -0.3615063E-04 0.7536472E-04 2.000 3374.14 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
2 0.4999997E+02 0.7536472E-04 257.000 3313.73 0.45285E-06 -0.37544E-06 -0.25322E-06
3 0.9999996E+02 0.7536472E-04 257.000 3264.19 0.46657E-06 0.23366E-06 -0.40385E-06
4 0.1500000E+03 0.7536472E-04 257.000 3214.67 0.48091E-06 0.47511E-06 0.74469E-07
5 0.2000000E+03 0.7536472E-04 257.000 3165.16 0.49592E-06 0.24979E-06 0.42842E-06
6 0.2500000E+03 0.7536472E-04 257.000 3115.67 0.51164E-06 -0.15524E-07 0.51140E-06
7 0.3000000E+03 0.7536472E-04 257.000 3066.19 0.52810E-06 -0.12724E-06 0.51254E-06
8 0.3500000E+03 0.7536472E-04 257.000 3016.73 0.54537E-06 -0.51263E-07 0.54295E-06
9 0.4000000E+03 0.7536472E-04 257.000 2967.29 0.56348E-06 0.23764E-06 0.51091E-06
```

10	0.4500000E+03	0.7536472E-04	257.000	2917.87	0.58249E-06	0.57014E-06	0.11931E-06
11	0.5000000E+03	0.7536472E-04	257.000	2868.47	0.60247E-06	0.24986E-06	-0.54822E-06
12	0.5499999E+03	0.7536472E-04	257.000	2819.09	0.18130E-05	-0.17673E-05	0.40428E-06

上述三个文件的后三列分别为模值，实部和虚部，因此只需将后三列合并，其余列按照 2.tx 照抄。

### 3.4 主控和数据库的交互

文件的相关信息存放在数据库中，每当文件的信息发生改变时，就要修改数据库。当主控刚收到要处理的工程文件时，便要将文件的相关信息插入到数据库中；当主控将分割后的工程文件传送到子节点时，要修改数据库的状态；当主控收到子节点处理后的文件时，将要删除一些数据库的信息。

为了实时监视数据库的状态，因此需要另一个线程实时追踪数据库的状态，当数据库的状态表示所有任务已经完成了时，该线程会自动将该合并的文件合并。此线程应该放在 Windows 服务中，而不放在 WCF 服务中，此线程需要调用数据库操作的一些方法来更改数据库的状态。先将这些方法介绍如下：

.NET 的多线程程序是建立在 Thread 类的基础上，该类中定义了一些管理线程的一些方法和属性。自定义的一些方法如下：

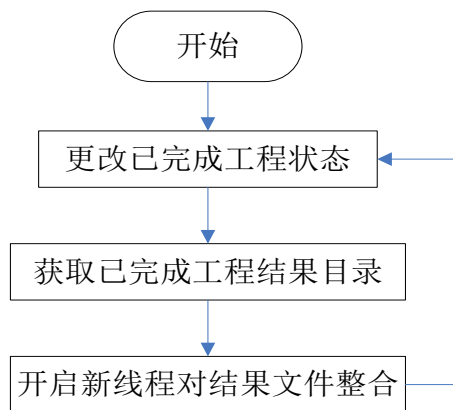


图 3.7 数据库监控线程工作流程图

在服务器端处选择 Windows 服务做为 WCF 的宿主程序，以方便进行服务的管理 WCF 提供以下接口与子节点进行通信 `int iGetMinTaskID()`;通过调用此方法返回将要处理的任务的唯一标识 ID 号。

`string[] iGetFileName(long TaskID)`;此方法的主要作用是返回正在运行的任务所包含的所有文件的名字

`string[] iGetFilePath(string[] filenames)`;此方法的主要作用是返回将要处理的所有文件的具体路径。

`string GetData(string path);` 客户端通过调用此方法将要处理的文件从服务器端下载至本地。

`int iChangeTaskState(int TaskID, short state);`此方法的主要作用是用于更改任务的状态，从 0 变为 1 表示此任务正在处理之中。

`string iGetDirectory(int TaskID);`通过调用此方法返回已处理好文件要上传到服务器端的路径。

`void PutData(string path,string name,string putStr);`客户端通过调用此方法将在计算节点处理后的文件上传至服务器端。

### 3.5 计算节点和主控的交互

在子节点选择使用 Windows 服务运行客户端，使得子节点一直处于处理和请求任务的状态。客户端使用在主控端上的 WCF 服务，调用 WCF 服务的接口进行工程文件及相关文件下载、数据库操作和工程计算等操作。

子节点首先判断本节点是否正在进行计算，如果本节点空闲则从服务器端请求任务，如果服务器长时间没有响应则重新请求，请求成功后从数据库中读取相应的文件的信息，然后判断本地是否存在该文件，如果存在则不会下载文件，否则下载该文件，修改数据库的状态并调用计算模块进行仿真计算，将计算后的结果及文件再传送至主控。具体的流程如图 3.8 所示：

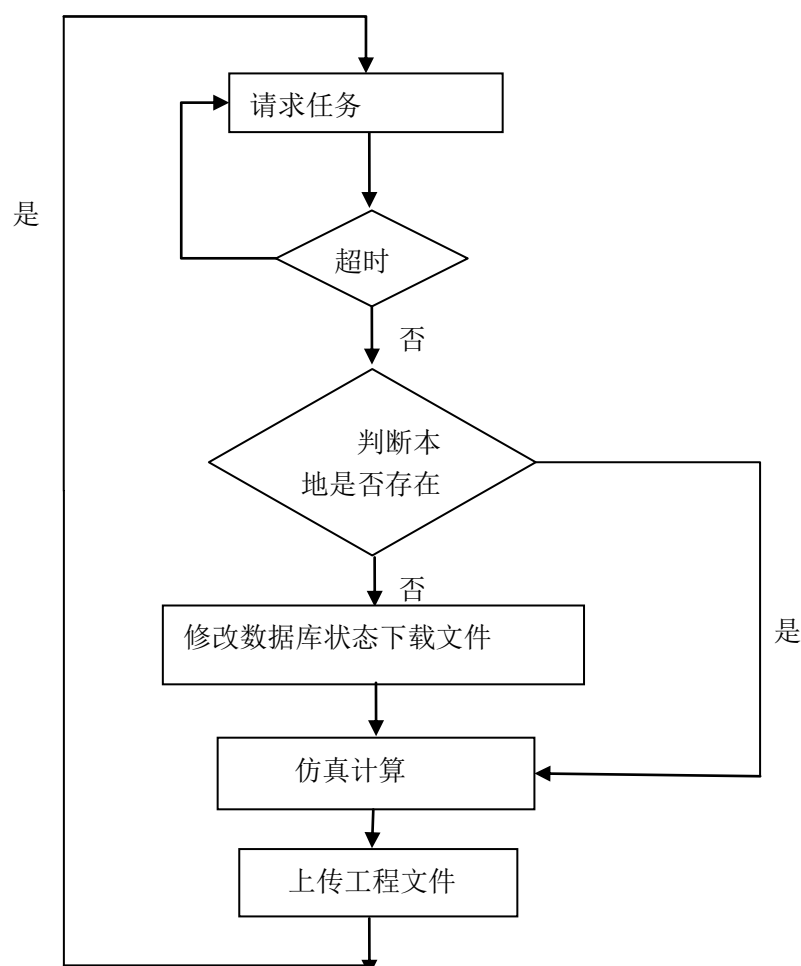




图 3.8 计算节点的流程图

仿真计算部分由主程序调用已封装好的计算模块来实现。

计算模块通过调用 WI 提供的 API 对输入数据包括 .ter, .rx, .tx, .setup 文件进行计算，并将计算结果保存到.p2m 文件中。计算模块用 C++控制台程序来实现。

### 3.6 计算机间的数据传输

WCF(Windows Communication Foundation)是基于 Windows 平台下开发和部署服务的软件开发包 (Software Development Kit, SDK)，是 Microsoft 为构建面向服务的应用 SOA 提供的分布式通信编程框架，使用该框架，可以构建跨平台、安全、可靠和支持事务处理的企业级互联应用解决方案。

WCF 继承了 SOA 体系结构的优点。服务提供者通过服务契约(接口)向服务消费者提供服务，将服务的实现与服务的内容分离，为构建松耦合的分布式应用提供了支持。。WCF 采用 SOAP 协议传输，与异构平台具有很好的交互性。它与 .NET 平台相结合，兼容了 .NET 平台已有的分布式处理技术如 .NetRemoting、MSMQ、Web Service、WSE 等，使用 WCF 建立的应用程序可以跨越进程、机器、子网、企业网和 Internet 进行通信，并以统一模式构建分布式处理系统，适合不同需求的应用环境，其特点总结如下：

- 1) 与现有 Windows 平台上的分布式技术兼容，减少了开发维护成本。
- 2) 与异构平台有良好的互操作性。
- 3) 基于属性的开发模式，最大程度简化了开发。
- 4) 采用 SOA 架构，迅速构建松耦合企业应用。
- 5) 采用可配置的模式，可以适应多种不同环境。
- 6) 可以采用多种编程语言，灵活性好。
- 7) 内部集成了对安全、事务处理和可靠性传输的支持。

WCF 通信模型如图 3.9 所示，客户端与服务端通过消息在匹配的访问点之间进行交互，基于消息的通信机制是 SOA 架构的特点。在 WCF 中通过访问点实现了服务提供者和服务消费者之间的消息通信的细节，它屏蔽底层通信机制的复杂性，通过配置文件或编码的方式设置访问点可以无需重新编译适应不同应用场合。

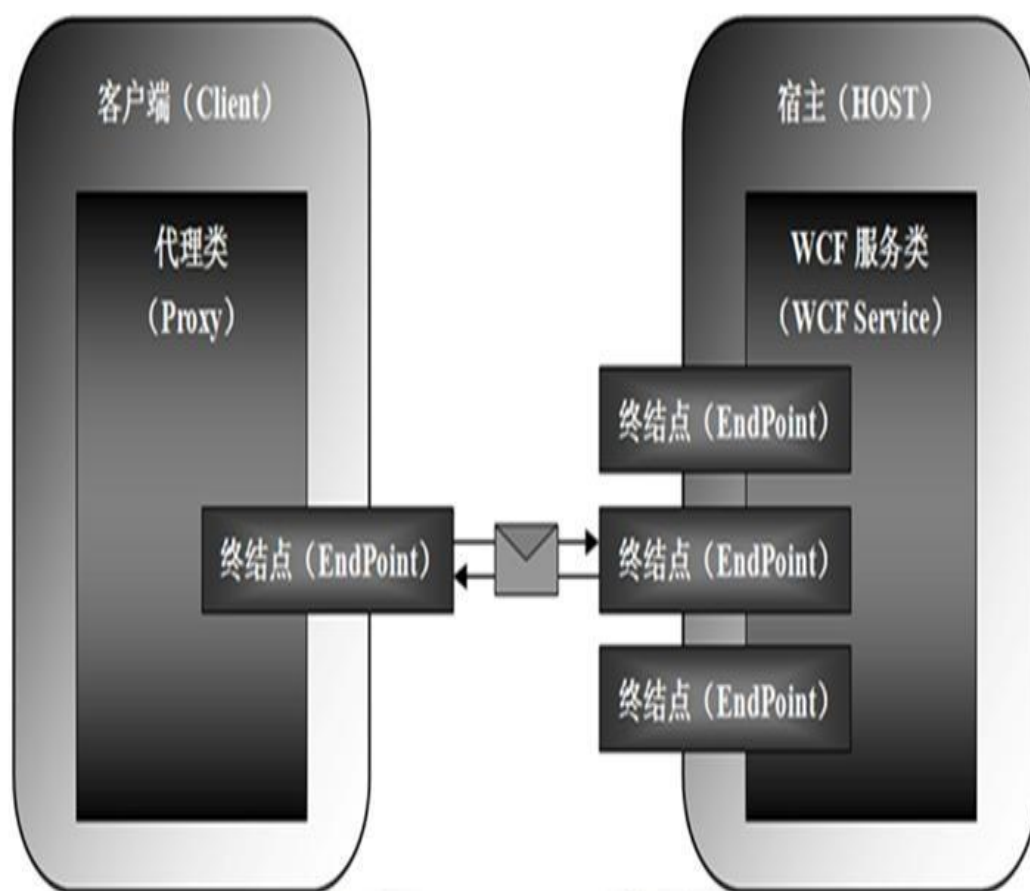


图 3.9. WCF 的通信模型

WCF 访问点是实现消息交换的基础，客户端与服务端是通过匹配的访问点进行消息交互。服务端所提供的服务对外表现为所发布的访问点集。访问点的内容包含了地址(Address)、绑定(Binding)和契约(Contract)。

地址指定提供服务的访问点所在的位置。它描述了所采用的通讯协议、服务所在主机的位置和端口以及用来服务的标识。WCF 所支持的通讯协议有：HTTP、TCP、Peernetwork、IPC(Inter—Process Communication over namedpipes)和 MSMQ。地址形式可表示为：

[传输协议]://[主机地址]:[端口]/服务标识符

例如：http://localhost: 8000/service。与访问点中的其它属性一样，可以通过配置文件或编码的方式对地址设定，在实际应用中一般采有配置文件实现以适应不同的环境。

绑定设置了消息通信的细节。通过它可以设置消息通信采用的协议、消息编码的方式(文本、二进制或 MTOM)、传输安全性以及消息安全通信的机制。表 5-2 给出了 WCF 中几种绑定的特点。

名称	协议	编码方式	交互性
BasicHttpBinding	HTTP/HTTPS	Text/Mtom	Yes
NetTcpBinding	TCP	Binary	No
NetMsmqBinding	MSMQ	Binary	No
NetNamedPipeBinding	IPC	Binary	No

表 3-9. WCF 的各种绑定方式

WCF 通过契约暴露某个 WCF 服务提供的函数，消息交换的结构与模式(如 Request / Response)。契约以标准的，体系结构中立的方式描述了服务的具体内容。WCF 定义了以下类型契约：

- 1) 服务契约(Service Contract)：定义 WCF 服务被调用时执行的操作。通过设置对应的属性可以实现服务的不同形式，典型的服务契约如下所示：

```
[ServiceContract]
public interface IService
{
    [OperationContract]
    String Fun();
}
```

- 2) 数据契约(Data Contract)：定义服务传递的数据类型。
- 3) 消息契约(Message Contract)：提供在消息创建时控制消息头信息的能力。

# 第四章 数据库的设计

## 4.1 数据库物理模型设计

数据库主要由工程(project)、任务（Task）、文件（File）三个层次组成，其主要物理模型如图 4.1 所示。

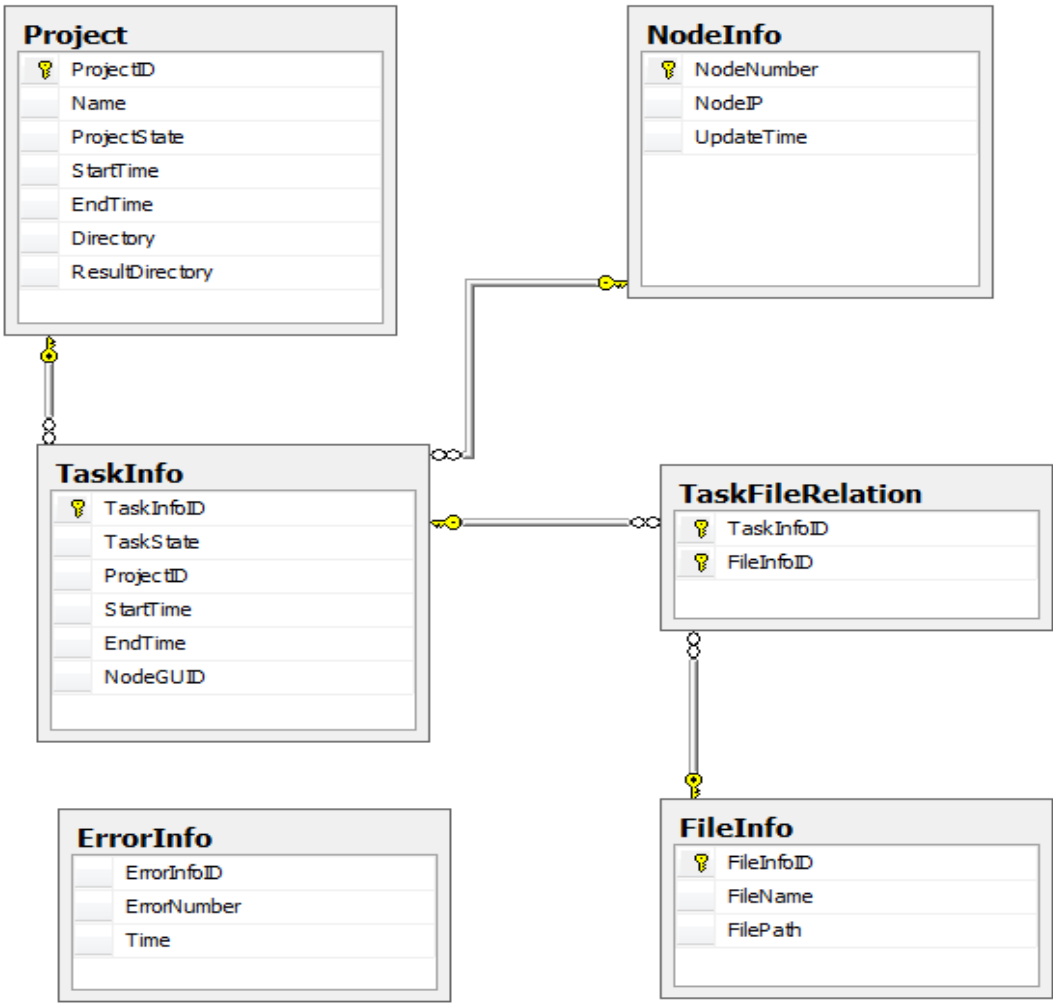


图 4.1 数据库物理模型

最外层 Project 存储工程相关信息，如项目名称、状态、存储路径、开始时间、结束时间等。TaskInfo 表中存储任务相关信息，如任务状态、开始时间、结束时间，还有引用到 Project 表格的外键。FileInfo 存储文件相关的信息，如文件名、存储路径。本系统为数据库提供了灵活的接口设计。用户可调用 getMetaData() 获取表格式，并可通过 setMetaData() 更改上述三个表格的结构，添加一些用户自定义的列，如在 Project 表中添加描述信息等。这种灵活性可满足不同用户不同工程的需求，为本系统增强了可扩展性。由于本系统以文件作为数据的基础，因

此一个任务可能设计多个文件的操作，而由于并行的需要，一个文件也有可能被多个任务共用，表 **TaskFileRelation** 解决了这种多对多的关系。

表 **NodeInfo** 存储节点相关信息，如节点编号、节点 IP、节点更新时间。为了使控制节点与计算分节点间的通信更可靠，故障更容易排查，计算节点会定时向控制节点发送信息，确认其工作状态。**TaskInfo** 表格有 FK（外键）引用到 **NodeInfo** 以存储该任务的分配节点号。

表 **ErrorInfo** 存储用户自定义的计算模块返回的错误信息，有助于错误处理与控制。

## 4.2 数据库表设计

数据库 **ParallelTask** 共由三部分组成：

（1）发射源数据部分共由 **WaveForm**(波形)、**Antenna**(天线)、**Transmitter**(发射源)三张表组成，其数据模型如图 4.2 所示。

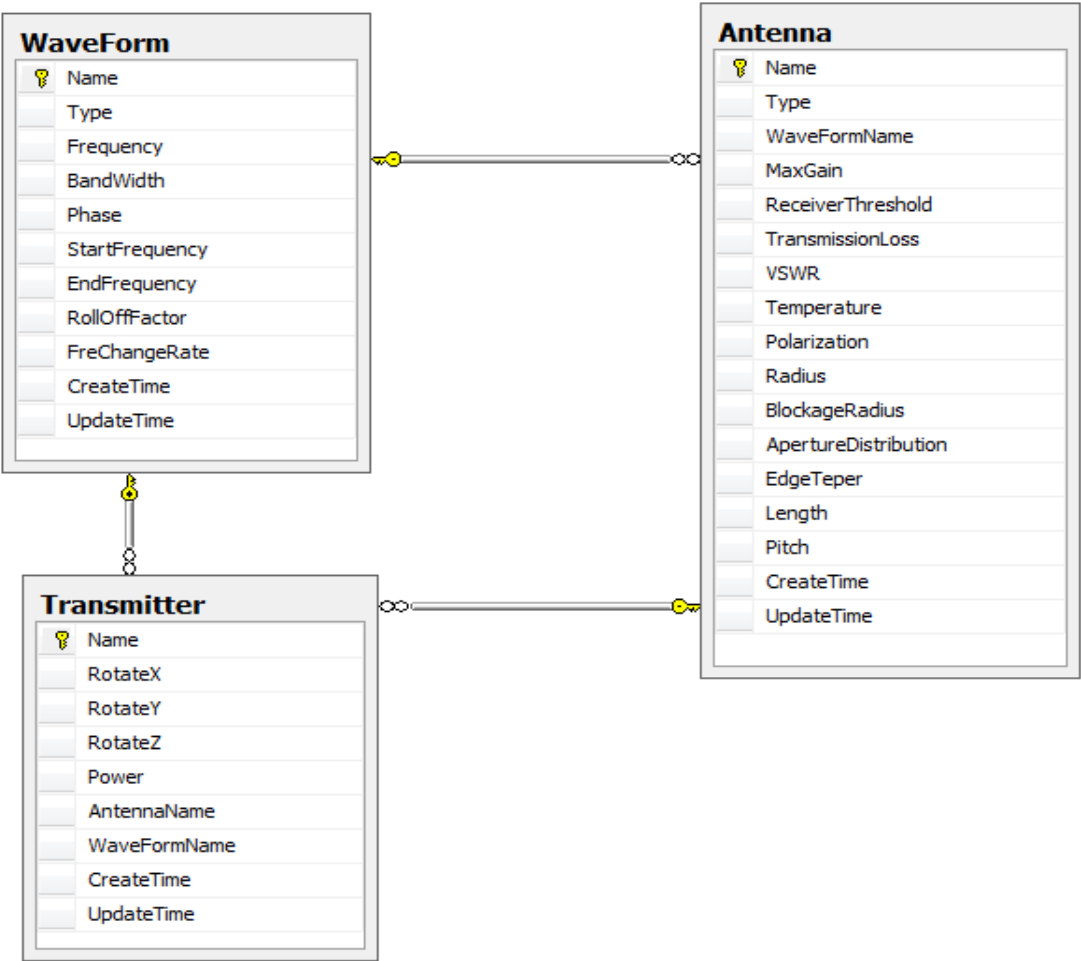


图 4.2 辐射源数据物理模型图

（2）地形信息数据部分由表 **TerInfo**(地形信息)构成。如图 4.3 所示

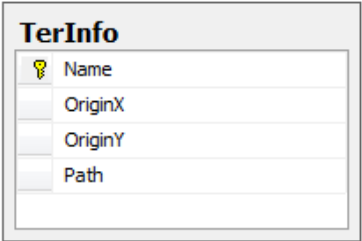


图 4.3 地形信息数据物理模型图

(3)并行计算任务数据共由 Project(工程信息)、TaskInfo(任务信息)、FileInfo(文件信息)、TaskFileRelation(任务文件关系)、NodeInfo(节点信息)五张表组成，其数据模型如图 4.4 所示。

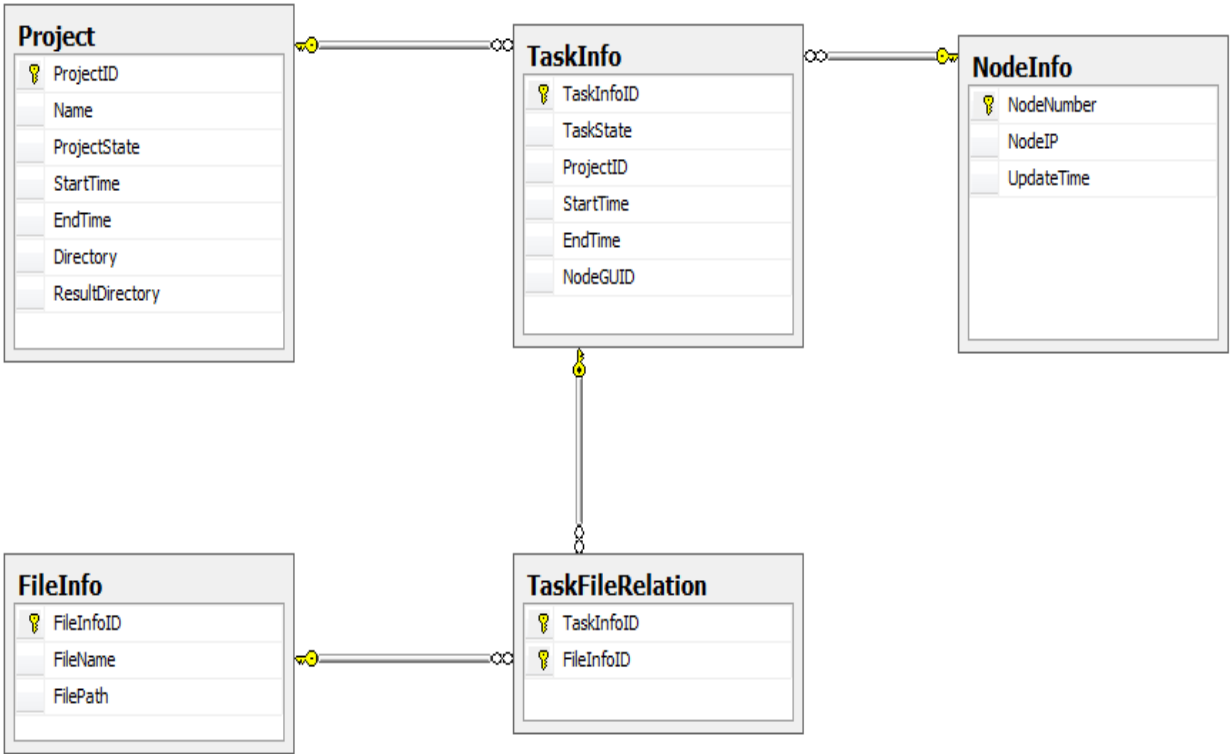


图 4.4 并行计算任务数据模型图

### 4.2.1 具体表设计

WaveForm				
波形信息表。				
字段名	中文描述	字段类型	IsNull	主外键
Name	波形名称	nvarchar(64)	N	PK
Type	波形类型	nvarchar(32)	N	
Frequency	频率	float	N	

BandWidth	带宽	float	N	
Phase	相位	float		
StartFrequency	起始频率	float		
EndFrequency	截止频率	float		
RollOffFactor	滚降系数	float		
FreChangeRate	频率变化率	nvarchar(16)		
CreateTime	创建时间	datetime		
UpdateTime	更新时间	datetime		
详细描述：				
本表为波形详细参数信息表。				

Antenna				
天线信息表				
字段名	中文描述	字段类型	IsNull	主外键
Name	天线名称	nvarchar(64)	N	PK
Type	天线类型	nvarchar(32)	N	
WaveFormName	波形名称	nvarchar(64)	N	FK
MaxGain	最大增益	float	N	
Polarization	极化方向	nvarchar(32)	N	
ReceiverThreshold	接收门限值	float	N	
TransmissionLoss	传输损耗	float	N	
VSWR	VSWR	float	N	
Temperature	温度	float	N	
Radius	反射面半径	float		
BlockageRadius	馈源面半径	float		
ApertureDistribution	孔径分布方式	nvarchar(32)		
EdgeTaper	?	float		
Length	长度	float		
Pitch	螺纹宽度	float		
CreateTime	创建时间	datetime		
UpdateTime	更新时间	datetime		
详细描述：				
本表为天线详细参数信息表。				

Transmitter				
发射源信息表				
字段名	中文描述	字段类型	IsNull	主外键
Name	发射源名称	nvarchar(64)	N	PK
RotateX	旋转角 X 方向分量	float	N	
RotateY	旋转角 Y 方向分量	float	N	
RotateZ	旋转角 Z 方向分量	float	N	
AntennaName	天线名称	nvarchar(64)	N	FK
WaveFormName	波形名称	nvarchar(64)		FK
Power	功率	float	N	
CreateTime	创建时间	datetime		
UpdateTime	更新时间	datetime		
详细描述：				
本表为发射源详细参数信息表。				

Project				
工程信息表				
字段名	中文描述	字段类型	IsNull	主外键
ProjectID	工程 ID	int	N	PK
Name	工程名称	nvarchar(64)	N	
ProjectState	工程状态	smallint	N	
StartTime	工程开始时间	datetime		
EndTime	工程结束时间	datetime		
Directory	工程存储目录	nvarchar(64)	N	
ResultDirectory	结果文件存储目录	nvarchar(64)	N	
详细描述:				
字段 ProjectState 可取值 0——未开始 1——已完成，结果待处理 2——结果已处理完				

TaskInfo				
任务信息表				
字段名	中文描述	字段类型	IsNull	主外键
TaskInfoID	任务 ID	int	N	PK
TaskState	任务状态	smallint	N	
StartTime	任务开始时间	datetime		
EndTime	任务结束时间	datetime		
NodeGUID	分配节点 GUID 值	uniqueidentifier		
ProjectID	工程 ID	int	N	FK
详细描述:				
字段 TaskState 可取值 0——未开始 1——已分配，结果未返回 2——结果已返回				

FileInfo				
文件信息表				
字段名	中文描述	字段类型	IsNull	主外键
FileInfoID	文件 ID	int	N	PK
FileName	文件名	nvarchar(64)	N	
FilePath	文件路径	nvarchar(64)	N	
约束说明:				
UNIQUE: FileName				
详细描述:				
描述工程中所有需要的文件				

TaskFileRelation				
任务文件关系表				
字段名	中文描述	字段类型	IsNull	主外键
FileInfoID	文件 ID	int	N	PK
TaskInfoID	任务 ID	int	N	PK
触发器说明:				
详细描述:				



本表为连接表，连接 FileInfo 和 TaskInfo
-------------------------------

## 4.2.2 表之间的关联设计

表 1	表 2	关联	主键	外键
WaveForm	Antenna	一对多	WaveForm.Name	WaveFormName
Antenna	Transmitter	一对多	Antenna.Name	AntennaName
WaveForm	Transmitter	一对多	WaveForm.Name	WaveFormName
Project	TaskInfo	一对多	Project.ProjectID	TaskInfo.TaskInfoID
FileInfo	TaskFileRelation	一对多	FileInfo.FileInfoID	TaskFileRelation.FileInfoID
NodeInfo	TaskInfo	一对多	NodeInfo.NodeNumber	TaskInfo.NodeGUID
TaskInfo	TaskFileRelation	一对多	TaskInfo.TaskInfoID	TaskFileRelation.TaskInfoID

## 4.3 存储过程设计

下面介绍几个重要的存储过程：

名称	createProject		
描述	向 Project 表中插入一条记录		
引用表格	Project		
输入参数	中文描述	字段类型	默认值
@Name	工程名	Nvarchar(64)	无
@Directory	工程路径	Nvarchar(64)	无
@ResultDirectory	工程结果路径	Nvarchar(64)	无
输出参数	中文描述	字段类型	默认值
无			

名称	createFileInfo
描述	向 FileInfo 表中插入一条记录

引用表格	FileInfo		
输入参数	中文描述	字段类型	默认值
@FileName	文件名	nvarchar(64)	无
@FilePath	文件路径	Nvarchar(64)	无
输出参数	中文描述	字段类型	默认值
无			

名称	createTask		
描述	插入一条任务记录		
引用表格	Project、TaskInfo、TaskFileRelation、FileInfo		
输入参数	中文描述	字段类型	默认值
@ProName	工程名	nvarchar(64)	无
@FileNames	文件名组合	Nvarchar(MAX)	无
输出参数	中文描述	字段类型	默认值
无			

名称	setTaskStae		
描述	将表 TaskInfo 中的字段 TaskStae 设置为相应值		
引用表格	TaskInfo		
输入参数	中文描述	字段类型	默认值
@TaskInfoID	TaskInfoID	Int	无
@TaskState	任务状态	smallint	无
输出参数	中文描述	字段类型	默认值
无			

名称	getTasks		
描述	获取 TaskState 为某值的所有 TaskInfoID		
引用表格	TaskInfo		
输入参数	中文描述	字段类型	默认值
@TaskState	任务状态	smallint	无
输出参数	中文描述	字段类型	默认值
无			

名称	setProjectState		
描述	设置工程状态为某值		
引用表格	Project		
输入参数	中文描述	字段类型	默认值
@ProjectID	ProjectID	Int	无
@ProjectState	工程状态	smallint	无
输出参数	中文描述	字段类型	默认值
无			
名称	getMinTaskInfoID		
描述	获取 state=0 的最小的 TaskInfoID		
引用表格	TaskInfo		
输入参数	中文描述	字段类型	默认值
无			
输出参数	中文描述	字段类型	默认值
@TaskInfoID	TaskInfoID	int	0

## 4.4 数据库性能分析

在并行计算中，主要从并发性、容错能力、负载平衡来分析系统性能。

系统中采用节点主动请求任务的方式进行任务的分配，由此可能产生多个节点同时请求同一任务的情况。为避免这种情况发生，将节点请求任务的存储过程 **GetMinTask** 设置为事务处理，事务中首先获取状态为 0 的最小任务，而后将任务状态置为 1，由此可避免此情况发生。

并行计算中，由于系统的复杂性，会产生很多错误，如网络中断、文件传输错误、计算错误等。系统容错能力是衡量系统性能的重要标准。其中一个子节点故障对整个系统的性能影响是重要的衡量指标。本系统中采用灵活的任务分配策略，在 **TaskInfo** 表格中有两列 **StartTime** 和 **EndTime**，当调用存储过程 **GetMinTask** 时即记录此时间到 **StatTime** 列，并设置一段时间间隔，可根据任务量来确定此时间间隔，记录 **StartTime**+时间间隔的值存入 **EndTime** 字段。主控设置一个定时器，每隔一段时间，对比 **TaskInfo** 中状态为 1 的记录的 **EndTime** 与当前时间的值，如果 **EndTime** 小于当前时间，则将对对应记录的 **TaskInfo** 表中状态字段置为 0，重新进行任务的分配。

本系统采用节点主动请求任务的执行方式，从一定程度上避免了主控分配任务的盲目性。在节点计算完成前，不会请求新的任务，因此不会出现节点计算任务过多或多少的情况。

## 第五章 仿真实例分析

### 5.1 仿真建模

本系统选择北京邮电大学校内从主楼到西门以及三号教学楼和四号教学楼之间的区域作为仿真模拟场景。场景中包含了三座教学楼，一座石雕和一个门楼，场景建模 3D 模型如图 5.1 所示：

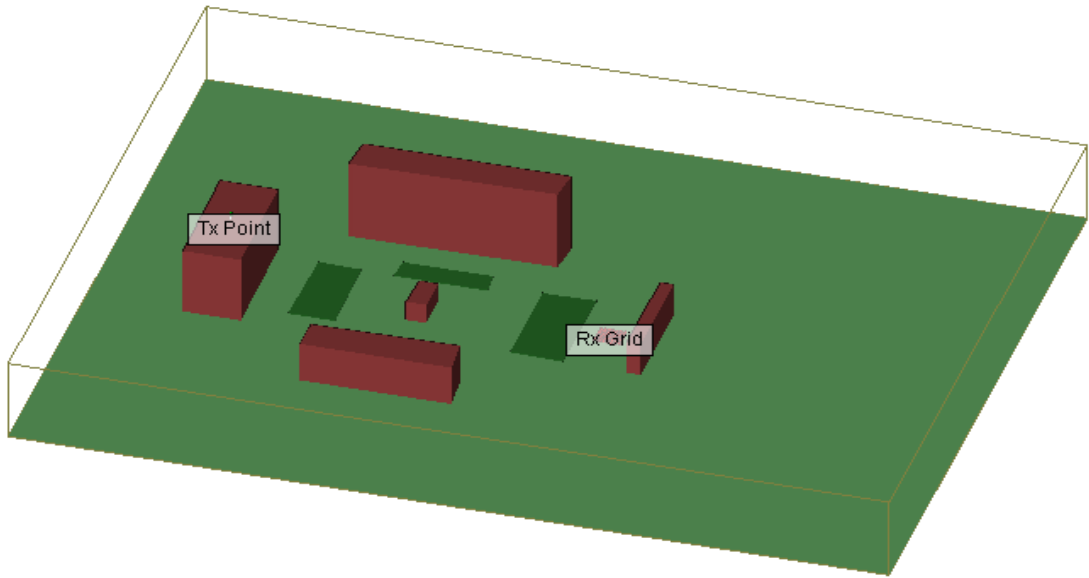


图 5.1 3D 仿真模型图

2D 模型显示如图 5.2 所示：

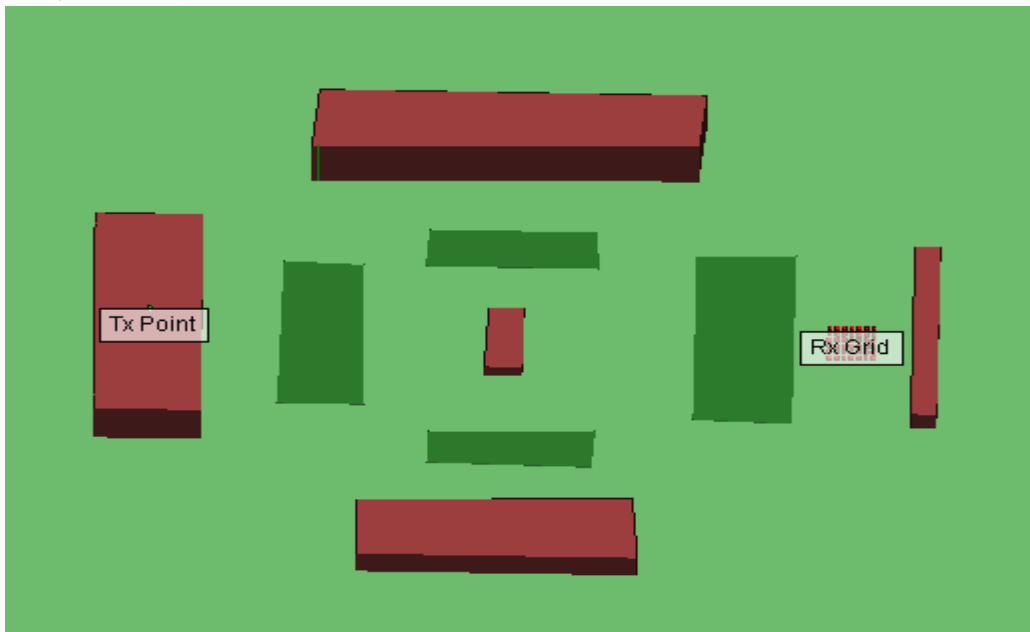


图 5.2 2D 仿真模型图

5.2 仿真参数设置

5.2.1 辐射源参数设置

仿真模拟场景中添加了一个辐射源，位于主楼楼顶之上。其参数如表 5.1 所示：

Name	Input Power (dBm)	Antenna	Waveform	Coordinate System	Location
Tx Point	43	Half-wave dipole	Sinusoid	Cartesian	X=-6.2864 Y=-423.0820 Z=110.0000

表 5.1 辐射源参数

辐射源中使用的波形及天线模型参数如表 5.2 和 5.3 所示：

Type	Frequency	Bandwidth
Sinusoid	1000.0MHz	1.0MHz

表 5.2 波形参数

Type	Polarization	VSWR	Waveform
Half-wave dipole	Vertical	1.0	Sinusoid

表 5.3 天线参数

5.2.2 观察区域参数设置

在北京邮电大学的西门楼前设置观察区域矩阵 RX Grid，如图 5.3 所示：

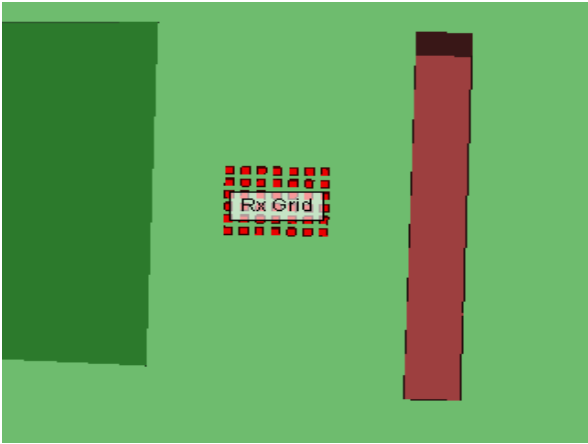


图 5.3 观察区域

观察区域接收机点参数设置如表 5.4：

Name	Antenna	Waveform	Coordinate System	Spacing	Number
Rx Grid	Half-wave dipole	Sinusoid	Cartesian	5.0	42

表 5.4 接收机参数

## 5.3 仿真结果显示与分析

### 5.3.1 仿真结果显示

仿真计算结束以后，到达接收机的射线分布如图 5.4:

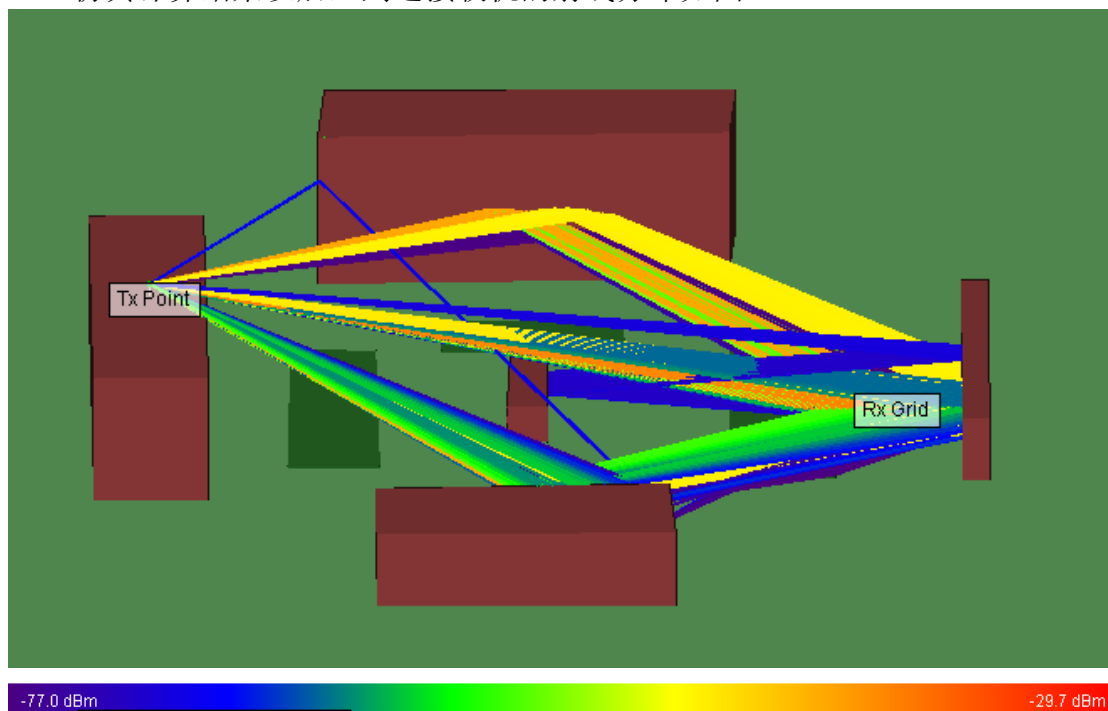


图 5.4 射线分布图

接收机的场强分布如图 5.5 所示:

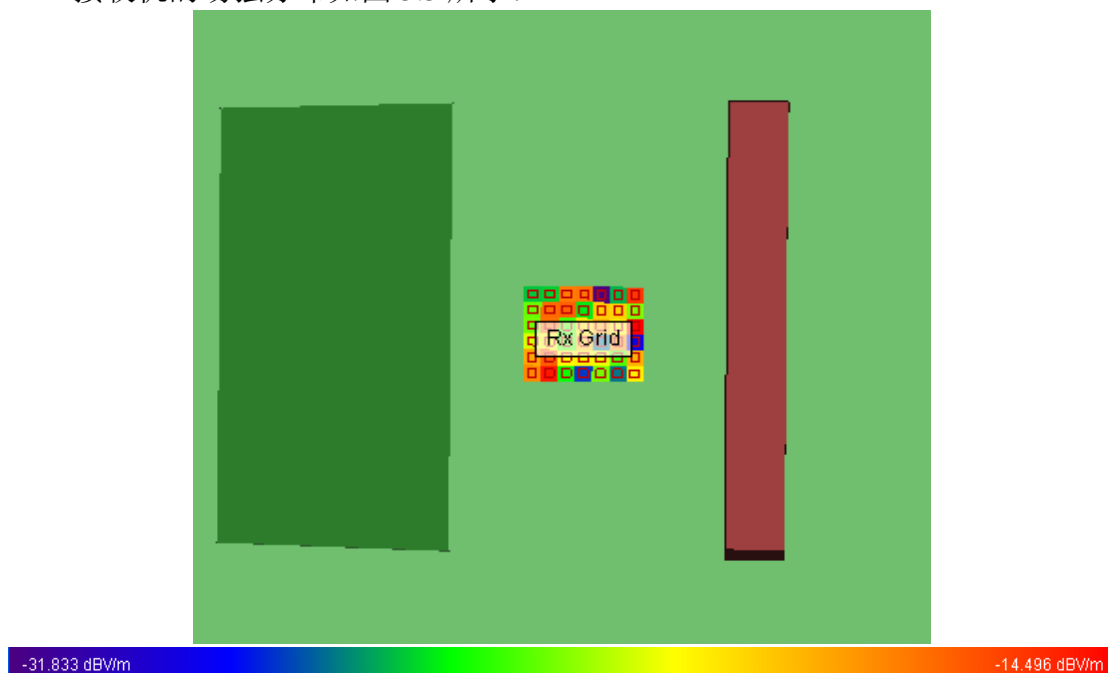


图 5.5 观察区域场强分布图

### 5.3.2 场强结果对比图

通过 matlab 绘图对比仿真结果和实测结果的对比图如图 5.6 所示，横坐标为测试点，纵坐标为接收机场强：

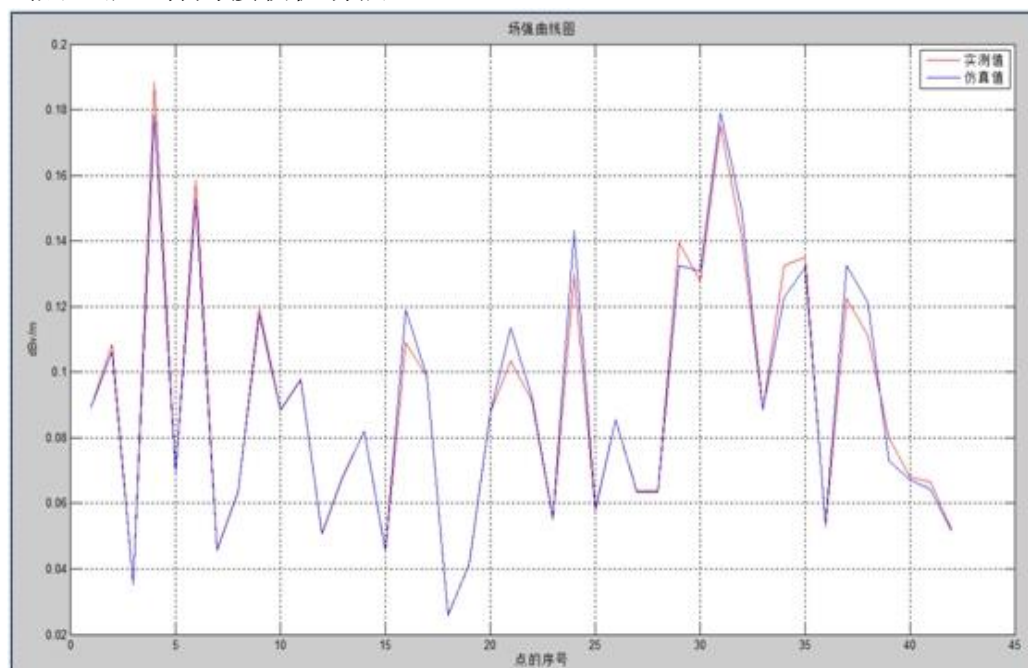


图 5.6 场强结果对比图

误差图如图 5.7 所示。横坐标为测试点，纵坐标为仿真与实测偏差：

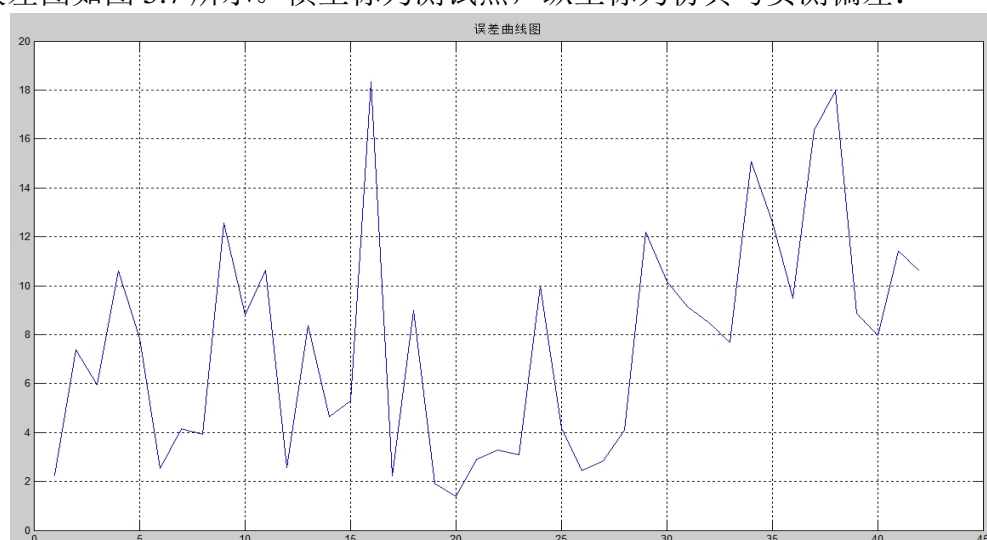


图 5.7 误差分析图

通过计算，平均误差值为 7.1%，在合理的误差范围之内，因此该仿真结果具有一定的正确性和参考性。

### 5.3.3 仿真误差原因分析



仿真结果与实测值有误差的原因如下：

(1) 在仿真中，仅考虑了建筑物对射线的影响，并没有考虑其他建筑是否存在辐射源干扰的现象，而实际中，其他建筑物上均存在一定数量的天线或其他发射源，因此实测值与仿真结果有一定的误差；

(2) 由于目前移动网络遍布校园，3G 和 WIFI 以及其他建筑物上存在一定数量的天线或其他发射源网络，因此对实际测量值有一定影响。

(3) 仿真模块所采用的算法是正向射线追踪算法，计算公式存在一定近似，由此导致实测值与仿真结果的误差。

## 结论

传统传播模型在电波传播预测过程中有诸多缺点，如经验模型通常只应用于城镇、市郊这些场景小、距离短的小尺度电波传播特性预测工程中，而且对路径损耗的预测精度也不高。本系统采用了射线追踪算法，但由于该算法固有的海量计算，使得其很难为实际所应用，因此本系统提出了根据该算法的并行性通过机群搭建并行系统有效缩短计算时间。

本系统采用机群实现并行计算，将一个复杂大量的计算任务分解为若干的计算单元，并且这些单元之间没有耦合关系，可以并行执行。用一台起控制作用的服务器将不同的任务单元分派给不同的计算节点，待计算节点将任务完成后，控制服务器会自动将结果进行合并，把整合后的结果传递给客户端。用户不仅可以以三维的方式查看仿真结果，还能以三维的方式建模。采用这种方式可以有效地缩短计算时间，大幅度提升仿真速度。为了实现精确地并行控制，本系统构建了一个控制数据库，通过对数据中相关字段的监控，可以实时调整任务的状态，控制计算节点的并行时序。在给定的环境下，利用该系统可以对复杂战场研究区域的电磁环境进行预测。

## 致谢

首先感谢项目的甲方解放军军械工程学院提供的帮助，没有他们的悉心讲解该项目难以顺利进行，正是在沟通中贵方的耐心说明，使得我们对项目需求有一个准确的认识，然后设计出较为合理的解决方案。

感谢高攸纲老师对项目的指导和关心，感谢石丹老师全心付出，在她的带领下，整个科研团队知难而进，攻坚克难，顺利完成了项目。感谢团队成员的百倍努力。

## 参 考 文 献

- [1] M.F. Catedra, J. Perez, F. Saez de Adana et al. Efficient ray-tracing techniques for three-dimensional analyses of propagation in mobile communications: application to picocell and microcell scenarios. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1998, 40(2): 15-28
- [2] M.F. Iskander, Yun Zhengqing. Propagation prediction models for wireless communication systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(3): 662-673
- [3] 刘勇, 周新力, 金慧琴等. 电波传播预测模型分析与研究[J]. *舰船电子工程*, 2011, 31(7): 84-86. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9730.2011.07.025.
- [4] M. Hata. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1980, 29(3): 317-325
- [5] J.H. Whitteker. Measurements of path loss at 910 MHz for proposed microcell urban mobile systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1988, 37(3): 125-129
- [6] H.H. Xia, S. Kim, H.L. Bertoni. Microcellular propagation measurements in Dallas city. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 1993, 593-597
- [7] L. Piazzzi, G. Liang, H.L. Bertoni et al. Comparison of measurement based and site specific ray based microcellular path loss predictions. *IEEE International Conference on Universal Personal Communications*, 1996, 2: 656-660
- [8] Henry L. Besom, *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*, Prentice Hall, Inc., 2000
- [9] 吴志忠, *移动通信无线电波传播*, 人民邮电出版社, 2002
- [10] Karim Rizk, Jean-Frederic Wagen, Fred Gardiol, "Two-Dimensional Ray-tracing Modeling for Propagation Prediction in Microcellular Environments", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 46, NO. 2, PP508-518, MAY 1997
- [11] 季忠, 黎滨洪用射线跟踪法对室内电波传播进行预测, *电波科学学报*, Vol. 14, No. 2, pp160-165, June 1999
- [12] 汪茂光. *几何绕射理论*[M]. 西安: 西安电子科技大学, 1994: 7-29.
- [13] 闻映红. *天线与电波传播理论*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 155. 159.
- [14] J. B. Keller. Geometrical theory of diffraction[J]. *Journal of the optical Society of America*, 1962, 52(2): 116-130.
- [15] Torres R P, Valle L, Domingo M, Lored S. "An efficient ray-tracing method for radio propagation based on the modified BSP algorithm." In *Vehicular Technology Conference*, pp. 1967~1971, 1999.
- [16] LIU Hai-ao, LI Bin-hong, XIE Yongqi Dong-sheng. "Parallel ray-tracing algorithm and its application for propagation prediction in urban micro cellular environments." *CHINESE JOURNAL OF RADIO SCIENCE*, vol. 5, no. 19, pp. 581-585, 2004.
- [17] LIU Fei. "Research on ray-tracing method for radio propagation." *Computer & Communication*, Feb, 2009.

Chen Shin-Hon, Jeng Shyh-kang. "An SBR/Image approach for radio wave propagation indoor environments with metallic furniture." IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol.1, no. 45, pp. 98-106, 1997.

[18]董金梁, 金荣洪, 耿军平, 王伟. 改进射线跟踪法效率的新方法[J]. 微波学报, 2006, 22(6): 6—8.

[19]袁正午, 黎意超等. 基于动态分区的射线跟踪加速方法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 46(27): 77 • 79.

[20]Tan S Y, Tan H S. "A microcelluar communications propagation model based on the uniform theory of diffraction and multiple image theory." IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol.10, no. 44, pp. 1317-1326, 1996.

[21]YUAN Zheng-wu, LI Yi-chao, LI Lin, et al. "Acceleration method of ray tracing based on dynamic zoning."Computer Engineering and Applications, vol. 27, no. 46, pp. 77-79, 2010.

[22]DONG Jin-liang, JIN Rong-hong, GENG Jun-ping, WANG Wei. "Improvement of the Computation Efficiency for Ray Tracing."JOURNAL OF MICROWAVES, vol. 6, no. 22, pp. 6-9, 2006.