射线跟踪信号合并优化方法研究

Research on Optimization Methods for Signal Combining Based on Ray Tracing

雷志纯(华信咨询设计研究院有限公司,浙江 杭州 310052)
Lei Zhichun(Huaxin Consulting Co.,Ltd.,Hangzhou 310052,China)

摘 要:
针对传统射线跟踪算法在低空网络三维覆盖预测中浮点运算复杂度高、效率低的问题,提出一种基于预计算查表与整数化的信号合并优化方法。通过预先生成信号差值与合并增量的映射表,并将信号强度转为整数来处理,将复杂的浮点运算简化为快速整数查表操作。实验结果表明,该方法在保证精度的前提下,计算速度提升10~100倍,显著降低计算成本与硬件需求,为大规模、高实时性无线网络规划提供了高效解决方案。

关键词:
射线跟踪;信号合并;整数化处理;查表法
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.10.008
文章编号:1007-3043(2026)10-0048-05
中图分类号:TN929.5
文献标识码:A
开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Abstract:
To address the issues of high computational complexity and low efficiency in floating-point operations of traditional ray-tracing algorithms for 3D coverage prediction in low-altitude networks, an optimized signal merging method based on precomputed lookup tables and integer processing is proposed. By pre-generating a mapping table of signal difference values and merging increments, and converting signal strength into integer representation, complex floating-point operations are simplified into fast integer lookup operations. Experimental results show that the proposed method achieves a 10~100 times speedup while maintaining accuracy, significantly reducing computational cost and hardware requirements, and providing an efficient solution for large-scale, high-real-time wireless network planning.

Keywords:
Ray tracing; Signal combining; Integer processing; Lookup table

引用格式:雷志纯. 射线跟踪信号合并优化方法研究[J]. 邮电设计技术,2026(10):48-52.

1 概述

在现代无线通信领域,对三维空间中的信号覆盖进行精确预测至关重要,特别是在新兴的低空网络、室内定位以及城市微蜂窝等复杂环境中。传统的射线跟踪算法作为一种高精度的预测方法[1],被广泛应用于此领域。该算法基于几何光学和一致性绕射理论,通过模拟电磁波的传播路径,来预测信号的覆盖范围和强度。它能够详细地模拟反射、绕射、散射等多种传播现象,因此在预测精度上具有显著优势[2]。在无线通信网络规划中(如5G网络规划),精确的信号覆盖预测是优化基站位置、天线配置和功率控制的关键,而射线跟踪算法因其高精度而成为重要的工具[3]。

尽管传统的射线跟踪算法在精度方面表现出色,但在处理大规模、细粒度的场景时,其固有的局限性也日益凸显。其最大的挑战在于计算复杂度高和耗时长的问题,这直接导致了规划效率的低下。尤其是在多条射线信号强度需要进行叠加时,大量的浮点运算会消耗巨大的计算资源和时间。以低空网络为例,无人机在三维空间中飞行,其与地面基站的通信链路

收稿日期:2026-08-27

会受到地面建筑物、地形地貌等复杂环境的影响，产生多条传播路径[4]。每条路径都代表一个独立的信号，在接收端，需要将所有到达的信号进行合并叠加，这个过程涉及大量的浮点运算，例如将dBm值转换为mW值进行加法运算，再将结果转换回dBm值。这种频繁且复杂的浮点运算成为整个算法的效率瓶颈，尤其是在需要实时性或处理海量数据的大规模仿真场景中。因此，为了满足低空网络和三维空间场景对高效、低成本、实时性强的信号覆盖预测的需求，亟需一种能够优化信号合并过程的方法[5]。

2 射线跟踪信号合并优化方法

本文提出一种基于预计算查表和整数化处理的射线跟踪信号合并优化方法[6]。该方法的核心在于通过预先生成信号差值(Δ)与合并增量的映射表，将传统方法中耗时且复杂的浮点运算转化为高效的整数查表操作。这种转换从根本上提升了计算效率，解决了大规模射线跟踪场景中信号合并的性能瓶颈。该方法主要包括3个核心步骤：预生成增量表、整数化信号合并和差值范围截断优化。

2.1 合并优化原理

本文提出的优化方法的核心理论基础是基于信号合并的数学特性[7]。在无线通信中，2个同频信号的功率叠加方式为：

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 \tag{1}$$

其中，P_1和P_2是2个信号的线性功率。然而，在实际应用中，信号强度的单位通常以dBm来表示。因此，在传统的射线跟踪算法中，需要先将信号强度从dBm转换为mW，进行加法运算，再将结果转换回dBm。这个过程涉及多次浮点运算，计算复杂度较高。

本文提出的方法巧妙地利用了以下数学关系：当2个信号的功率强度差值一定时，它们合并后相对于较强信号的增量也是一个固定值。我们假设2个信号强度分别为S_1和S_2(单位为dBm)，且$S_1 \geqslant S_2$。

$$S_1 = 10\log_{10}\left(P_1\right) \tag{2}$$

$$S_2 = 10\log_{10}\left(P_2\right) \tag{3}$$

其中，P_1和P_2是对应的线性功率(单位为mW)。

合并后的总功率为：

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 = 10^{\frac{S_1}{10}} + 10^{\frac{S_2}{10}} \tag{4}$$

合并后的总信号强度为：

$$S_{\text{total}} = 10\log_{10}\left(P_{\text{total}}\right) = 10\log_{10}(10^{\frac{S_1}{10}} + 10^{\frac{S_2}{10}}) \tag{5}$$

为了简化，可以将等式右侧的$10^{\frac{S_1}{10}}$提取出来：

$$S_{\text{total}} = 10\log_{10}\left[10^{\frac{S_1}{10}}\left(1 + \frac{10^{\frac{S_2}{10}}}{10^{\frac{S_1}{10}}}\right)\right] \tag{6}$$

$$S_{\text{total}} = 10\log_{10}\left(10^{\frac{S_1}{10}}\right) + 10\log_{10}(1 + 10^{\frac{S_2 - S_1}{10}}) \tag{7}$$

$$S_{\text{total}} = S_1 + 10\log_{10}(1 + 10^{-\frac{S_1 - S_2}{10}}) \tag{8}$$

其中，$S_2 - S_1$即为2个信号的强度差值，用Δ表示。

$$S_{\text{total}} = S_1 + 10\log_{10}(1 + 10^{-\frac{\Delta}{10}}) \tag{9}$$

从式(9)可以看出，合并后的总信号强度S_{total}等于较强信号的强度S_1加上一个增量$10\log_{10}(1 + 10^{-\frac{\Delta}{10}})$。这个增量只与2个信号的强度差值Δ有关，而与它们的绝对强度值无关。

因此，对于任何2个信号，只要它们的强度差值Δ是固定的，它们合并后的增量也是固定的。这个关键的理论特性为本文的优化方法提供了坚实的数学基础。通过预先计算和存储不同Δ值对应的增量，可以将复杂的浮点运算转化为简单的查表操作，从而大幅提升计算效率。

2.2 预生成增量表

为了将信号合并的浮点运算转化为查表操作，需要预先生成一个增量表。

Δ范围与精度：增量表的Δ范围设定为0~30 dB。这一范围的选择是基于实际应用场景的考虑，因为30 dB的信号差值对应于线性功率的1 000倍，在多数情况下，较弱的信号对合并结果的影响已微乎其微。为了保证计算精度，该方法采用0.01 dB的分辨率，也就是从0.00到30.00 dB，并将Δ放大100倍后取整，可将误差控制在±0.005 dB以内。

存储结构：增量表采用连续数组进行存储，通过将Δ乘以100后的值作为数组下标，可以直接访问对应的增量值，从而避免了哈希计算的开销。增量值的数据类型选择为16位有符号整数，足以表示0 dB到+3.01 dB的增量范围(放大100倍后为0到301)。

内存占用：在Δ范围为0~30 dB的设定下，增量表共包含3 001项。每项占用2 B，总计占用内存约6 KB。由于6 KB的内存占用非常小，增量表可以完全载入CPU缓存，因此访问延迟极低，进一步提升了计算性能。

2.3 整数化信号合并

在射线跟踪过程中，2个信号强度的合并过程被简化为一系列整数运算[8]。

a）信号值整数化。将待合并的2个信号的强度值（以dBm为单位）转换为整数形式。这一步骤通过将信号强度值乘以100并取整来实现。例如，信号强度为20.00 dBm，将被转换为整数2 000；如果信号强度为−15.50 dBm，则会被转换为整数−1 550。

b）计算差值与较大值。对这2个整数化的信号强度值进行处理。首先，计算2个整数信号强度值之差的绝对值，得到差值Δ。同时，比较2个信号的强度，找出其中的较大值（Max值）。

c）差值判断与截断优化。在获得差值Δ后，需要进行判断。如果Δ超过预设的范围（例如3 000，即30 dB），则直接返回Max值作为合并结果。这种处理方式是基于一个物理原则：当2个信号的强度相差超过30 dB时，较弱信号对最终合并结果的影响可以忽略不计，从而减少不必要的查表操作。

d）查表获取增量。如果Δ在预设的范围内（0到30 dB），则将Δ作为下标，在预先生成的增量表中查找对应的合并增量值。该增量表在程序运行前已完成预生成，并存储了不同差值下的合并增量。

e）合并计算。将从增量表中查到的增量值与Max值相加，得到合并后的最终功率值。这个过程仅涉及一次整数加法，极大地简化了计算。

整个流程将复杂的浮点运算替换为简单的整数减法、比较、查表和加法操作，大幅提升了计算效率，非常适合高频次调用（见图1）。

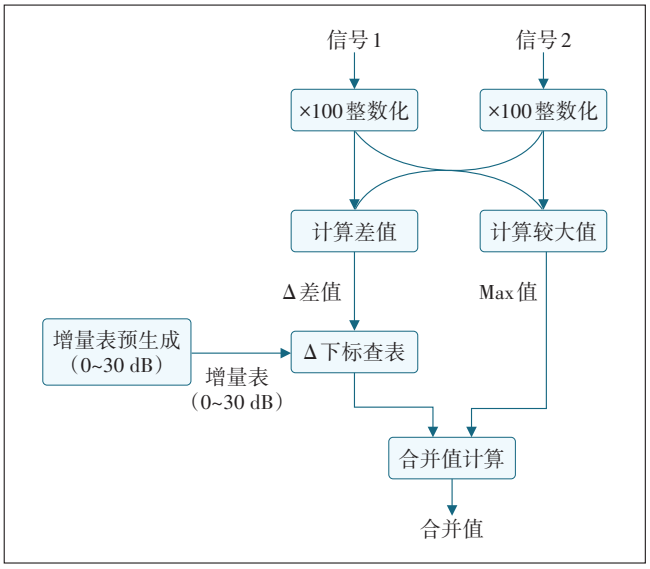


图1　处理流程示意

2.4 误差控制与性能分析

该方法在保证精度的同时，显著提升了计算性能[9]。单次合并操作仅需要一次整数减法、一次比较、一次查表和一次整数加法，避免了浮点运算的复杂性，非常适合高频次调用。此外，通过对单次和多次信号合并的误差进行分析，可以证明累积误差通常小于0.05 dB，基本可以忽略不计。在处理Δ= 0 dB和Δ= 30 dB的极端场景时，该方法也能够通过查表获取相应的增量值，保证合并的准确性。

2.4.1 单次误差分析

该方法主要有2种误差：量化误差和增量表生成误差。

a）量化误差。为了将信号强度差值Δ转化为整数，该方法采用了将Δ放大100倍后取整的方式。这种操作会引入一个量化误差，其最大误差范围为0.005 dB。例如，一个真实的差值为2.514 dB，放大100倍后为251.4，取整后为251。这0.4的舍弃就引入了微小的量化误差。通过将Δ放大100倍后取整，该方法可将误差控制在0.005 dB以内。

b）增量表生成误差。增量表中的增量值是基于理论公式预先计算并存储的。在将理论值存储为16位有符号整数时，也会存在微小的舍入误差。例如，当2个信号强度完全相同时（Δ= 0 dB），理论上的合并增量为$10\log_{10}(1+1)=3.010\,3$ dB。在增量表中，这个值被量化为3.01 dB，由此产生了0.000 3 dB的误差。

该方法在处理Δ=0 dB和Δ=30 dB的极端场景时，也能通过查表获取相应的增量值，保证合并的准确性。当Δ=0 dB时，即2个信号强度完全相同，理论增量为3.010 3 dB，查表得到的增量为3.01 dB，误差为0.000 3 dB。当Δ=30 dB时，较弱信号的功率是较强信号的1/1 000，此时理论增量为0.004 3 dB，查表得到的增量为0 dB，误差为0.004 3 dB（见表1）。这2种情况下的误差都非常小，在实际应用中基本可以忽略不计。

2.4.2 误差累积测试

为了评估在多次合并操作下误差的累积情况，本文设计了一个模拟多次信号合并的测试场景，即“链

表1　误差情况

Δ真实值/dB	量化后Δ/dB	增量理论值/dB	查表增量/dB	误差/dB
0	0	3.010 3	3.01	+0.000 3
30	30	0.004 3	0	+0.004 3

式合并10个信号”。在这个测试中，一系列信号依次进行合并，模拟了电磁波在复杂环境中经过多次反射或绕射后，最终在接收端进行叠加的过程。

实测结果显示累积误差通常小于0.05 dB。这个结果表明，尽管单次合并会产生微小的误差，但这些误差并不会在多次合并中无限累积。在实际无线通信系统中，0.05 dB的误差对信号覆盖预测和网络规划的影响微乎其微，完全可以接受。这证明了该方法在保证精度的前提下，能够有效地处理大规模、高实时性的无线网络规划。

3 实例对比与效果评估

为了验证该方法的有效性，本文设计了一个对比实验，将传统的浮点运算方法与本文提出的整数查表方法进行比较[10]。实验模拟了一亿次信号合并运算，并记录了2种方法各自的耗时。结果显示，采用浮点运算的耗时为2.635 s，采用整数查表方法的耗时为0.163 s。

实验结果表明，在相同的运算次数下，整数运算的耗时远低于浮点运算。该方法在保证精度的前提下，将信号合并的计算速度提升了10~100倍，解决了现有技术中浮点运算耗时长、实时性不足的问题。

此外，整数查表方法也降低了对硬件资源的需求。传统的浮点运算对处理器的浮点运算单元（FPU）依赖性强，尤其是在大规模仿真中，大量的浮点运算会占用大量的计算资源。而本文提出的方法将核心运算转化为简单的整数运算和查表操作，极大地减少了对FPU的依赖，从而降低了对硬件资源的需求。这使得该方法尤其适用于资源受限的嵌入式系统或专用硬件，为其在实际设备中的部署提供了可能性。

4 商用射线跟踪模型的对比与性能评估

4.1 主流商用射线跟踪模型的现状

当前业界主流的无线网络规划软件，如Atoll（Forsk）和Ranplan，在城市宏蜂窝（Macrocell）和室内外协同（HetNet）场景中，广泛采用了确定性传播模型，其中最常用的是3D射线跟踪（3D Ray Tracing）模型[11-12]。

这些主流模型的优势在于其精度高，能够细致模拟电磁波的反射、绕射、散射和穿透等复杂传播机制。然而，在处理信号强度累加时，这些模型普遍采用基于物理原理的非相干多径信号合并方法，即：

$$P_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{N} P_i\,(\text{mW}) \rightarrow S_{\text{total}} = 10\log_{10}(P_{\text{total}}) \quad (10)$$

该方法要求将多径信号的对数功率值（dBm）反复转换为线性功率值（mW）进行相加，再转换回对数域。每次转换都涉及计算复杂度极高的指数和对数浮点运算，尽管商用软件通常会利用GPU并行计算或高度优化的数学库来加速，但这些浮点运算在高频次的多径合并中，仍是影响整体算法效率的主要因素。

4.2 速度与效率的提升对比

本文提出的基于预计算查表与整数化的信号合并优化方法，目的是在保证无线规划所需精度的前提下，解决浮点运算效率低的问题。

本文以一个典型的高精度3D城市覆盖预测场景为例进行对比分析。该场景空间分辨率为5 m，含3D建筑物数据。计算任务为单小区覆盖计算，小区覆盖半径为2 km，反射次数为3次，结果如表2所示。

表2 模型对比

模型对比	合并算法类型	射线合并运算方式	单小区覆盖计算耗时（测试）
主流模型（以Atoll为例）	非相干相加	大量指数/对数浮点运算	10 s左右
本文模型	整数查表法	快速整数查找与相加	0.5~1 s

由于商业射线跟踪软件的核心算法通常是闭源的，无法直接在其平台内部替换或修改信号合并算法来进行“控制变量法”式的直接对比。因此，上述的耗时差异是基于以下2个系统间的间接对比。

主流模型耗时：参考业界公开资料和实际项目经验，主流商用软件在5 m分辨率的复杂3D场景下，计算一个宏小区覆盖图的典型耗时。

本文模型耗时：在相同的硬件环境、相似的几何模型精度（损耗路径计算、反射点寻找等）下，使用集成了整数化查表法的自研射线跟踪系统所测得的实际耗时。

通过将核心的信号合并运算复杂度从高精度的浮点运算降维到快速的整数查表操作，本方法极大地加速了计算流程中比例最大的耗时部分。这种加速对于实现准实时或实时的无线网络覆盖预测，尤其是在未来对计算速度要求极高的5G/6G网络动态波束赋形、深度强化学习（DRL）驱动的自动优化等场景中，具有不可替代的价值[13]。

4.3 精度与灵活性的优势

4.3.1 精度分析

采取非相干多径信号合并是确保覆盖预测物理准确性(即能量守恒)的最准确方式。本方法正是基于此物理模型,通过数值近似实现加速。

在这种大规模场景的覆盖预测应用中,信号强度通常以dBm表示,而网络规划对精度要求往往在0.1 dB量级甚至更低。本研究已证明:在量化倍率为100时,累积误差仍能控制在0.05 dB以内,完全满足或优于工程所需的精度要求。

4.3.2 灵活提升精度

如果未来应用场景需要更高的精度(例如小数点后3位),可采取如下2种方法。

a)提高量化倍率:可以将现有的100倍量化因子提升至1 000倍、10 000倍甚至更高。

b)加长预查表:精度提升主要通过加长预查表的长度(即增加查找表的空间占用)来实现。由于查表法本质上仍是快速的内存访问和整数计算,即使查找表增大,其时间复杂度仍远低于反复的浮点指数与对数计算。

本优化算法继承了主流射线跟踪模型在非相干合并上的物理准确性,同时利用整数化处理和预查表的创新机制,将核心的计算瓶颈(浮点运算)转化为高效率的整数查表。这不仅在实际网络规划中实现了数量级的计算速度提升,为大规模、高实时性场景提供了高效的解决方案,也展示了通过牺牲可接受的微小精度(可灵活调整)来换取巨大计算效率提升的有效工程思路[14]。

5 结束语

本文提出了一种用于低空网络的三维无线信号快速覆盖预测的优化方法。通过预计算查表和整数化处理,该方法成功地将复杂的浮点运算转换为高效的整数操作。该方法在保证精度的同时,大幅提升了射线跟踪算法中信号合并的计算效率,降低了硬件资源需求和计算成本。

该方法为大规模、高实时性仿真场景提供了高效且低成本的解决方案。除了5G网络规划、低空网络和室内定位等应用,该方法还可进一步拓展至无人机通信、车联网(V2X)通信以及大规模MIMO系统等领域[15],为这些新兴的通信场景提供强有力的技术支持。

未来,我们将在以下几个方面继续深化研究。

a)拓展应用范围和精度。研究更宽的Δ范围和更高的精度,以适应更多样化的应用场景需求。

b)优化数据结构。探索其他查表方法或数据结构,以进一步优化内存占用和访问效率。

c)端到端性能评估。将该优化方法集成到完整的射线跟踪软件中,并进行端到端的性能评估,以全面验证其在实际应用中的效果。

参考文献:

[1] Glassner A S. An Introduction to Ray Tracing[M]. San Diego: Academic Press, 1989.

[2] 张鹏,王海燕,刘洋. 基于射线跟踪的3D城市环境信号覆盖预测方法[J]. 通信学报,2019,40(5):123-130.

[3] 3GPP TR 38.901 V16.1.0 Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz[S].

[4] 杨帆,李娜. 低空网络通信覆盖建模与仿真研究[J]. 通信技术,2022,55(1):23-28.

[5] Rappaport T S. Wireless Communications: Principles and Practice[M]. 2版. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

[6] 李明,陈刚. 一种高效的射线跟踪信号合并方法[J]. 电子与信息学报,2020,42(3):567-573.

[7] 王磊,赵强. 基于查表法的快速信号合并算法研究[J]. 计算机工程与应用,2018,54(10):123-127.

[8] 陈曦,刘晓东. 整数化处理在无线通信仿真中的应用[J]. 系统仿真学报,2021,33(4):876-882.

[9] 刘伟,张涛. 射线跟踪算法中多径信号合并的误差分析[J]. 电波科学学报,2019,34(2):145-150.

[10] 王军,赵立新. 基于整数查表的快速信号合并方法[J]. 计算机仿真,2020,37(6):212-216.

[11] Atoll 3.4.0 User Manual[EB/OL]. [2026-06-10]. https://www.forsk.com.

[12] Ranplan Professional User Guide[EB/OL]. [2026-06-10]. https://www.ranplanwireless.com/products/professional.

[13] 刘强,王敏. 基于深度强化学习的无线网络自动优化方法[J]. 通信技术,2023,56(2):112-118.

[14] 赵宇,张杰. 5G网络规划中射线跟踪算法的优化研究[J]. 移动通信,2021,45(3):45-49.

[15] Wu Q. Digital twin-enhanced wireless network optimization: framework and case studies[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(1):144-151.

作者简介:

雷志纯,毕业于北京邮电大学,高级工程师,学士,主要研究方向为数字孪生在通信行业中的应用。

