运用 k-d 树算法加速计算城市无线信号传播

Introduction

EM.Cube 的传播模块又名为 EM.Terrano，可作为软件包的一个独立产品分析辐射电波在城市、乡村或者混合环境（如图 1）以及室内场景中的传播情况。该模块采取的射线追踪是基于射线弹跳法(SBR)，这种方法结合了几何光学(GO)与建筑轮廓模型的一致性几何绕射理论（UTD）。EM.Cube 的 SBR 算法是一种真实三维下的，偏振的和连续的电磁场射线追踪，会精确计算出空间中每一个点沿 X，Y，Z 三个方向的电场分量，包括幅度和相位。

图 1 典型的城市多径信道中的定向通信链路传播环境

SBR 方法认为电场传播是通用形式的一种球面波：

$$\mathbf{A}(\mathbf{r})\frac{e^{-jkR}}{R}$$

这里 R = |**r**-**r'**|是源到观察点的距离，**r** 和 **r'**分别是观察点和源点的位置矢量， $k = \sqrt{\varepsilon_r}k_0$, ε_r 是传播介质的相对介电常数，$k_0 = 2\pi f/c$ 是自由空间传播常数，f 是工作频率，c 是自由空间的光速. **A**(**r**)是复数矢量函数，用来定义观察点的场强和偏振。球面波传播可以用从点源（发射机）激发的一簇射线管或射线束来模拟，这些射线管传播至自由空间中，遇到障碍物或反射体会发生反射，于观察点处（接收机）收集。

当射线束在空间中传播时，由于光束的空间离散性会使光的传播区域扩大。模拟时，三角形网格生成器会将每一个散射体离散成一组连续的三角面片集合。当射线遇到建筑物的某一给定面片时，则需要启动射线与三角形面片的相交算法，而这类快速算法将会耗费极大的计算成本。如果三角网格未达到好的空间匹配，使用简单模式匹配算法的 SBR 求解器便会进行 N×M 次交点计算（这里 N 是射线总数，M 是该场景中的三角面片的总数）。因此，当我们求解一个包含了数以千计的建筑物和射线的大规模传播场景时，传统的射线追踪法将会耗费相当多的时间。

KD 树作为光线跟踪的加速结构，一直以来是光线跟踪中的一个研究热点，一个高效的 KD 树对于光线跟踪算法具有非常重要的意义。尤其是近年来，发展了许多不同的 k-d 树光线遍历算法。通过 k-d 树算法来对整个计算域细分，能够显著加快射线和面片相交这一几何问题的计算效率。EM.Cube 的 SBR 计算引擎使用的正是一种高效的改良算法--递归光线遍历算法（Recursive Ray Traversal Algorithm）。

模拟 Ann Arbor 街区场景

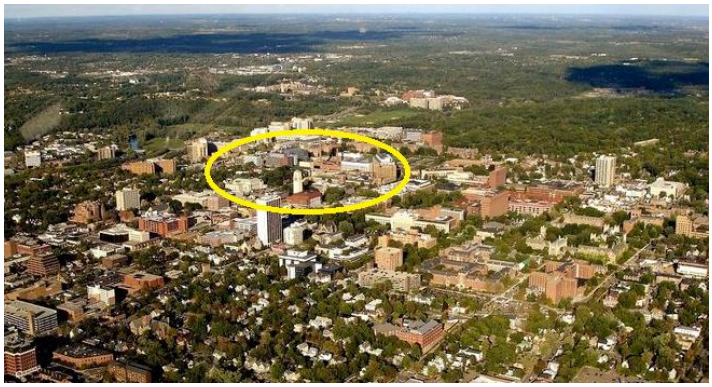

图 2 Downtown Ann Arbor 的传播场景，包含 83 个建筑

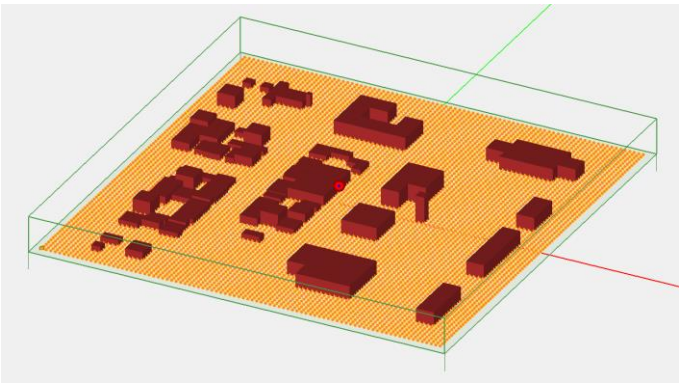

图 3 在平地上建立 Ann Arbor 的 EM.Cube 模型，偶极辐射源在中心位置 Z=25m 处

由于在一个典型的传播场景中常常会包含数量极大的射线与三角形，SBR 模拟将会很慢而耗费时间。例如，如图 2 中展示的 Downtown Ann Arbor 场景，包含有 83 个独立的建筑，总面积达 450m × 450m。建筑的平均高度为 16m，最高达到 30m。设定建筑的外墙全部由砖构成，其相对介电常数为 $\varepsilon_r = 4.44$，导电率为 $\sigma = 0.001$ S/m。一个半波偶极子天线用作发射源，放置在中心位置高 25m 处（Z=25m）。8100 个相同的接收机覆盖整个场景，每一个接收机相隔 5m，处于平地以上的 5m 处。图 4 展示了场景中所有建筑的三角形面网格，共包含 2,212 个面片和 936 条边。

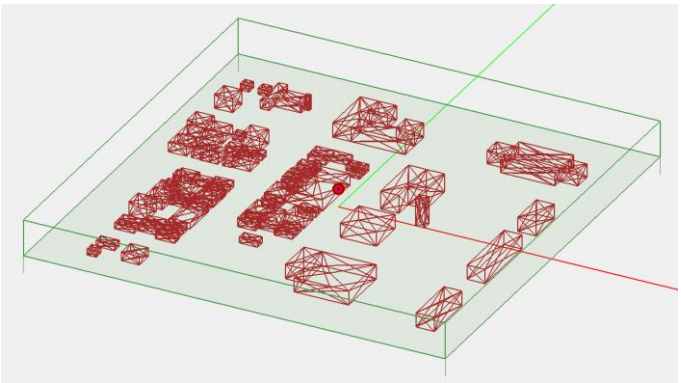

图 4 图 3 所示的 downtown Ann Arbor 传播场景中所有建筑的三角形面网格

场景面积	450m × 450m
工作频率	1GHz
建筑数量	83
面片总数	2,212
边总数	936
发射源数	1

发射机高度	距离地面 20m
接收机数目	8,100
接收机高度	距离地面 1.5m
发射光线的总数	64,980
射线角度分辨率	1°
k-d 树节点总数	3,181
k-d 树构建总时间	< 1 second
总计算时间	17 seconds

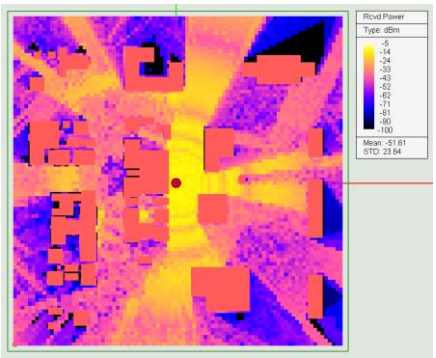

图 5 半波偶极天线沿 z 轴时，整个 downtown 接收功率的覆盖情况

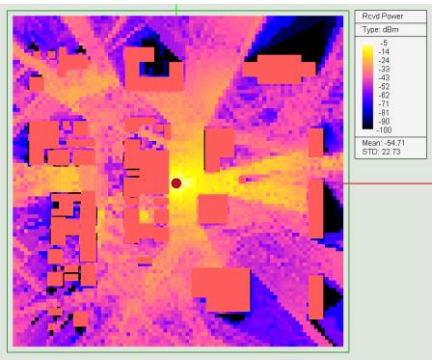

图 6 半波偶极天线沿 x 轴时，整个 downtown 接收功率的覆盖情况

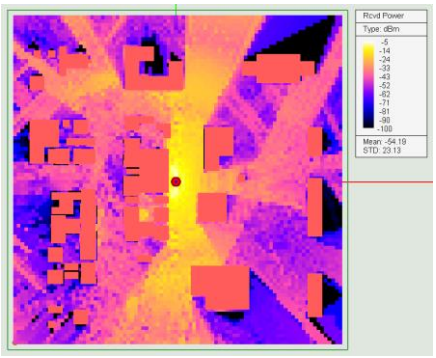

图 7 半波偶极天线沿 y 轴时，整个 downtown 接收功率的覆盖情况

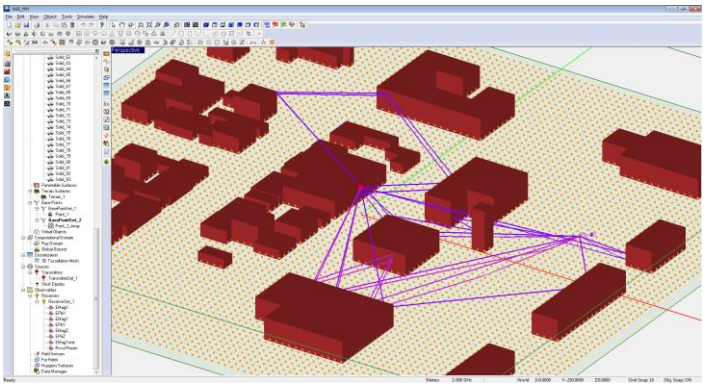

图 8 downtown Ann Arbor 传播场景中的光线跟踪

EM.Cube 的 SBR 求解器将分别计算将半波偶极子天线（激发功率为 1W）沿 Z, X 和 Y 轴三个方向放置时不同的传播场景。图 5,6 和 7 分别展示了 downtown 接收功率的覆盖情况。光线追踪会在两种不同条件下终止，一种是光线离开计算域，另一种是功率降到接收机的敏感性阈值以下，在本次模拟中该阈值设置为-100dBm，功率阈值会消除一些建筑角落处的衍射效应影响。从这三幅图可以观察到三种情况下的信号路径和覆盖率统计数据是相同的，发射天线的极化方式会显著地影响直线对传(LOS)区域。图 5 可以明显观察到由于垂直极化导致的地面反射效应。图 8 向我们展示了在 EM.Cube 中可以独立分析任一个指定接收机所接收到的光束，如场强，相位，接收功率，延迟分布，到达角等。

模拟一个更大规模的传播场景

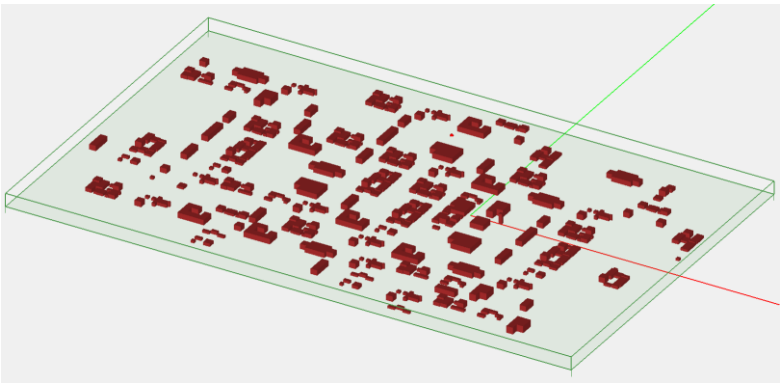

图 9 一个更大规模的传播场景

在下面的例子中，我们将 downtown Ann Arbor 中的建筑进行任意的复制，从而创建一个更大规模的传播场景。扩大的场景中包含 552 个独立的建筑，其总面积延伸至 1.7km × 1.05km。每个接收机的相隔距离增加至 10m，这样会配置 17,472 个接收机以覆盖整个区域。场景数据可以从下表中获得，所构建的 k-d 树包含 20,265 个节点，这个数目是非常可观的。然而 k-d 树的构建时间也仅仅只需 2 秒钟。使用配备 i7 Intel 处理器的笔记本电脑计算包含有 64,980 条传输光线，14,137 个三角面片和 17,472 个接收机的传播场景仅耗费不到 3 分钟的时间。图 10 和 11 分别展示了垂直放置和沿 x 轴放置的半波偶极天线激发下不同的接收功率覆盖分布。

场景面积	1.7km × 1.05km
工作频率	1GHz
建筑数量	552
面片总数	14,137
边总数	5,888
发射源数	1
发射机高度	距离地面 20m
接收机数目	17,472
接收机高度	距离地面 1.5m
发射光线的总数	64,980
射线角度分辨率	1°
k-d 树节点总数	20,265
k-d 树构建总时间	2 seconds
总计算时间	178 seconds

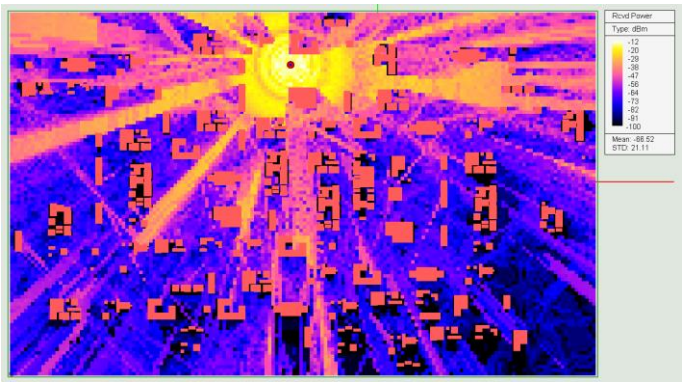

图 10 **半波偶极天线垂直放置时，整个 downtown 接收功率的覆盖情况**

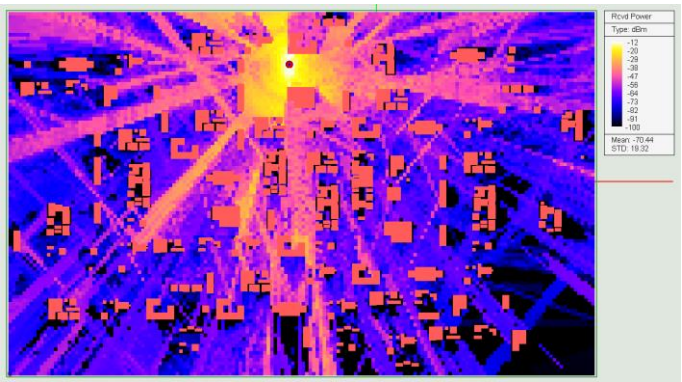

图 11 **半波偶极天线沿 x 轴放置时，整个 downtown 接收功率的覆盖情况**

模拟具有复杂辐射特性的空中发射机激励下的场景

图 12 捕食者无人机(UAV)

接下来的例子依旧使用图 9 所示的大规模传播场景，但是我们将地面 20m 处的偶极子发射源替换为 100m 处的机载天线。图 12 所示的是通用原子公司(general atomics) 捕食者无人机(UAV)。将 UAV 的 CAD 模型直接导入到 EM.Cube 的 FDTD 模块中，亦我们熟知的 EM.Tempo 模块。图 13 展示了该 UAV 模型的前后视图。无人机从头至尾的长度为 8.22m，翼幅为 14.8m。一个长度为 150mm 的半波偶极子天线放置在 UAV 的前半部距离底部 60mm 处，如图 14 所示。在该模型中，偶极子是沿 x 向放置的，在其中部用一个集总源作为激励。在对天线-平台这一组合结构的 FDTD 模拟结束后，软件会计算出整个结构的远场辐射特性，图 15 描述了求坐标系下的 3D 辐射特性图。

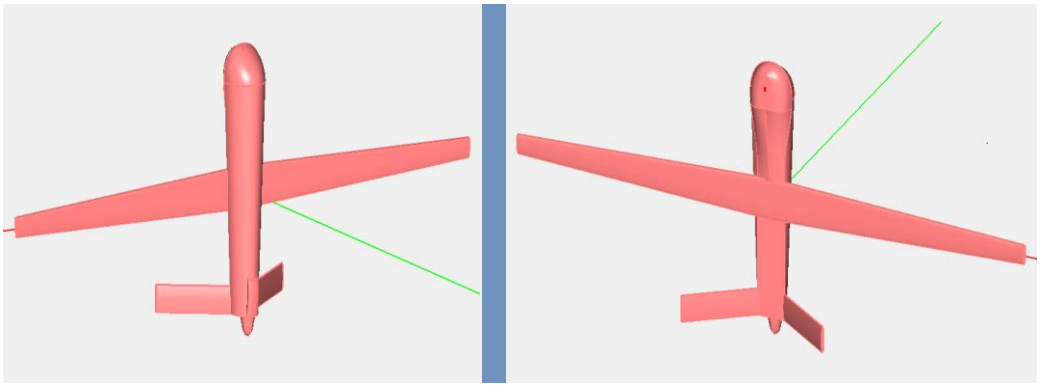

图 13 捕食者无人机的 CAD 模型（前后视图），会导入至 EM.Cube 的 FDTD 模块中进行计算

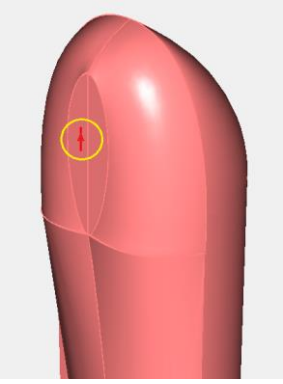

图 14 一个半波偶极子天线放置在捕食者 UAV 的底部

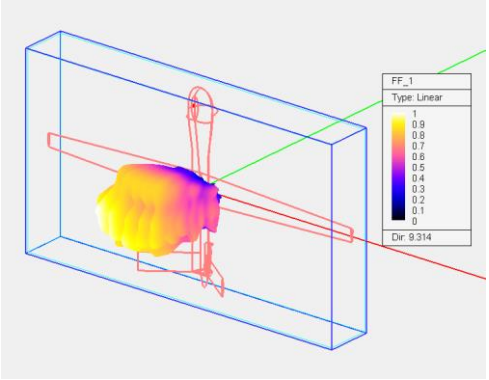

图 15 半波偶极子天线在捕食者 UAV 场景下的 3D 辐射特性

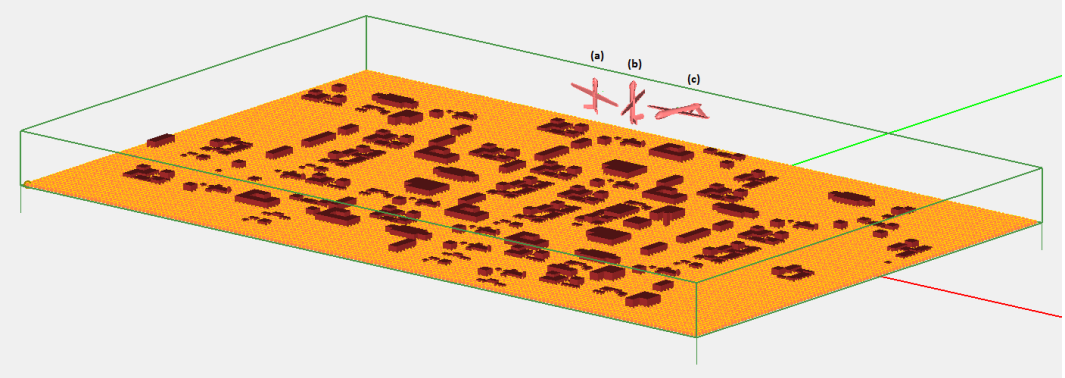

图 16 在机载偶极天线激发下三种不同的无人机位置的的大规模传播场景

图 16 和图 9 是相同的场景，17,472 个距离地面 1.5m 各向同性的接收机遍布于整个场景之中，区别是使用了一个距离地面 100m 处的集总源作为激发源。将图 15 所显示的辐射特性导入到 EM.Cube 的传播模块中，指定一个 1W 输入功率的点辐射体作为发射机。输入的辐射特性会原封不同的赋予给图 16 的位置 a。图 17 展示了 UAV 在位置 a 处的接收功率的覆盖分布。再将 UAV 和其装载的天线沿 x 轴旋转+90°，即位于图 16 所示的位置 b 处。与预期的一样，天线的辐射能将会主要覆盖场景的右边区域。图 16 的位置 c 表示无人机水平放置的情形，图 19 展示了此位置的接收功率覆盖分布图。如想得到图 17,18 和 19 所示的接收功率的覆盖情况，每个图需要的计算时间仅仅为 54 seconds。

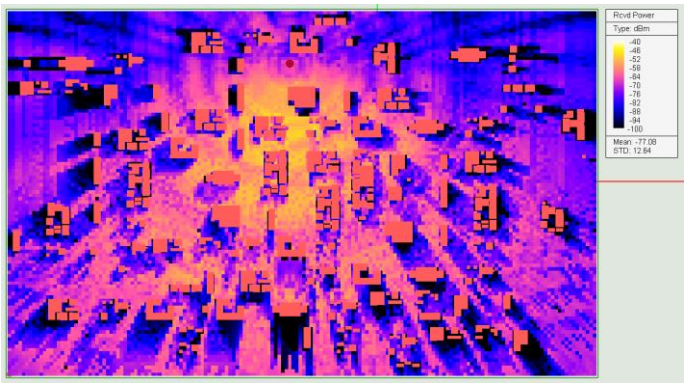

图 17 UAV 处于图 16 所示的位置 a 处，整个 downtown 接收功率的覆盖情况

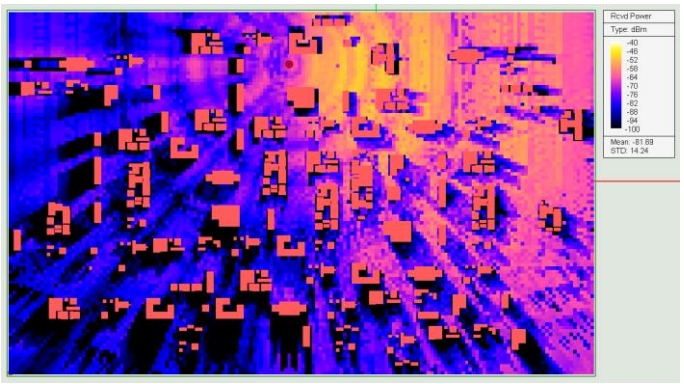

图 18 UAV 处于图 16 所示的位置 b 处，整个 downtown 接收功率的覆盖情况

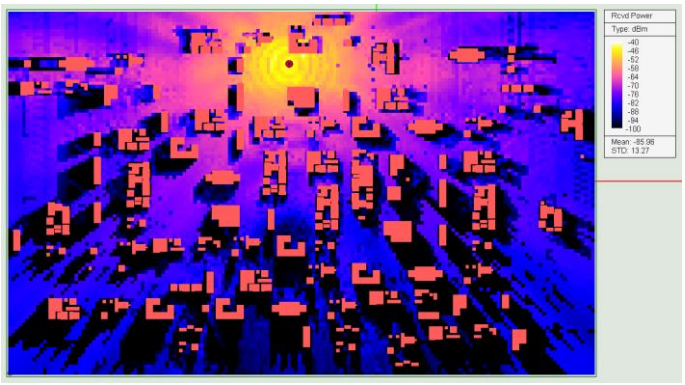

图 19 UAV 处于图 16 所示的位置 c 处，整个 downtown 接收功率的覆盖情况

模拟大规模的不规则地形环境

在本文的最后，我们导入如图 20 所示的的位于加你福尼亚的惠特尼山（Mount Whiteny）的高程图（DEM），在 EM.Cube 传播模块中模拟的地形如图 21 所示。该地形是由典型的岩石材料构成，其相对介电常数为 $\varepsilon_r = 5.00$，电导率为 $\sigma = 0.005$ S/m。导入的地形图覆盖面积为 10km × 15km，因此整个地形域是非常巨大的，包含 355,682 个三角形面片和 259,953 条边，该数量非常惊人。由于模拟时仅计算从地形边缘产生的衍射，其楔角低于 170°，这样衍射的边会降低到 46,732.条。一个垂直的半波偶极天线放置在海拔 80m 处，其坐标为 X = 5,000m, Y = 7,000m，Z = 3,898.25m，如图 22 所示。105 × 130 个相隔 100m 的各向同性接收机会覆盖整个区域，这样共有 13,650 个接收机网状分布并放置于海拔 1m 处。由于地形差异，z 坐标会在整个区域变化非常大。对该场景构建的 k-d 树总共有 355,682 个节点，但是整个构建过程也仅花费 28 seconds。因为该场景规模庞大，我们使用了很高的角分辨率 0.05°。这样共生成 1,300,500 条发射光线，从发射机向所有方向发射。此外，我们会对接收机设置功率阈值为-150dBm，来消除弱光的影响。

图 20 加你福尼亚的惠特尼山真实形貌

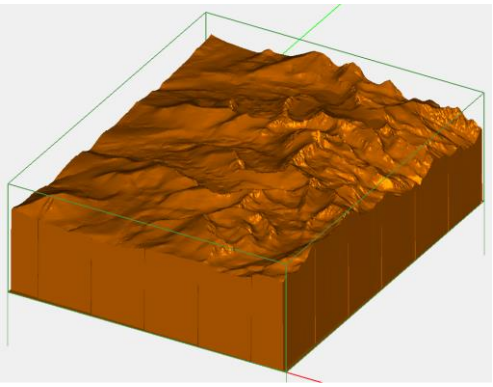

图 21 惠特尼山的 DEM 地形模型

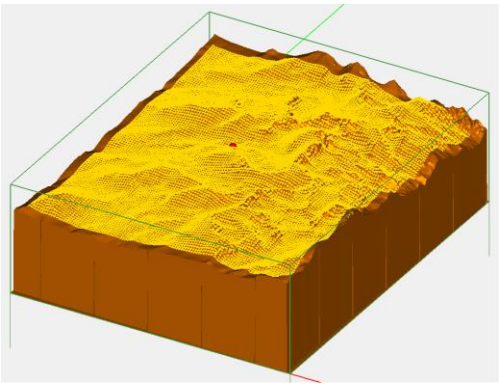

图 22 EM.Cube 模型，包括 DEM 地形，一个海拔 80m 垂直的偶极子发射机（红色的点）以及大量相隔 100m 的网状分布的接收机（黄色的点）

如果不考虑地形衍射，则仅仅计算地形面片的反射，这样射线追踪分析只花去 38 seconds 的时间。计算后的接收功率覆盖分布如图 23 所示，可见只有在接收机周围的很小一部分区域被检测到功率的存在。然后，再启动一次模拟，这次将受到边缘角限制的地形衍射纳入考虑，总的计算时间随之增加到 460 seconds。图 24 显示了同样的场景但考虑不同的地形衍射效应的接收功率覆盖分布图。我们可以清晰地看到后者因为考虑了衍射效应以后会出现更多的阴影区域。

场景面积	10km × 15km
工作频率	1GHz
建筑数量	0
面片总数	355,682
边总数	46,732
发射源数	1
发射机高度	80m

接收机数目	13,650
接收机高度	1m
发射光线的总数	1,300,500
射线角度分辨率	0.05°
k-d 树节点总数	329,061
k-d 树构建总时间	28 seconds
不考虑地形衍射的总计算时间	38 seconds
地形衍射计算时间	272 seconds
地形衍射的光线追踪时间	160 seconds
考虑地形衍射的总计算时间	460 seconds

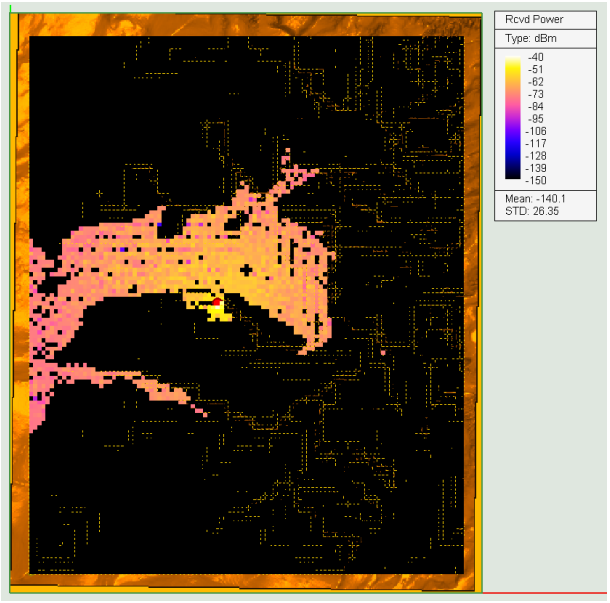

图 23 半波偶极天线垂直放置时，整个地形环境接收功率的覆盖情况（不考虑地形衍射效应）

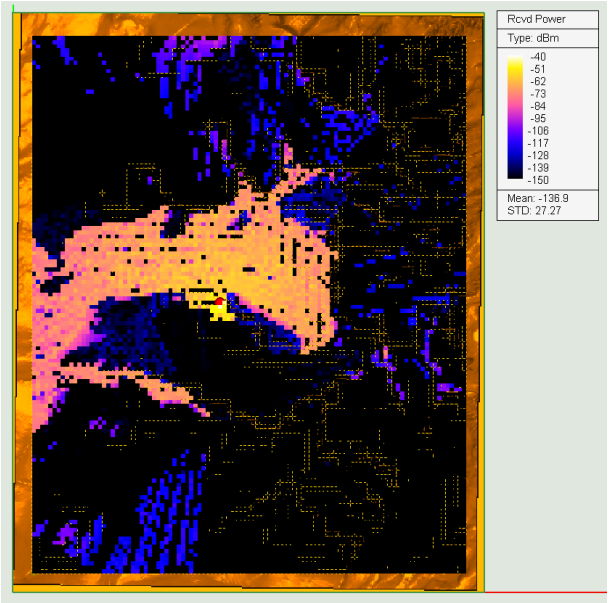

图 24 半波偶极天线垂直放置时，整个地形环境接收功率的覆盖情况（考虑地形衍射效应）

参考文献

[1] H. Ling, R. C. Chou, and S. W. Lee, "Shooting and bouncing rays: Calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity," *IEEE Trans. Antennas Propagat.,* vol. 37, no. 2, pp. 194–205, 1989.

[2] S-H Chen and S-K Jeng, "An SBR/image approach for radio wave propagation in indoor environments with metallic furniture," *IEEE Trans. Antennas & Propagat.,* vol. 45, No. 1, pp. 98-106, 1997.

[3] M. Hapala and V. Havran. Review: Kd-tree traversal algorithms for ray tracing. Computer Graphics Forum, 30(1):199213, March 2011.