

# 基于 Feko 的等效源仿真技术与应用

## Equivalence source simulation technology and Application In Feko

陈士举 焦金龙

(北京工程机电设计研究所、北京、010000)

(Altair 工程软件（上海）有限公司、北京、010000)

**摘 要：**Altair Feko 提供了强大而丰富的电磁场等效源仿真技术，并已经在实际工程上得到广泛的应用，尤其在反射面天线、透镜天线、天线阵列(阵列互耦)、天线布局与天线罩透波特性等应用方向。采用等效源技术可以极大地降低计算的复杂度且能够保证工程精度，更为重要的是可以回避知识产权所带来的问题。

**关键词：**等效源、天线罩、天线布局、阵列天线、阵列互耦、Altair Feko

**Abstract:** Altair Feko provides powerful and abundant simulation technology of electromagnetic field equivalent source (EQS), and has been widely used in practical engineering, especially in the EM radiation application direction of reflector antenna, lens antenna, antenna array (array mutual coupling), antenna placement with complex platform and radome. EQS technology can greatly reduce the computational complexity and ensure the engineering accuracy. More importantly, it can avoid the problems caused by intellectual property rights.

**Key words:** Equivalence Source (EQS), radome, antenna placement, antenna array, array mutual coupling, Altair Feko

## 1 概述

随着硬件技术的快速发展，大规模并行计算越来越普遍，极大地促进了电大尺寸电磁场问题的全波求解应用，包括大规模天线阵列、天线布局、天线罩透波特性等，但采用全波计算方法处理这些类型问题，仍旧面临很多的挑战：①采用全波算法，对内存的要求会有极大的增加；②对于关注天线布局的系统工程师和关注天线罩透波特性的设计师，很难拿到天线的详细几何模型及其材料参数；③同时面临收敛慢或不收敛的问题等。

采用等效源的处理技术，是有效解决这些类型问题的首选，尤其是对于天线布局和天线罩等问题：① 采用等效源来等效复杂的天线模型不需要考虑天线的几何模型，降低了计算复杂度；② 由于不需要考虑天线的几何模型，所以不涉及到天线的知识产权问题，天线设计厂商可以提供天线的辐射方向图数据文件或口面场数据文件；③ 矩阵的条件数变小，收敛性变好；④ 采用等效源处理技术，能够保证计算的精度。

## 2 基本原理与应用

惠更斯原理是指球形波面上的每一点（面源）都是一个次级球面波的子波源，子波的波速与频率等于初级波的波速和频率，此后每一时刻的子波波面的包络就是该时刻总的波动的波面。惠更斯原理[1]表明，如果一闭合体的表面  $S$  上的场为已知，则  $S$  以外的场可由  $S$  面上的场计算。这一概念的数学形式可用标量波或矢量波来表达。

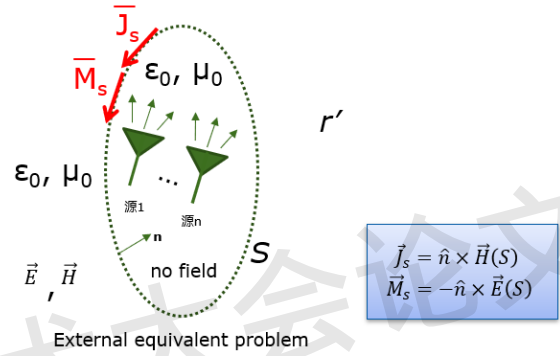


图 2-1：惠更斯原理示意图-外部场等效问题

如图 2-1 所示， $S$  为一包含所有源激励的任意闭合体的表面。由波动方程和高斯散度方程定义可导出惠更斯原理的矢量波表达式为

$$E(r') = -\nabla' \times \oint_S dS \bar{G}m(r', r) \cdot \hat{n} \times E(r) + j\omega\mu \oint_S dS \bar{G}e(r', r) \cdot \hat{n} \times H(r) \quad (2.1)$$

若要求  $r \in S$  时  $\hat{n} \times \bar{G}e(r', r) = 0$ ，则式 (2.1) 变为

$$E(r') = -\nabla' \times \oint_S dS \bar{G}m(r', r) \cdot \hat{n} \times E(r) \quad (2.2)$$

若要求  $r \in S$  时  $\hat{n} \times \bar{G}m(r', r) = 0$ ，则式 (2.1) 变为

$$E(r') = j\omega\mu \oint_S dS \bar{G}e(r', r) \cdot \hat{n} \times H(r) \quad (2.3)$$

上述式中， $\bar{G}e$  和  $\bar{G}m$  分别为电型或磁型并矢格林函数。式 2.2 和 2.3 中  $-\hat{n} \times E(r)$  和  $\hat{n} \times H(r)$  分别表示闭合表面  $S$  上的等效磁流源  $M_s$  和等效电流源  $J_s$ ，统称惠更斯等效源。

Altair Feko 提供了丰富的等效源仿真技术[2][8]，至少包括了远场方向图等效（far field source）、球面模式场等效（spherical mode source）和口面近场等效（Near field source）等，既可以作为辐射源的等效源，根据互易性原理，也可以做理想接收等效源，在该文的讨论中我们将只考虑作为发射源的惠更斯等效。

1、远场方向图等效源[2][3][8]：Altair Feko 可以直接生成远场方向图等效源文件，后缀为.ffe，在该文件中会包含 theta, Phi, Etheta\_real, Etheta\_imag, Ephi\_real, Ephi\_imag 等数据信息，也可以是 ASCII 格式的文件类型，这时文件包含 Theta、Phi、Etheta\_Mag、Etheta\_Phase、Ephi\_Mag、Ephi\_Phase 等六列数据，是常用的一种点源等效源方式；

2、球面模式场等效源[2][4][8]：Altair Feko 在计算天线方向图的时候，可以选择输出球面模式展开系数，生成的文件后缀为.sph。有限空间范围内的辐射源产生的辐射场  $\vec{E}$  可以表示为球面波的加权和，如下式 2.4 所示：

$$\vec{E}(r, \theta, \phi) = \frac{k}{\sqrt{\eta}} \sum_{s=1}^2 \sum_{n=1}^N \sum_{m=-n}^n Q_{smn} \vec{F}_{smn}(r, \theta, \phi) \quad (2.4)$$

3、口面近场等效源[2][5][8]：对于复杂的辐射源，比如 PCB 板，孔缝、波导天线、微带贴片天线等，可以采用口面近场的方式，Altair Feko 仿真可以直接得到口面近场的数据文件，电场的数据文件后缀为.efe，磁场的数据文件后缀为.hfe。Altair Feko 也支持读入外部测试或仿真得到的数据，ASCII 格式的数据，以直角坐标系为例，包含 x、y、z、Ex\_Mag、Ex\_Phase、Ey\_Mag、Ey\_Phase、Ez\_Mag、Ez\_Phase 等。

对于等效源的几点总结如下：

- A. 球面模式的等效源要满足远场条件，即  $r_0$  范围内不能包含有金属体，否则计算结果不准确，在  $r_0$  的范围外的近场数据精度高；

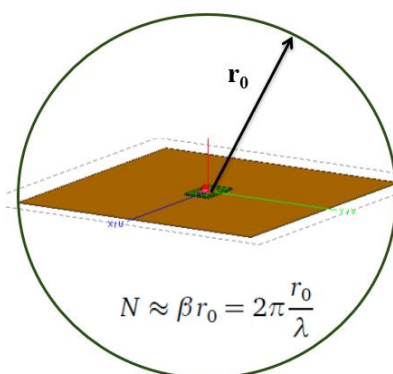


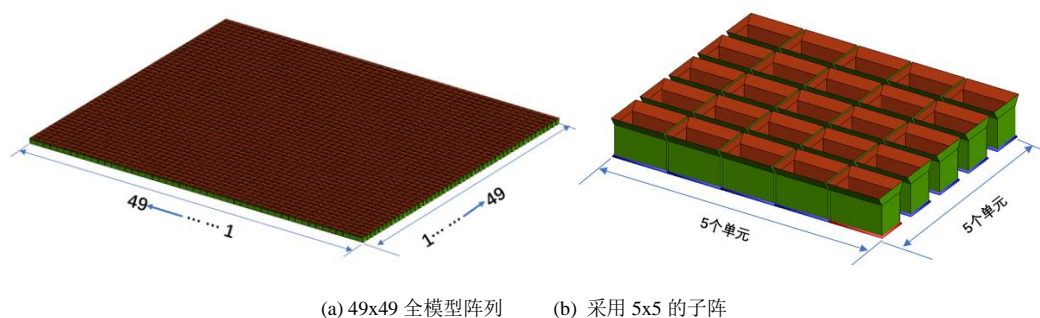
图 2-2：球面模式等效源的  $r_0$  范围示意图

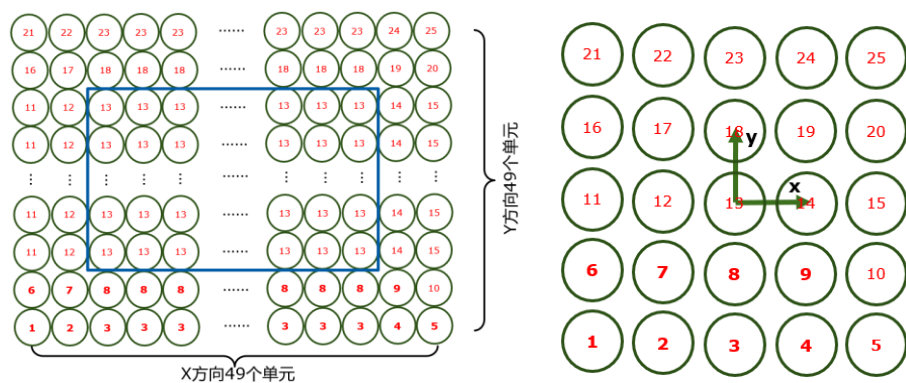
- B. 对于具有尖锐空值或峰值的辐射方向图，计算方向图文件时需要提高采样的精度；

- C. 当采用远场方向图等效源或球面模式等效源时，要注意天线的相位中心，在计算天线的等效源时，建议首先把天线的模型调整到坐标的原点，如：对于波导天线，天线口面的中心位置放置于坐标系的原点；微带型天线的顶部或底部中心位置放置于坐标系的原心位置；
- D. 等效源没有考虑天线模型与靠近天线的载体结构之间的相互耦合；
- E. 远场方向图等效源位于“远场条件”（ $R \geq 2D^2/\lambda$ ）以内的近场数据是不准确的，之外的近场数据是准确的；
- F. 口面近场等效源法非常适合于源靠近载体的情况，精度更高；近场等效源的采样点不能位于模型上，近场采样点必须离开载体 1 到 1.5 个三角形单元的边长长度；如果考虑端射天线的辐射，靠近近场采样点的载体要用较密的网格；
- G. 对于天线罩的仿真，如果天线的口面较天线罩的尺寸不能等效为一个点源时，建议采用口面近场的等效方法，对于波导裂缝天线阵或微带天线阵列等，可以只选择电场数据文件，背面加一个金属反射板，在进行天线罩透波时，考虑了反射板与天线罩之间的耦合；
- H. 对于大规模天线阵列，也可以采用天线单元的远场方向图、球面模式场或口面近场方向图来按照天线阵列的排布规律和激励幅度/相位的加权组成等效源的阵列，参考文献[3]，在计算子阵得到子阵各个单元的等效源时能够充分考虑天线单元之间的耦合，计算资源的最大需求取决于天线子阵的规模。

## 2.1 天线阵列的仿真

该例子以一个 49x49 的波导阵列为例，详细说明采用远场等效或近场等效时，如何采用子阵的方法[6]，该方法考虑了单元间的相互作用。为了保证收敛，49x49 全模型阵列采用了稳定的多层快速多级子技术(stdMLFMM)[7]。从图 2-4(i)中采用等效子阵的远场等效法、近场等效法和全模型结果的对比，可以看出等效法具有很好的计算精度，在该例子中口面近场的精度较差，是因为在应用口面近场等效时，不是考虑封闭的口面近场，而只是采用了波导的口面(95%以上的能量出口，这里取主要贡献)。

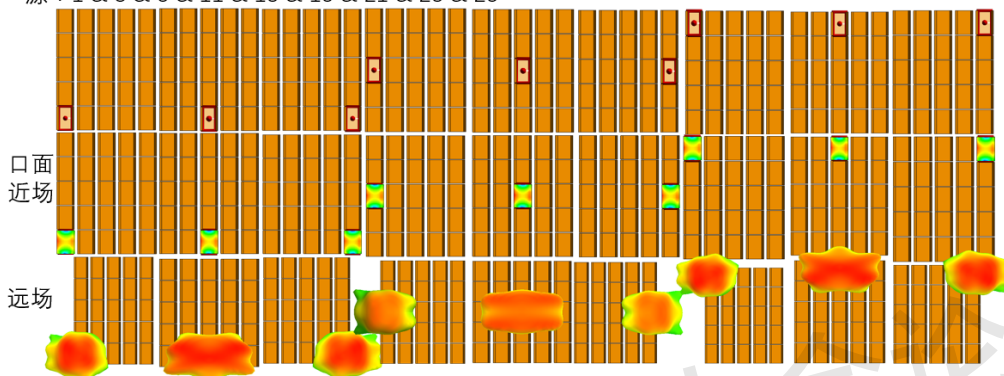




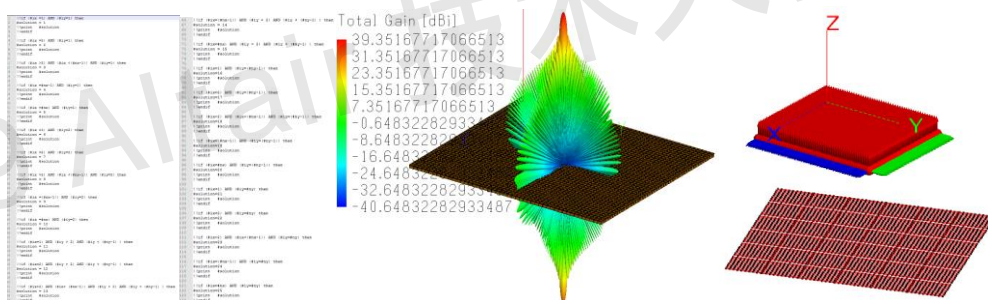
(c)49x49 阵列每个单元对应 5x5 子阵的编号说明

(d)5x5 子阵各单元编号

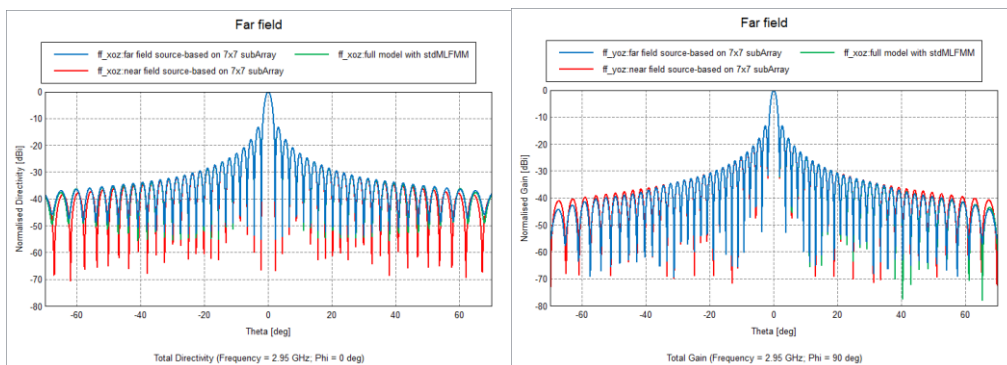
源：1 & 3 & 5 & 11 & 13 & 15 & 21 & 23 & 25



(e) 5x5 阵列对应每个单元分别加激励对应的口面近场和远场方向图，选择显示了 1、3、5、11、13、15、21、23 和 25



(f)通过脚本编程快速为 49x49 阵列建立远场等效或近场等效阵列 (g)全模型阵列的 3D 增益方向图 (h) 示意说明远场方向图阵列 (49x49)和口面近场的应用(只显示了 6x6 部分)



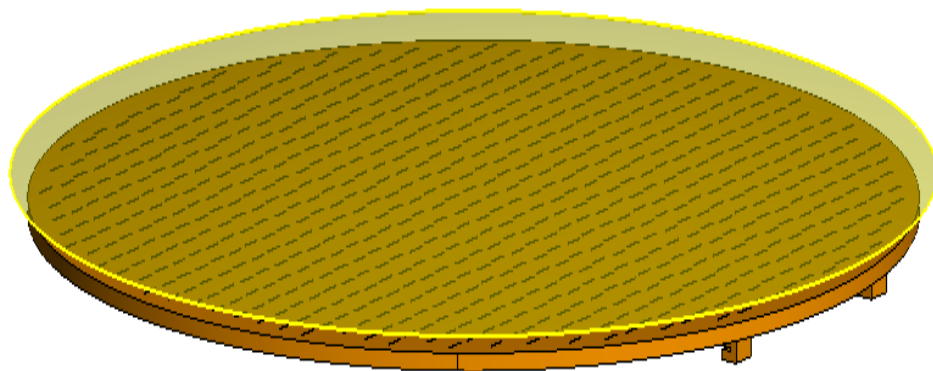
(i) phi=0,phi=90 极化面的增益方向图：远场等效(蓝色) vs 全模型(绿色) vs 近场等效(红色)

图 2-4 远场等效阵列和近场等效阵列方法应用于天线阵列的仿真

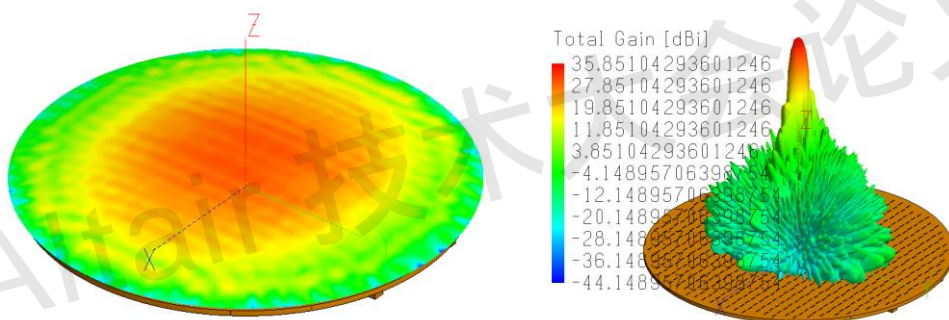


## 2.2 天线罩的仿真

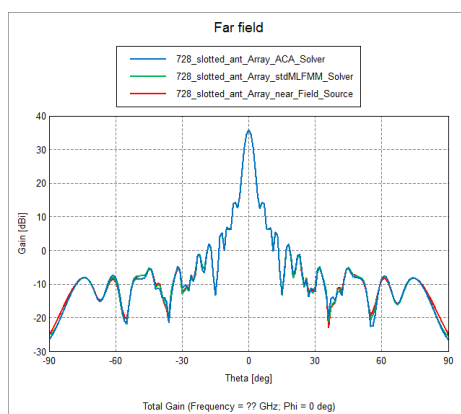
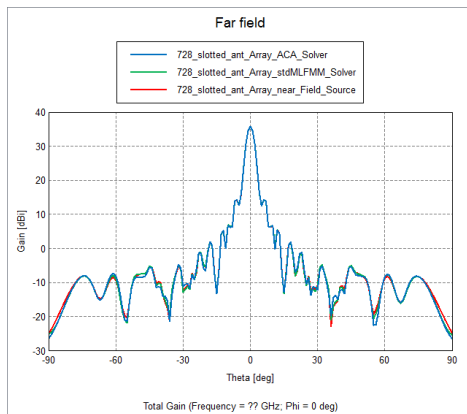
天线罩的透波特性仿真是一个复杂的问题,口面近场等效源技术是广泛采用的工程方法,在该例子中,波导裂缝阵列天线(包含 728 个缝隙)分别采用了最新的自适应交叉矩阵直接求解器(ACA)和稳定的多层快速多极子(stdMLFMM)求解技术[7],并与口面近场等效法进行了对比,对于天线罩的透波,天线阵列采用选择口面近场等效法。



(a) 波导裂缝天线口面采样



(b) 口面近场云图分布 (c) 波导裂缝阵列天线的 3D 方向图



(d)  $\phi=0,90$  极化面上的增益方向图对比-ACA (蓝色) & stdMLFMM(绿色) & 近场等效源(红色)

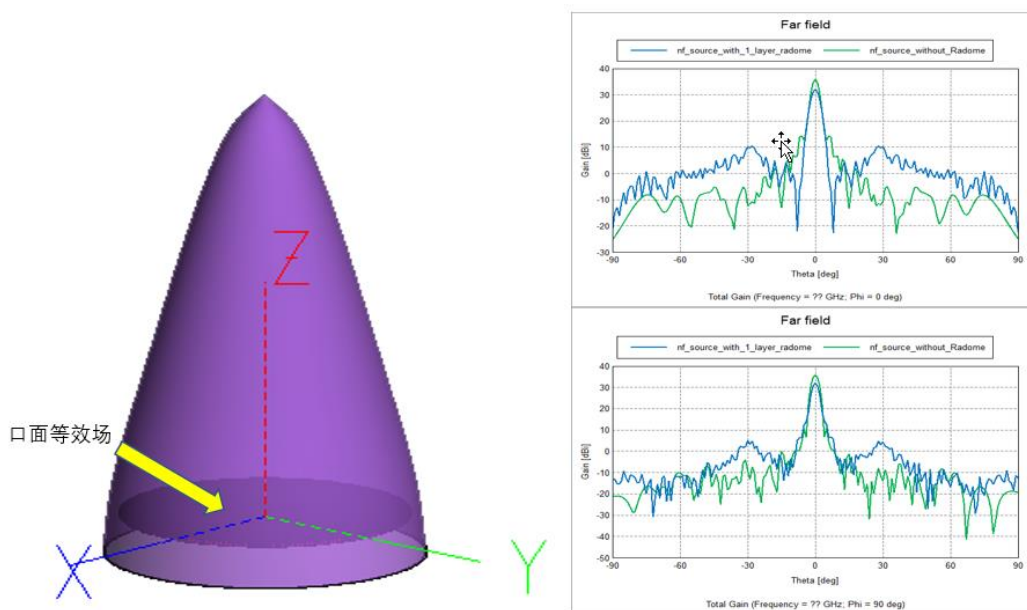
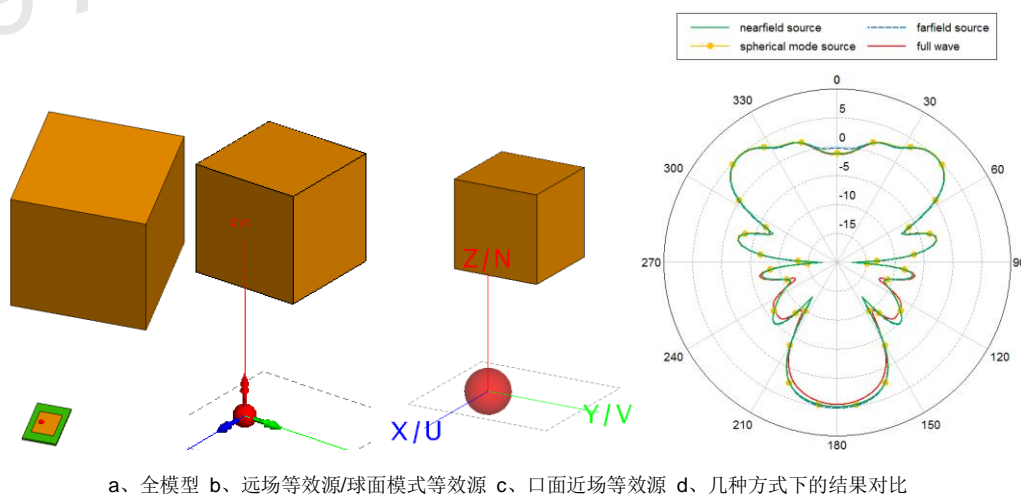
(e)  $\phi=0, 90$  极化面 2D 增益方向图 - 带天线罩(蓝色) & 不带天线罩(绿色)

图 2-5: 采用口面近场等效源法分析单层天线罩透波特性

## 2.3 天线布局的仿真

等效源技术非常适用于天线布局特性的仿真，在这里介绍的例子 1 分析考虑金属方体后微带天线的远场方向图特性，对于微带天线的处理，分别考虑近场等效源（nearfield source）、远场等效源（farfield source）、球面模式场等效源（spherical mode source）以及考虑全模型采用全波算法（full wave），从结果对比来看，采用等效源的方式具有与全波方法一样的准确度。

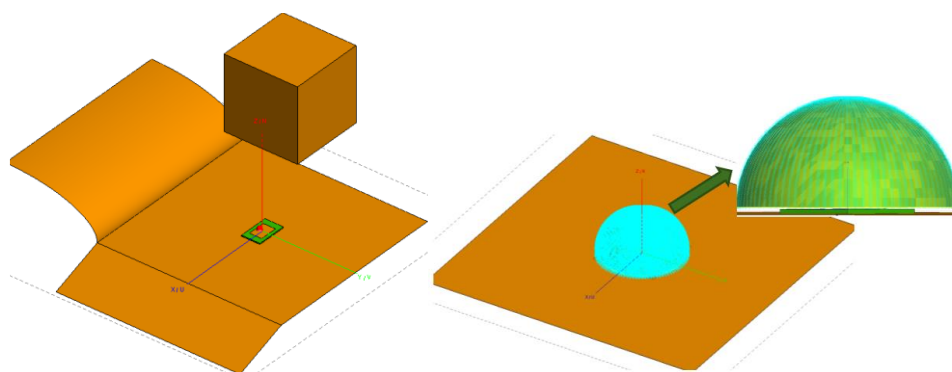


a、全模型 b、远场等效源/球面模式等效源 c、口面近场等效源 d、几种方式下的结果对比

图 2-6 考虑金属方体对微带天线的遮挡效应

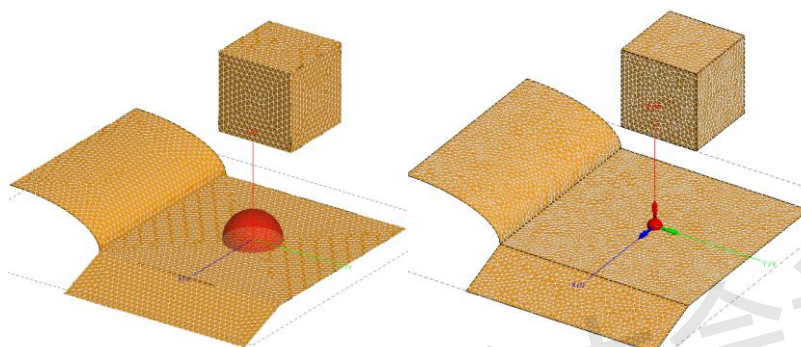
例子 2 分别采用口面近场（半包络采样面）等效源(near field source)、辐射远场方向图等效源(farfield source)以及全波矩量法方法(full MoM)分析了金属方体对带复杂异形金属地板微带天线方向图的影响，计算结果具有很好的一

致性。



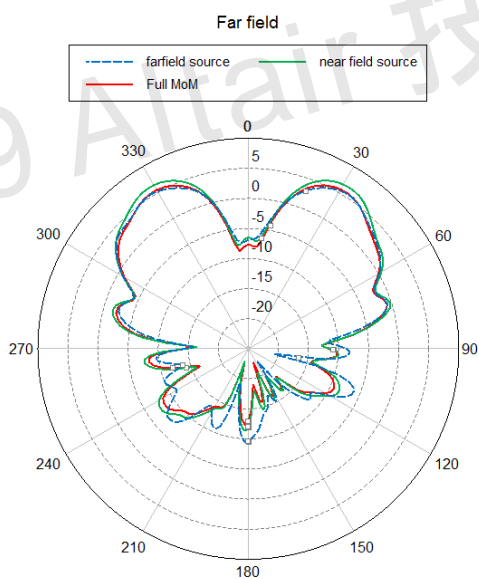
a、全模型(微带天线+异形金属地板+金属方体)

b、计算包络近场源

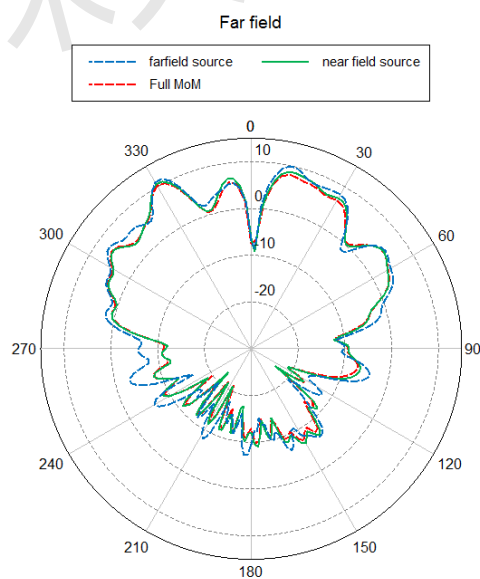


c、采用口面近场等效微带天线

d、采用远场方向图等效微带天线



e、 $\phi=0$  度时极化面的增益方向图



f、 $\phi=80$  度时极化面的增益方向图

图 2-7 分析金属方体对带复杂异形金属地板微带天线方向图的影响

### 3 分析与结论

等效源法(EQS)是一种非常有效地降低电磁场计算复杂度的一种工程应用技术，Altair Feko 最早把等效源技术商业化，并提供了丰富的等效源技术。该技术已经广泛应用于反射面天线、透镜天线、天线阵列、天线罩透波、天线布局等复杂问题的仿真，同时，也可以应



用于系统的电磁兼容(EMC)、复杂目标体的隐身(RCS)特性等。

通过本文一些案例的介绍,可以看出,采用等效源方法具有很好的仿真精度。对于天线罩透波、天线阵列等问题,也可以采用子阵的等效法,可以根据问题灵活选择 3x3, 5x5 或 7x7 等子阵形式,在基于全波(MoM)计算子阵模型的时候,充分考虑了阵列单元之间的耦合和边缘效应,采用远场阵列或近场阵列组成更大的天线阵列时,能够保证天线阵列的计算精度,对于天线罩的透波等问题,等效源法可以精确衡量天线罩的透波率、旁瓣畸变、瞄准误差等参数。

## 4 参考文献

- [1] 林昌禄 主编《天线工程手册》电子工业出版社 2002
- [2] Altair Feko v2019 User's Manual, 2.22.3, P297-299
- [3] Altair Feko v2019 User's Manual, "A-1 EDITFEKO Cards AR card", P934-939
- [4] Altair Feko v2019 User's Manual, "A-1 EDITFEKO Cards AS card", P940-946
- [5] Altair Feko v2019 User's Manual, "A-1 EDITFEKO Cards AP card", P926-933
- [6] 刘源, 焦金龙 阵列天线的 FEKO 仿真分析, 计算机辅助工程, 2009, 18(1), 73-77
- [7] Altair Feko v2019 User's Manual, 5.1 "Feko solution methods", P583-597
- [8] 刘源, 焦金龙, 王晨, 王晓峰等主编 《FEKO 仿真原理与工程应用》 机械工业出版社 2017, P93-97