

文章编号: 2095-4980(2013)05-0684-06

基于 FEKO 和 CST 的太赫兹目标 RCS 仿真

蒋彦雯, 邓 彬, 王宏强, 秦玉亮, 王瑞君

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 利用 FEKO 和 CST 2 套电磁计算软件对太赫兹频段目标雷达散射截面(RCS)进行对比仿真。首先计算同一理想导体球在 1 GHz~500 GHz 频率范围内的 RCS, 得到理想导体球 RCS 特性曲线, 与理论值进行比较, 得出太赫兹频段下两者仿真性能相差较小的结论。然后分别对理想导体球、圆柱体和方形平板在太赫兹频段下不同姿态角的 RCS 值进行计算, 结果表明, 两者在 RCS 仿真上因目标不同而呈现不同性能, 在计算中应根据实际目标选取合适的软件进行计算。

关键词: 太赫兹; FEKO 软件; CST 软件; 雷达散射截面

中图分类号: TN955⁺.1; TP391.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201305.0684

RCS simulation in THz band based on FEKO and CST

JIANG Yan-wen, DENG Bin, WANG Hong-qiang, QIN Yu-liang, WANG Rui-jun

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: The Radar Cross Sections(RCSs) of target radar in Terahertz band are simulated and compared in two sets of electromagnetic computing software, FEKO and CST. The RCSs of the same perfect conducting sphere are calculated in 1 GHz–500 GHz, thus the RCS characteristic curve is obtained, and compared with the theoretical values. The comparison results indicate that the simulation performances of FEKO and CST in Terahertz band are similar. Then the RCSs of perfect conducting sphere, cylinder and rectangular plate in THz band under different aspect angles are calculated by using FEKO and CST. It suggests that FEKO and CST exhibit different performances with different targets and suitable software should be chosen according to different targets.

Key words: Terahertz; FEKO; CST; Radar Cross Section

雷达散射截面(RCS)是度量雷达目标对照射电磁波散射能力的一个物理量, 在雷达目标成像和识别中具有重要作用。RCS 在微波波段、红外激光波段的计算和测量已有大量研究。近年来, 随着太赫兹技术的兴起, 太赫兹频段目标 RCS 特性越来越多地引起人们的兴趣。太赫兹(THz)波^[1-3]通常指频率在 0.1 THz~10 THz(对应波长 30 μm ~3 mm)之间的电磁波, 其频率介于毫米波与红外光之间。由于太赫兹波频率较高, 缺乏有效的太赫兹辐射和检测手段, 人们对该波段的了解非常有限, 太赫兹也成为电磁波谱中最后一个未被全面研究和利用的频率窗口, 被称为“太赫兹空隙”。随着太赫兹源、检测和相关器件的突破, 太赫兹波大带宽、高分辨、穿透性好等一系列优越性能被发现, 在空间监视、导弹预警、反恐行动等领域显示出广阔的应用前景。太赫兹雷达系统已初见端倪, 准确快速地预测太赫兹频段目标 RCS^[4-6]已迫在眉睫。目前, 太赫兹频段 RCS 测量系统尚不成熟, 因此通过理论方法和软件来计算太赫兹频段 RCS 是研究目标特性的主要手段和首选方法。在主流电磁计算软件中, FEKO 和 CST 应用较为广泛, 其在微波波段的 RCS 计算性能已得到充分验证。本文主要研究对比 FEKO 和 CST 在太赫兹频段目标 RCS 的计算性能, 为太赫兹雷达系统论证设计提供依据。

1 基于 FEKO 和 CST 的 RCS 计算

1.1 利用 FEKO 计算 RCS

FEKO^[7-11]是针对天线结构设计与布局、电磁辐射与散射、电磁兼容 EMC 而开发的专业电磁场分析计算软件。

利用 FEKO 软件实现目标 RCS 仿真计算可分为以下 5 个主要步骤:

1) 几何建模。设置模型参数,利用自带的 CADFEKO 模块来建立几何模型,也可以通过丰富的其他建模软件接口导入模型。本文针对的是典型标准体目标,可以用 CADFEKO 模块很快自行建立。

2) 参数设置。主要是设置入射波参数,选择平面波入射,设置平面波的幅度、相位、极化方向、入射方向和频率范围。

3) 网格划分。一般来说网格单元边长取 $1/8 \sim 1/10$ 波长,而对采用物理光学(Physical Optics, PO)算法则可取到 $1/3$ 波长。应选择合适数量的小单元,网格数量太少会使得曲面模型严重失真,网格太多则会浪费有限的计算机资源。

4) 算法选择。根据硬件条件以及目标电尺寸选择合适算法。PO法适用于处理表面比较平滑的模型,内存消耗较少,效率较高,可直接在模型的面属性项中选取。

5) 求解计算以及数据导出。选择计算单站 RCS,并设置结果输出为 .out 文件,可方便导入到 MATLAB,进行下一步的分析对比。

1.2 利用 CST 计算 RCS

CST^[12-13]微波工作室是德国 CST 公司开发的,用于天线及微波无源器件的仿真、分析、快速设计、精确高频仿真的软件包。CST MWS 可以对电小、电中、电大各种电尺寸进行仿真分析,适应用户各种需求,尤其适合于电大尺寸的计算。利用 CST MWS 软件实现目标 RCS 仿真计算可分为以下 6 个主要步骤:

1) 工程建立。根据目标电尺寸大小选择合适的工程模板仿真计算 RCS。

2) 几何建模。设置模型参数(尺寸、频率、时间等的单位),可以自行建立几何模型或导入已建立的模型。

3) 参数设置。包括背景属性、频率范围、边界条件,选择平面波入射,设置入射波的极化类型、传播法矢量和电场矢量。

4) 网格划分。一般来说网格单元边长取 $1/8 \sim 1/10$ 波长。CST 可选择六面体剖分,可用求解器较多。本文针对的是表面比较光滑的模型,选择面剖分。

5) 求解器选择。CST 用于仿真计算 RCS 的主要有微分方程(I)求解器和渐近(A)求解器。I 求解器的计算量很大,内存占有资源较多。考虑到本文研究的是 THz 下目标的 RCS,频率较高,为节约资源,选用 A 求解器。

6) 求解计算以及数据导出。设置求解器参数,包括单站 RCS、计算精确度、最大反射次数、入射波幅度和极化类型以及扫频和角度范围,并选择将数据结果存储在 cache 中。

2 不同频段金属球 RCS 计算结果比较

金属导体球不论是在瑞利区、谐振区或光学区都是最有用的定标体。本文分别用 FEKO 和 CST 计算球的 RCS,将计算结果与球的 RCS 精确解对比,通过计算不同频段的均方误差,对 2 种软件的性能进行比较。

2.1 不同频段金属球 RCS 计算结果

选定理想导体球的半径为 1 cm,计算 1 GHz~500 GHz 下球的单站 RCS 值。FEKO 和 CST 仿真参数设定相同,入射波为平面波,幅度为 1 V/m,水平极化,入射方向 $\theta = 0, \varphi = 0$,剖分边长均为 $1/8$ 波长,选择三角形面剖分,以 0.01 GHz 为步长进行频率采样,共 4 991 个频点。FEKO 和 CST 的仿真结果如图 1 所示。

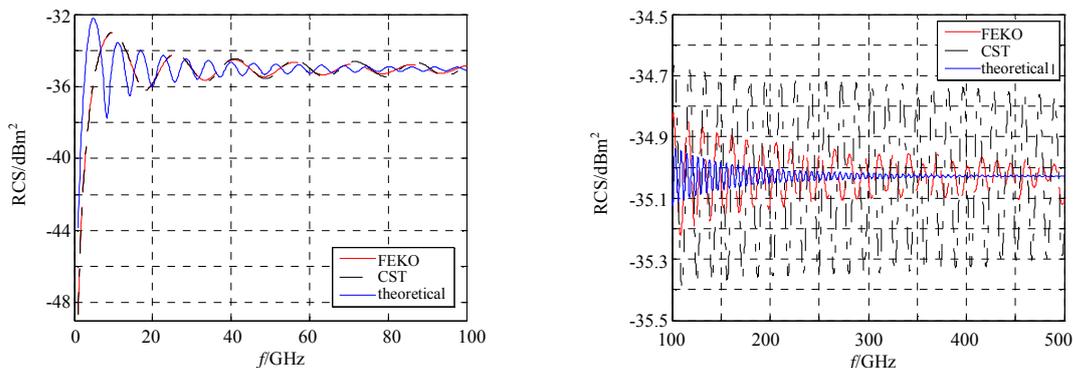


Fig.1 Comparison of RCS simulation results for perfect conducting sphere in different frequencies

图 1 理想导体球 RCS 仿真计算结果对比

从图 1 可以看出, FEKO 和 CST 的 RCS 仿真结果的曲线走势一致。在瑞利区和谐振区, FEKO 和 CST 的 RCS 仿真结果基本一致。在光学区, 目标 RCS 主要由其形状和表面的粗糙度决定, 同一球体的 RCS 值应不随频率的变化而变化, 但在图 1 中, CST 的 RCS 仿真结果振荡幅度比 FEKO 大, 说明 CST 的 RCS 仿真性能在高频段下的稳定性不如 FEKO。

2.2 误差分析

为进一步分析对比 FEKO 和 CST 的 RCS 仿真性能, 本文将两者的仿真结果与理论 RCS 值进行比较。金属导体球的后向 RCS 理论计算公式^[14]为:

$$\sigma = \frac{\lambda^2}{\pi} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (n+0.5)(b_n - a_n) \right|^2 \quad (1)$$

式中:

$$\begin{cases} a_n = \frac{j_n(ka)}{h_n^{(1)}(ka)} \\ b_n = \frac{kaj_{n-1}(ka) - nj_n(ka)}{kah_{n-1}^{(1)}(ka) - nh_n^{(1)}(ka)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: λ 为雷达工作波长; a 为导体球半径; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; $h_n^{(1)}(x) = j_n(x) + jy_n(x)$ 为第一类球汉开尔函数, $j_n(x)$ 为第一类球贝塞尔函数, $y_n(x)$ 为第二类球贝塞尔函数。根据上述理论公式, 可编程求解 1 GHz~500 GHz 内球的 RCS 值, 将其与 FEKO 和 CST 进行比较, 如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 在谐振区, FEKO 和 CST 的 RCS 仿真结果基本一致, 但振荡周期明显比理论值大。在光学区, FEKO 的 RCS 仿真结果更为接近理论值。

定义均方根误差的计算公式为:

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\sigma_{i,j} - \sigma_{0,j})^2}, i=1,2 \quad (3)$$

式中: $i=1,2$ 分别表示 FEKO 和 CST 的 RCS 仿真值; σ_0 表示理论 RCS 值。选取 1 GHz~21 GHz, 100 GHz~120 GHz, 400 GHz~420 GHz 3 段数据, 分别比较 FEKO 和 CST 的计算误差, 得到表 1 所示数据。图 2 为 3 段数据下 FEKO, CST 仿真结果和理论值的比较。从图 2 和表 1 中可以得出以下重要结论:

表 1 均方根误差比较

Table 1 Comparison of RMSE

	1 GHz~21 GHz	100 GHz~120 GHz	400 GHz~420 GHz
FEKO	2.636 4	0.153 3	0.037 6
CST	2.641 7	0.278 4	0.202 0

1) 频率在 1 GHz~21 GHz 范围内时, FEKO, CST 的仿真结果一致, 但与理论值相差较大, 误差较大, 达到了 10^1 量级, 说明此时两者仿真性能较差。

2) 频率在 100 GHz~120 GHz 范围内时, FEKO, CST 仿真结果和理论 RCS 值均在 1 dB 范围内波动, 变化规律一致, 但 FEKO, CST 仿真结果的振荡幅度明显比理论值大, 此时 FEKO, CST 的仿真误差为 10^{-1} 量级, 两者仿真性能均较好。

3) 频率在 400 GHz~420 GHz 范围内时, FEKO 的仿真误差较小, 仿真结果基本与理论值一致, 性能很好, 但 CST 的仿真结果振荡幅度比 FEKO 大, 误差仍为 10^{-1} 量级, 仿真性能不如 FEKO 好, 但相差不大。

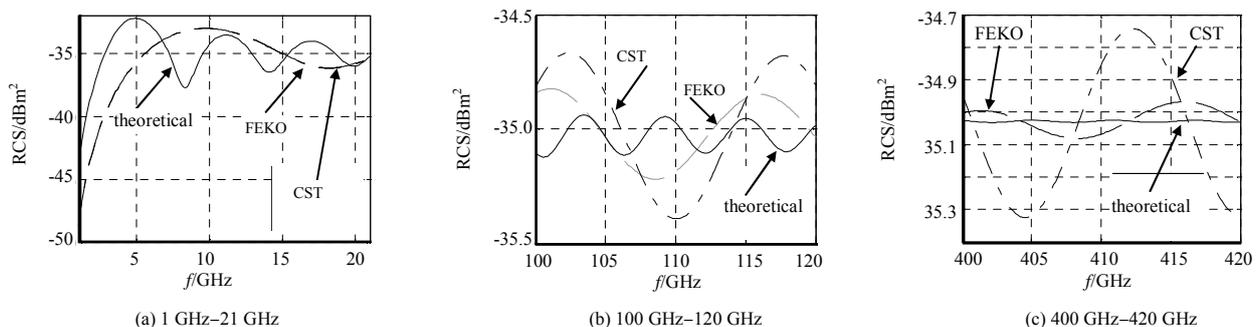


Fig.2 Comparison of RCS simulation results for perfect conducting sphere in different frequency bands

图 2 理想导体球不同频段下 RCS 值的比较

3 太赫兹频段典型目标 RCS 仿真比较

第2节在不同频段下对 FEKO 和 CST 在理想导体球 RCS 计算性能方面进行了比较。RCS 计算性能与目标类型关系很大,本节利用 FEKO 和 CST 分别仿真计算理想球体、圆柱体、方形平板 3 类定标体不同姿态的 RCS,继续对比两者的仿真性能。

用测量方法求得各种目标的 RCS 时,都需要有一个已知精确 RCS 的定标体进行相对标定。因此必须掌握几种不同形状的定标体 RCS 值,尤其是太赫兹频段下定标体的 RCS 值,这在工程上具有很大的实用价值。

3.1 球体

选定理想导体球的半径为 5 cm,计算太赫兹频段下导体球不同姿态下的单站 RCS 值。FEKO 和 CST 的仿真参数设定相同,剖分边长均为 1/8 波长,选择三角形面剖分,入射波为平面波,幅度为 1 V/m,水平极化,入射方向 $\varphi=0$,以 1° 为步长对 θ 进行采样,共 181 个采样点(如图 3 所示),分别计算 300 GHz,1 THz,2 THz 3 个频点的 RCS 值,得到 FEKO 和 CST 的仿真结果如图 5 所示。

由于球是完全对称的目标,因此 RCS 值不随 θ 的变化而产生显著变化。光学区,理想导体球 RCS 理论值为 πa^2 ,即 -21.049 1 dBm²。从图 4 中可以看出,FEKO 和 CST 仿真得到的理想导体球的 RCS 均在一定范围内波动,FEKO 的计算结果更接近理论值。 $f=0.3$ THz 时,FEKO 仿真结果的振荡幅度比 CST 大,表明此时 FEKO 的稳定性不如 CST。 $f=1$ THz 和 $f=2$ THz 时,FEKO 和 CST 仿真结果振荡幅度相近,说明此时两者仿真性能相差不大。

3.2 圆柱体

选定理想圆柱体的底面半径为 5 cm,柱高 10 cm(如图 4 所示),计算太赫兹频段下圆柱体不同姿态下的单站 RCS 值。FEKO 和 CST 的仿真参数设定与球体相同,得到 FEKO 和 CST 的仿真结果如图 6 所示。

由于圆柱体为轴对称且上下对称的目标,因此不同 θ 角的 RCS 值关于 $\theta=90^\circ$ 对称,如图 6 所示。 $\theta=0^\circ,90^\circ,180^\circ$ 时,由于回波主要是镜面反射,圆柱体的 RCS 值非常大。 $\theta=0^\circ,180^\circ$ 时,圆柱体的 RCS 值相等,回波可等效看作等面积圆形平板所产生的镜面反射,此时目标 RCS^[14]可写为:

$$\begin{cases} RCS = 4\pi |G(k)|^2 \\ G(k) = -\frac{jkA}{2\pi} \end{cases} \quad (4)$$

式中: A 为镜面反射区面积,即圆柱底面面积; $k=2\pi f/c$ 为波数, $G(k)$ 为传递函数。由式(4)可知,此时 RCS 值与频率的平方成正比。 $f=0.3$ THz 时, $RCS \approx 30$ dBm²; $f=1$ THz 时, $RCS \approx 40$ dBm²; $f=2$ THz 时, $RCS \approx 45$ dBm²,随着频率的增大, RCS 值也相应变大。

$\theta=90^\circ$ 时,回波等效为单曲型镜面反射,其传递函数可写为^[14]:

$$G(k) = 0.5 \sqrt{\frac{k}{\pi}} \exp\left(-j\frac{3\pi}{4}\right) \int_0^H R^{0.5} dz \quad (5)$$

式中: H 为圆柱体高; R 为曲面的曲率半径; z 为沿镜面反射线的坐标。同样,此时 RCS 值与频率成正比。图 6 中, $f=0.3$ THz 时, $RCS \approx 13$ dBm²; $f=1$ THz 时, $RCS \approx 17$ dBm²; $f=2$ THz 时, $RCS \approx 19$ dBm²。随着频率的增大, RCS 值也相应变大,相比于镜面反射,增大幅度变小。从图 6 中可以看出, FEKO 和 CST 仿真计算的圆柱体不同频点 RCS 值随角度的变化曲线几乎重合在一起,表明两者仿真性能一样。

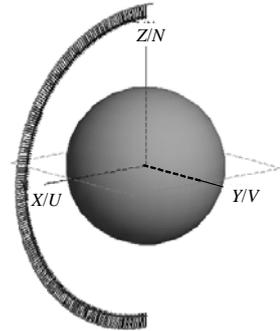


Fig.3 Schematic diagram of the sampling of θ for perfect conducting sphere
图3 理想导体球的 θ 采样示意图

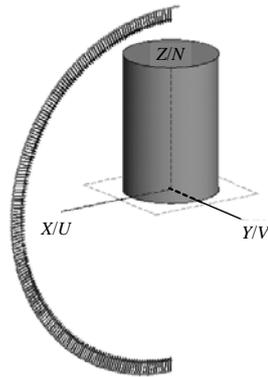


Fig.4 Schematic diagram of the sampling of θ for perfect conducting cylinder
图4 理想圆柱体的 θ 采样示意图

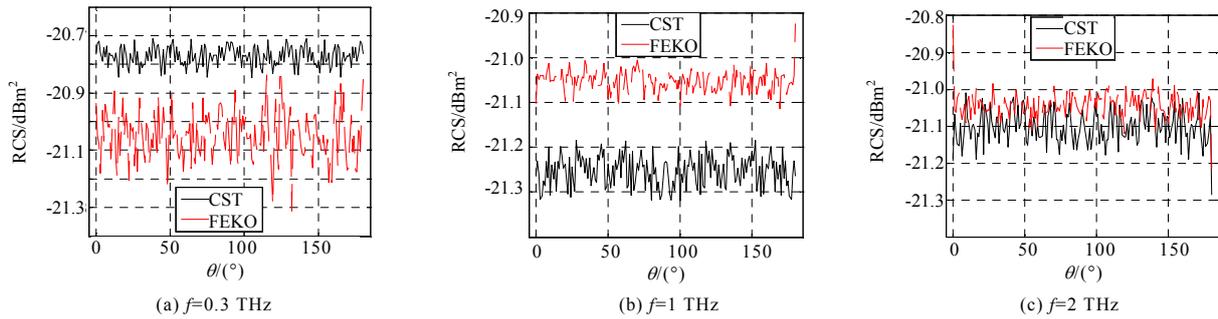


Fig.5 RCS simulation results comparison in FEKO and CST for perfect conducting sphere under different attitudes

图 5 理想导体球不同姿态下 FEKO 和 CST 的 RCS 仿真结果对比图

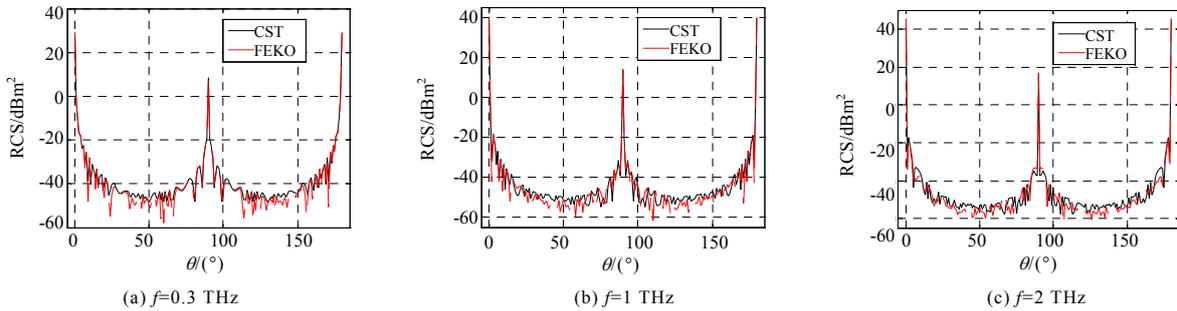


Fig.6 RCS simulation results comparison in FEKO and CST for perfect conducting cylinder under different attitudes

图 6 理想圆柱体不同姿态下 FEKO 和 CST 的 RCS 仿真结果对比图

3.3 方形平板

选定理想方形平板的边长为 10 cm(如图 7 所示), 计算太赫兹频段方形平板不同姿态下的单站 RCS 值。FEKO 和 CST 的仿真参数设定与球体相同, 得到 FEKO 和 CST 的仿真结果如图 8 所示。

$\theta=0^\circ, 180^\circ$ 时, 回波为平板产生的镜面反射, 此时 RCS 值与频率的平方成正比, $f=0.3$ THz 时, $RCS \approx 30$ dBm²; $f=1$ THz 时, $RCS \approx 41$ dBm²; $f=2$ THz 时, $RCS \approx 47$ dBm²。随着频率的增大, RCS 值也相应变大。当 $\theta=90^\circ$ 时, FEKO 得到的 RCS 值为 $-1\ 000$ dBm²(为使图 8 的可观性更强, 此时 RCS 值只取到 -100 dBm², $-1\ 000$ dBm² 为 FEKO 仿真得到的实际数据), 即没有回波数据, 但 CST 得到的 RCS 值与邻近角度无异, 根据电磁散射机理可知, FEKO 的仿真结果更为符合方形平板的电磁理论模型, 仿真性能更好。

如图 8 所示, 当 θ 在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 和 $130^\circ \sim 180^\circ$ 范围内时, CST 计算得到的 RCS 值的波动幅度比 FEKO 小, 表明此时 CST 的计算性能较好。

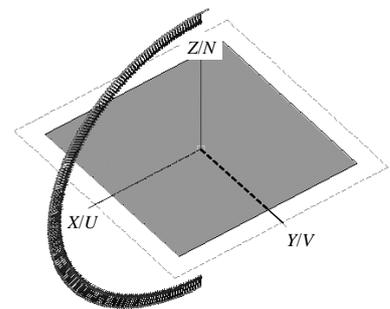


Fig.7 Schematic diagram of the sampling of θ for perfect conducting rectangular plate

图 7 理想方形平板的 θ 采样示意图

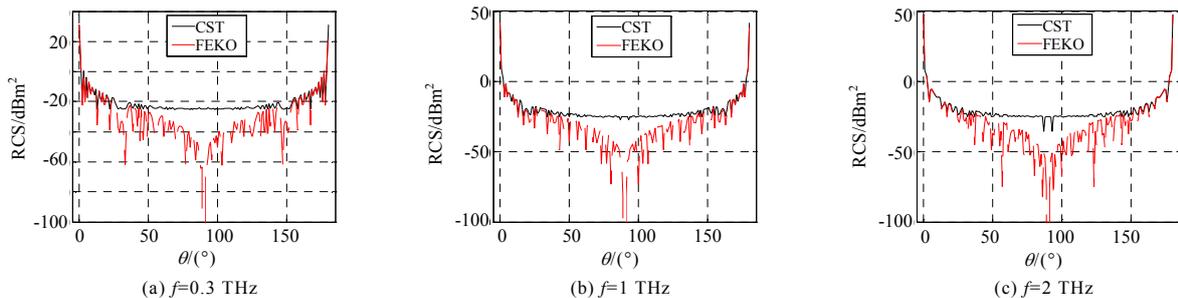


Fig.8 RCS simulation results comparison in FEKO and CST for perfect conducting rectangular plate under different attitudes

图 8 理想方形平板不同姿态下 FEKO 和 CST 的 RCS 仿真结果对比图

4 结论

综上所述, FEKO和CST可以对太赫兹目标的RCS进行很好的仿真计算, 这对太赫兹雷达成像与识别、散射中心估计具有重要的指导意义。通过仿真发现, 在太赫兹频段:

1) 对不同频率范围内导体球的RCS仿真, FEKO仿真精确度总体上比CST好。

2) 太赫兹频段, 对于理想导体球和圆柱体, CST和FEKO的RCS仿真性能相近, 能够对太赫兹频段RCS进行精确计算。

3) 太赫兹频段, 对于方形平板, 小角度入射情况下, FEKO和CST的RCS仿真结果都符合理论模型, 仿真性能好; 大角度入射情况下, CST的仿真性能较好。

总之, 实际计算中应根据实际目标, 选取合适的软件进行计算。需要说明的是, 本文目前只是对太赫兹下理想、表面光滑模型进行仿真。出于更加逼近实际的需要, 一方面需要再加入更复杂的目标模型, 如弹头、坦克、飞机、汽车等; 另一方面, 更重要的是由于太赫兹波长短, 实际中目标介电常数在太赫兹频段会发生变化, 同时表现出一定的粗糙度, 需要按照实际雷达系统的特性和水平对各个模型加入粗糙面的影响, 这正是下一步重点开展的研究工作。

参考文献:

- [1] 王忆锋,毛京湘. 太赫兹技术的发展现状及应用前景分析[J]. 光电技术应用, 2008,23(1):1-4,41. (WANGYifeng,MAO Jingxiang. Analysis on Development status of Terahertz Technology and Application Prospect[J]. Electro-Optic Technology Application, 2008,23(1):1-4,41.)
- [2] 刘盛纲,钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009,38(5): 481-486.
- [3] 牧凯军,张振伟,张存林. 太赫兹科学与技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009,4(3):221-230.
- [4] Jansena C,Krumbholza N,Geiseb R,et al. Alignment and Illumination Issues in Scaled THz RCS Measurements[C]// 34th International Conference on Infrared,Millimeter,and Terahertz Waves, 2009. Busan:[s.n.], 2009:1-2.
- [5] Iwaszczuk K,Heiselberg H,Jepsen P U. Terahertz radar cross section measurements[C]// 2010 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves. Rome:[s.n.], 2010:1-3.
- [6] 邹鲲,梁甸农. 低频超宽带SAR定标体散射特性[J]. 信息与电子工程, 2005,4(1):14-17. (ZOU Kun,LIANG Diannong. Scattering of the Calibrator for Low Frequency UWB SAR[J]. Information and Electronic Engineering, 2005,4(1):14-17.)
- [7] 陈德喜,颜俐,王海婴. FEKO软件的RCS仿真应用[J]. 舰船电子工程, 2008,28(9):125-128,203.
- [8] 李振,察豪,王月清,等. 基于FEKO的球体电磁散射分析[J]. 舰船电子工程, 2008,28(10):191-193.
- [9] 赵雷鸣,李德银,刘昊. 基于FEKO软件仿真计算战斗机的RCS[J]. 计算技术与自动化, 2010,29(4):93-96.
- [10] 白前. 基于FEKO的圆抛物面天线电性能分析系统开发[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010.
- [11] 洪丽娜,何洪涛,郝晓军,等. 微波暗室静区性能仿真预测方法[J]. 信息与电子工程, 2012,10(3):295-299. (HONG Lina, HE Hongtao,HAO Xiaojun,et al. Quiet zone performance analysis based on simulation[J]. Information and Electronic Engineering, 2012,10(3):295-299.)
- [12] 任宇辉. 基于CST的串馈强耦合式波导窄边缝隙平面阵列天线的研究与设计[D]. 西安:西北大学, 2010.
- [13] 王菲. 基于CST的舰船RCS的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2011.
- [14] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.

作者简介:



蒋彦雯(1991-),女,湖南省衡阳市人,在读硕士研究生,从事太赫兹雷达成像技术与散射中心估计方法研究,email:j1991yuwen@163.com.

邓彬(1981-),男,山东省邹城市人,讲师,从事合成孔径雷达、太赫兹雷达成像研究。

王宏强(1970-),男,陕西省凤翔县人,研究员,“863”太赫兹专家,获国家科技进步二等奖、军队科技进步一等奖等奖项多项,现从事太赫兹技术、目标识别、雷达信号处理研究。

秦玉亮(1980-),男,山东省潍坊市人,副研究员,从事雷达信号处理、目标识别、量子雷达研究。

王瑞君(1986-),男,内蒙古凉城县人,在读博士研究生,从事雷达目标特性与信号处理研究。