

缩比模型的宽频时域太赫兹雷达 散射截面(RCS)研究*

梁达川¹⁾ 魏明贵¹⁾ 谷建强^{1)†} 尹治平²⁾ 欧阳春梅¹⁾ 田震¹⁾
何明霞¹⁾ 韩家广^{1)‡} 张伟力¹⁾

1)(天津大学太赫兹研究中心, 精密仪器光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

2)(合肥工业大学光电技术研究院, 合肥 230009)

(2014年5月7日收到; 2014年6月11日收到修改稿)

本文首次以钛宝石飞秒激光振荡级为抽运源, 搭建了国内首套宽频时域太赫兹雷达(带宽0.1—1.3 THz)并进行了基于标准球的系统校正验证. 利用该雷达测量了太赫兹波段三种缩比模型的散射时域信号. 通过改进后的后向投影算法对模型的轮廓外形进行了成像研究, 验证了新型时域散射信号成像机理. 太赫兹雷达更高的频率, 宽谱的特征和高分辨率成像的能力有望用于隐形外形设计过程, 成为新兴的太赫兹散射特征研究平台.

关键词: 太赫兹, 雷达, 雷达散射截面, 成像

PACS: 41.20.Jb, 84.40.Xb, 87.50.U-, 42.30.-d

DOI: 10.7498/aps.63.214102

1 引言

太赫兹波是指频率为0.1—10 THz (波长3 mm—30 μm)的电磁波^[1, 2], 在基础研究、生物医学、安全监测等领域具有广泛的应用前景^[3-6]. 近年来, 物体对太赫兹波的散射机理的研究越发得到重视, 而太赫兹波段的雷达工作则吸引了越来越多研究者的注意, 例如马萨诸塞州立大学和美国喷气实验室都在太赫兹雷达的散射特征测量和成像领域做了大量的先期工作^[7-12], 而国内的工程物理研究院和中国科学院电子研究所等单位也在太赫兹散射成像领域取得了一些先期研究成果^[13-15]. 太赫兹雷达系统中一类主要的分支是用于测量物体的雷达散射截面(RCS), 这类系统的主要优势在于^[16, 17]: 首先, 太赫兹波的波长比普通雷达波段更短, 运用在缩比模型RCS探测中可使缩比比例

更大, 特别适合于大型目标探测; 第二, 理论上太赫兹波雷达将比微波雷达具有更高的横向分辨率, 同时太赫兹的信号绝对带宽大, 目标成像识别能力也即纵向分辨率远高于普通微波雷达; 第三, 目前隐形飞机尚无针对太赫兹波段设计的, 对该频段探测系统难以获得有效的隐形效果, 因此太赫兹雷达具有反隐潜力. 当前大部分太赫兹雷达成像都是基于单频或扫频方式完成的, 频段大都集中在0.3 THz以下, 难以达到标准的太赫兹波段(1 THz及以上), 因而没能完全发挥太赫兹短波长所带来的横向分辨率优势; 而又由于扫频的频谱宽度一般较窄(10 GHz), 极大地限制了成像纵向分辨率的提高.

因为这些问题, 太赫兹时域光谱技术显现出其在雷达探测领域独有的优势. 20世纪80年代, Grischkowsky等发明了太赫兹时域光谱技术(tera-

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2014CB339800)、国家自然科学基金(批准号: 61107053, 61138001)和国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2011YQ150021)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: gjq@tju.edu.cn

‡ 通讯作者. E-mail: jiaghan@tju.edu.cn

hertz time domain spectroscopy, THz-TDS), 此后太赫兹时域光谱系统迅速成为研究太赫兹波段光谱学的主要手段^[18]. 早在2000年, McGowan等利用太赫兹时域光谱系统进行了0.2—1.4 THz的导体和介质圆柱体RCS的测量^[19]. 2010年, Jepsen等利用飞秒激光放大级为光源以波面倾斜激发的太赫兹时域频谱系统组建了近单站式太赫兹雷达, 对F-16战斗机的1:150金属缩比模型进行了全方位RCS测量^[20], 该系统带宽大于1 THz, 可以从中选取任意频点进行分析, 理论上纵向分辨率高, 但需借助飞秒放大级来提高太赫兹功率. Jansen等则利用光纤耦合太赫兹时域光谱系统进行了小型金属板的0.3, 0.5, 1 THz的RCS测量^[21], 并进一步测量了狂风战斗机与F117战斗机模型的RCS分布^[22]. 但是该工作对于散射信号的收集采用的是光纤耦合光电导天线探头移动扫描测量, 不属于近单站探测, 无法对真正雷达测量进行有效模拟.

本工作在光学结构机理上, 国际上首次以钛宝石飞秒激光振荡级为抽运源搭建出近单站式宽带太赫兹雷达系统, 频谱宽度达0.1—1.3 THz, 时间分辨率0.06 ps, 理论纵向分辨率达到9 μm . 同时, 以装甲车、航母、战斗机三种陆、海、空军事目标的缩比模型作为被测物体, 测得了目标缩比模型的360°太赫兹波段RCS分布, 测量结果与定性分析符合良好; 改进了后向投影算法, 初步实现了太赫兹雷达的探测与成像功能. 本工作实验验证了基于飞秒振荡级的太赫兹雷达机理, 有望应用于目标外形隐形设计和雷达散射特征研究过程中.

2 太赫兹雷达系统搭建

从光学结构机理上, 本工作中的雷达系统改自于经典的4 F太赫兹时域光谱系统, 其光学结构为紧缩场入射. 如图1所示, 以脉宽30 fs, 中心波长800 nm, 重复频率88 MHz的蓝宝石脉冲激光器作为光源, 输出激光被分成太赫兹发射天线的抽运光束和用于光电采样的接收端抽运光束. 受飞秒激光光束照射的加偏压光电导天线辐射产生宽带太赫兹波(0.1—1.3 THz), 经离轴抛物面镜P1(焦距10.16 cm)准直后形成平行太赫兹波; 离轴抛物面镜P2(焦距10.16 cm)与之后的球面镜M1(焦距60.96 cm)形成一个望远镜系统, 对太赫兹波扩束和准直, 使其光束全高宽达到120 mm. 随后平行太赫兹宽光束传播1670 mm到达目标物体, 目标物体被放置在角度分辨率为0.001°的旋转平台上. 经目标物体散射的太赫兹辐射由球面镜M2(焦距60.96 cm)与抛物面镜P3(焦距10.16 cm)组成的望远镜系统收集后由抛物面镜P4(焦距10.16 cm)会聚到达探测天线上. 太赫兹散射信号在到达接收球面镜之前传播了1550 mm. 入射路径与散射路径之间有9°的夹角. 此外, 在本系统中太赫兹波产生后由一组抬高镜抬高, 此后的光路都是在光学平台以上30 cm的高度传播, 避免了平台表面的反射影响. 整个光学系统的准直调整是通过将一个12 cm × 20 cm的方形平面反射镜放置于被测物体处调整完成的, 该镜可将所有接收端方向的太赫兹辐射反射至接收端. 最后, 为排除水蒸气的吸收影响, 太赫兹光路整体充入了干燥空气, 相对湿度(RH)可达4%. 整套设备占地面积较小, 在5 m²以内.

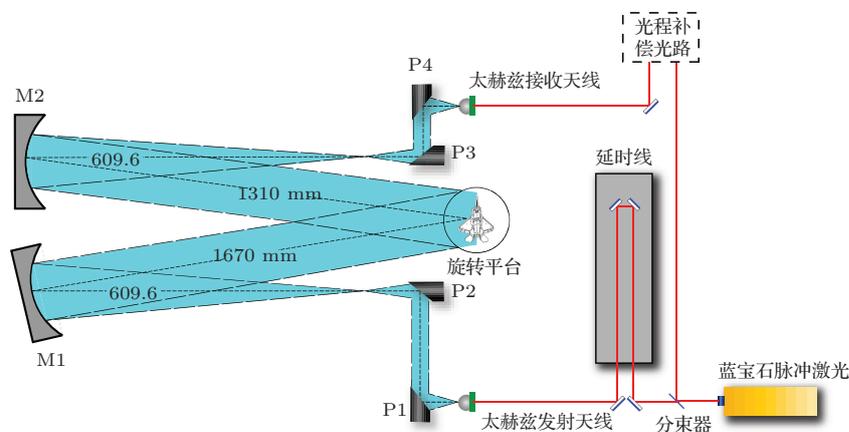


图1 (网刊彩色) 太赫兹时域雷达系统示意图

目标物体(航母模型, 战斗机模型等)被放置于聚苯乙烯塑料泡沫制成的支撑柱上, 泡沫支撑柱中90%是由空气组成的, 只有10%是塑料, 其空载散射信号如图2所示, 由图可知其太赫兹波段的反射率在噪声水平之下, 因此可推知载物台不影响对被测物模型的测量. 塑料泡沫柱同心安装在电动旋转台上, 可以360°全角度旋转, 旋转精度达0.001°, 从而实现对被测目标的全角度散射测量.

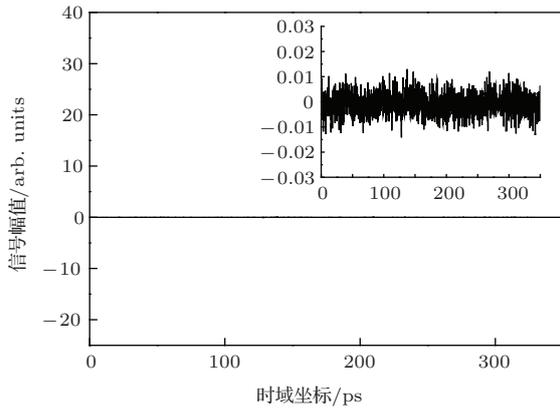


图2 泡沫塑料载物柱的空载时域信号

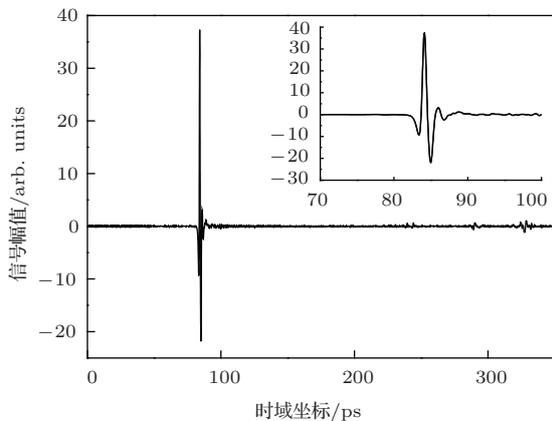


图3 平面镜反射的系统标准时域信号

调整太赫兹光路时, 将被测目标替换成一面12 cm × 20 cm尺寸的平面反射镜作为光路校准物体. 图3中所示是放置校准平面反射镜时获得的太赫兹雷达系统的最大太赫兹时域信号, 其空载信号信噪比为3392:1. 由于信号在硅透镜中的多次反射, 因此有二次反射太赫兹脉冲的时间分离, 由图中可见, 两个脉冲之间间隔约156 ps. 二次反射脉冲极为微弱, 比主脉冲小约2到3个数量级. 当进行样品测量时, 样品回波信号主要是散射信号, 远小于平面镜反射信号, 此时二次反射脉冲引起的误差可

以忽略不计.

3 太赫兹RCS测量与成像

3.1 RCS与系统校准

应用太赫兹雷达系统测量被测目标时, 将目标模型(航母模型, 战斗机模型等)替换校准反射镜, 水平摆放在塑料泡沫支撑柱上并令物体轴动轴与载物台转动轴同轴. 以一定角度步长转动旋转台至某一角度, 随后测量该角度下被测物的散射太赫兹时域信号. 旋转台转过360°后便获得被测目标的全角度散射时域信号. 利用这些时域数据, 就可以得到表征物体散射特性的RCS这一核心参数.

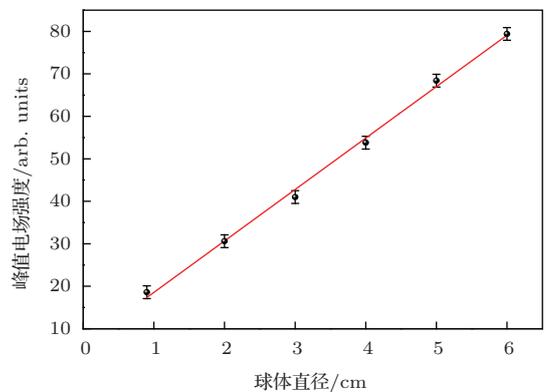


图4 不同直径金属球的峰值电场强度及拟合曲线

所谓RCS, 是反映目标截获和反射辐射功率能力的物理量, 它定量表征了目标散射到雷达探测端的电磁波强度, 是雷达领域的关键技术指标. RCS是用面积单位表征的参数, 其普遍定义为^[23]

$$RCS = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2}, \quad (1)$$

其中 E_i 和 E_s 分别是入射与散射电磁场, 而 R 是雷达与目标物体之间的距离. 在这个定义中, 必须保证入射波是平面波, 而我们的紧缩场系统提供准直后的平面波, 正好满足这一要求. RCS主要取决于目标物体的尺寸和形状, 入射和反射角度, 物体尺寸与波长的比例, 发射波和反射波的偏振, 还有物体的组成材料等因素.

为了验证雷达所测RCS的有效性, 雷达测量须经校准验证. 因完美电导体球的散射RCS情况最为简单, 本文中我们以之为标准物体对雷达系统进行校准验证. 被金属球散射的电磁波可以用Mie理论较好的描述^[24,25], 此理论认为, 对于

$k \cdot r \gg 1$ 的情况, 金属球的 RCS 是不依赖频率变化的, 并且等于它的物理截面, 也即 $RCS = \pi \cdot r^2$ 其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, r 是球体半径. 根据 RCS 的定义, 考虑到我们探测的信号是时域的, 因此有: $RCS \propto E_p^2$, 其中 E_p 为峰值电场强度, 由此正确时域雷达系统中应有 $E_p \sim r$ 这一关系. 我们利用搭建的太赫兹雷达系统分别测量了直径为 0.9 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, 6 cm 的金属球的峰值电场强度, 在图 4 中用误差棒表示. 可以看出它们是随直径成线性关系的, 其比例系数经拟合可得(红线), 此结果符合 $E_p \sim r$ 的关系, 初步证明了系统测量的准确性.

相比球体, 实际目标的结构大为复杂, 解析计算其 RCS 几乎不可能. 因此测量实际目标的缩比模型的 RCS 分布(角度)就成为推测目标雷达散射特征的重要手段. 根据麦克斯韦方程组, 目标与其缩比模型的 RCS 有以下关系 [26]:

若

$$\frac{\lambda_{\text{模型}}}{\lambda_{\text{目标}}} = \frac{L_{\text{模型}}}{L_{\text{目标}}} = \frac{1}{S}, \quad (2)$$

则

$$RCS_{\text{模型}} = \frac{1}{S^2} RCS_{\text{目标}}, \quad (3)$$

其中 S 是比例系数. 而太赫兹雷达也基于此原理, 因波长移至亚毫米量级, 模型尺寸更小, 且可用于研究更高频的雷达特性.

为测算复杂缩比模型的雷达散射截面, 本文中我们根据系统探测的是太赫兹时域脉冲信号这一特征, 引入了频域平均化(时域)雷达散射截面 [20], 定义为

$$RCS = \pi r_0^2 \cdot \frac{\int_0^T |E_{\text{物体}}(t)|^2 dt}{\int_0^T |E_{\text{校准}}(t)|^2 dt - \int_0^T |E_{\text{背景}}(t)|^2 dt}, \quad (4)$$

其中 $E_{\text{物体}}(t)$ 是经物体反射后探测到的时域散射电场, $E_{\text{校准}}(t)$ 是标准金属球的时域散射电场, $E_{\text{背景}}(t)$ 代表时域背景噪声. 本工作中的雷达系统是宽带时域探测系统, 其回波脉冲信号中包含了多频段的信息, 因此, 对所测得的散射时域信号进行简单的傅里叶变换之后, 我们也可获得系统频谱范围内任意频点的 RCS 数值与角度分布, 考虑到时域延迟的扫描范围为 946.67 ps, 我们系统的频率分辨率可以高达 1 GHz. 而频域的 RCS 与常用的

雷达 RCS 的定义几无差别, 如下:

$$RCS(\omega) = \pi r_0^2 \cdot \frac{|\tilde{E}_{\text{物体}}(\omega)|^2}{|\tilde{E}_{\text{校准}}(\omega)|^2 - |\tilde{E}_{\text{背景}}(\omega)|^2}, \quad (5)$$

其中 $\tilde{E}_i(\omega)$ 是 $E_i(t)$ 的傅里叶变换结果.

3.2 三种模型的雷达散射截面测量结果

雷达系统进行测量时, 将模型放置在泡沫平台上, 由电动平移台精确控制平台以 2° 的角度间隔逆时针转动 360° , 依次测量每个角度的散射时域信号, 并依照 (4) 式计算相应的频域平均化 RCS 值. 将每一组时域信号做傅里叶变换, 就能提取单个频点的散射信息, 并依照 (5) 式获得任意单频的 RCS 值分布. 鉴于大部分目标的材料均为金属材质, 且本工作以实验验证太赫兹雷达散射测量能力为主要目标, 本工作中测量的目标缩比模型均为金属模型, 忽略了实际目标上比例不多的非金属材质特性.

3.2.1 1:72 M3A2 布拉德利装甲车模型的雷达散射截面

我们首先利用太赫兹雷达对 1:72 比例的 M3A2 布拉德利装甲车模型(如图 5 中插图所示)进行了测量, 对应于全尺寸装甲车, 相当于用 1.4—19.4 GHz(L—K 波段)雷达探测该型号战车. 图 5(a) 中显示了频率平均化的 1:72 M3A2 布拉德利装甲车模型的 RCS 全角度图(角度分辨率为 2°), 单位为分贝平方米(在 RCS 测量中, 由于目标 RCS 变化的动态范围很大, 常用其相对于 1 m^2 的分贝数来表示, 即分贝平方米, 符号位 $\text{dB} \cdot \text{m}^2$, 即 dBsm). 可以看出在一些拥有大平面反射的角度上 (0° 与 180° , 两个坦克侧面), RCS 显著比其他角度要大很多, 这符合我们的预期, 因为通常情况下 RCS 和反射面积是成正比的. 图中 RCS 角度分布的对称性较好, 这从另一个方面佐证了本系统的近单站特性. 其不完全对称首先由于系统是双站系统, 其次是由装甲车模型本身的微小非对称性造成的. 图 5(b), (c) 分别展示了装甲车模型在 0.3 THz, 0.6 THz, 0.9 THz 频率处的单频 RCS 全角度分布图 (dBsm). 图中可见, 单频 RCS 的角度分布趋势与频率平均化的结果相符合, 但是其随角度的起伏却明显比时域 RCS 剧烈, 这是由于时域定义的 RCS 中对时间的积分过程相当于不同频域 RCS 的平均化, 从而会抹平 RCS 对角度的敏感性.

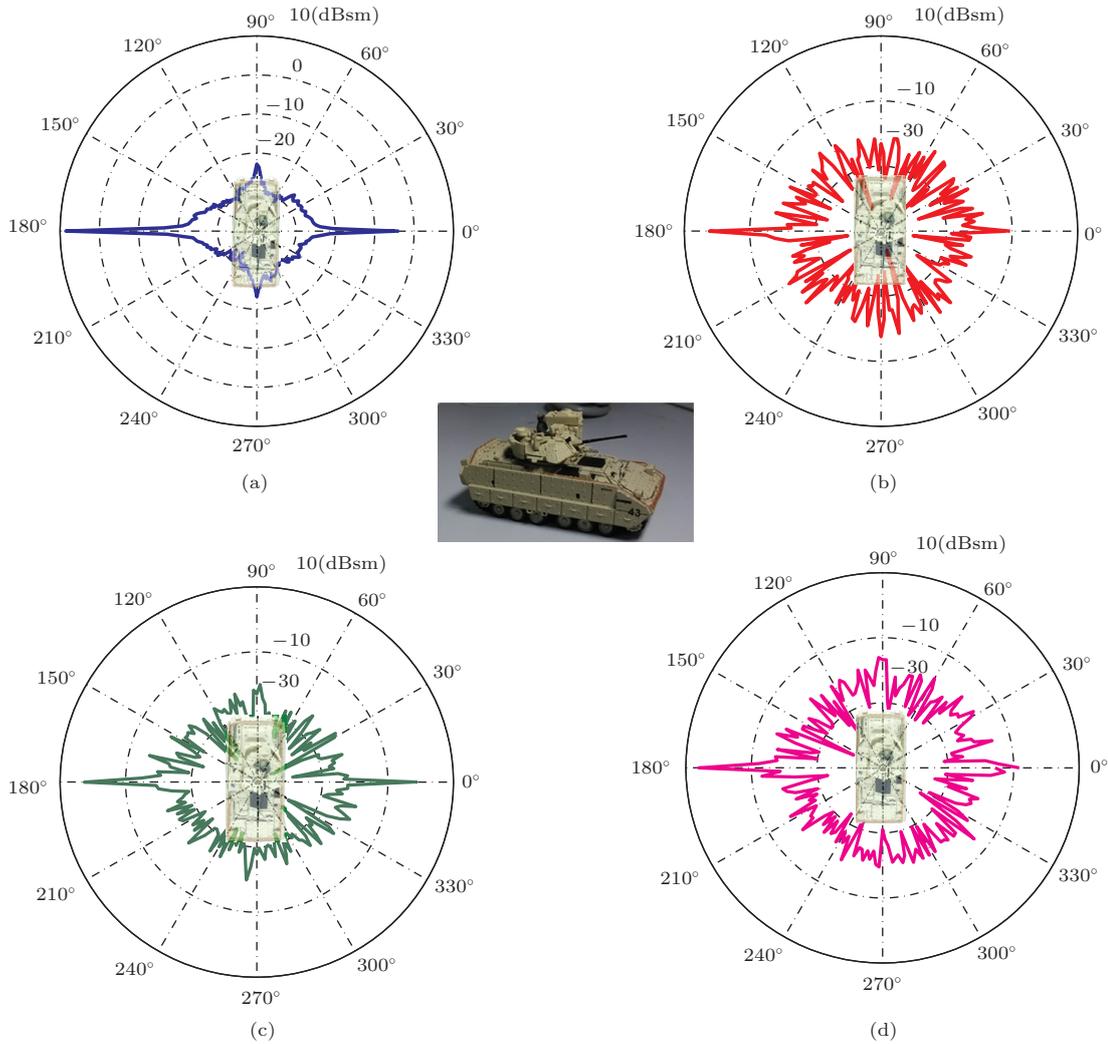


图5 (网刊彩色) 1:72 M3A2 布拉德利装甲车模型 RCS 分析 (a) 时域 RCS 全角度分布图 (dBsm); (b) 0.3 THz 频域 RCS 分布图 (dBsm); (c) 0.6 THz 频域 RCS 分布图 (dBsm); (d) 0.9 THz 频域 RCS 分布图 (dBsm)

3.2.2 1:2000 比例辽宁号航空母舰模型的雷达散射截面

图 6(a) 显示了频率平均化的 1:2000 比例辽宁号航空母舰模型 (如图 6 中插图所示) 的 RCS 径向全角度图 (dBsm), 角度分辨率为 2° , 对应于全尺寸物体, 相当于 0.05—0.7 GHz (L 波段) 雷达探测. 由图中可见, 当从 0° 探测时, 甲板的平面反射使得 RCS 急剧增大, 达到所有角度中的最大值. 在航母两侧方向上 (90° 和 270°) 也观测到了 RCS 极大值: 航母右侧舰岛目标较大, 与航母右侧船体的正面反射, 造成了 RCS 在 90° 的极大值; 当从 270° 测量时, 航母左侧船体的正面反射, 也会造就 RCS 的极大值, 同时, 舰岛虽然不在左侧, 但在 270° 测量时, 舰岛的正面反射虽然在时域上会后移, 但仍然对 RCS 的极大值有贡献. 因此可知航母模型的 RCS 分布并非对称, 这是由航母本身结构的非对称性决

定的.

图 6(b), (c) 分别展示了航母模型分别在 0.3 THz, 0.6 THz, 0.9 THz 频率处的单频 RCS 全角度分布图 (dBsm). 图中依然可以观察到时域 RCS 与单频 RCS 分布趋势的统一性, 以及单频 RCS 随角度变化的剧烈性.

3.2.3 1:200 F-22 隐形战斗机模型的雷达散射截面

太赫兹波段缩比模型探测因更好的经济性, 完全可以应用于战具的设计阶段, 这是以往许多其他 RCS 预估方法所不具备的, 为了验证这一潜在应用方式, 我们对具有电磁隐形效果的战具也进行了缩比探测研究. 图 7(a) 中展示了频率平均化的 1:200 F-22 战斗机模型 (如图 7 中插图所示) 的 RCS 径向全角度图 (dBsm), 角度分辨率为 2° , 对应于全尺寸飞机, 相当于 0.5—7 GHz (L—C 波段).

RCS全角度图中可以观测到良好的对称性, 这与F-22战斗机的对称外形相符合. 此外, 由文献可知, 隐形飞机的特定设计具有整体扁平, 表面由一些平面组成的特点, 有效降低了其散射效应, 使雷达回波主要集中在有限的几个方向(飞机背部, 飞机腹部), 类似镜面反射^[26]. 而我们的测量结果较好的反映了F-22隐形飞机的RCS特点, 模型的正下方向(0°)和正上方向(180°)处的RCS达到最大值. 战斗机两个侧下方的进气通道成平面形状, 由此导致了其在 30° — 60° 和 300° — 330° 两个角度范围内的散射极大. 此外其他角度的RCS值远小于这几个方向. 以上结果证明我们的雷达可以有效地检测RCS, 分析目标模型的散射特性. 由于本雷达系统的经济性好(模型加工时间约一周, 加工成本1000元以下), 所以可以用于军事目标的外形设计阶段,

这是类似外场RCS全比例测量等实验手段所不能实现的.

图7(b), (c)分别展示了F-22战斗机模型分别在0.3 THz, 0.6 THz, 0.9 THz 频率处的单频RCS全角度分布图(dBsm). 由图中可见, 单频RCS随角度的变化更剧烈, 其对称性也体现的很明显. 最后, F-22模型的频率平均化RCS与单频点RCS图都并非完美对称的, 这主要有以下原因: 首先, 雷达系统是近单站系统, 但严格来说依然是双站系统, 尽管飞机模型是对称的, 但是雷达系统从飞机模型的两侧进行测量时, 其测量条件并非完全相同; 其次, 模型本身的加工并非完美, 其外形的微小失真以及表面的少数瑕疵也导致了RCS图的非完全对称.

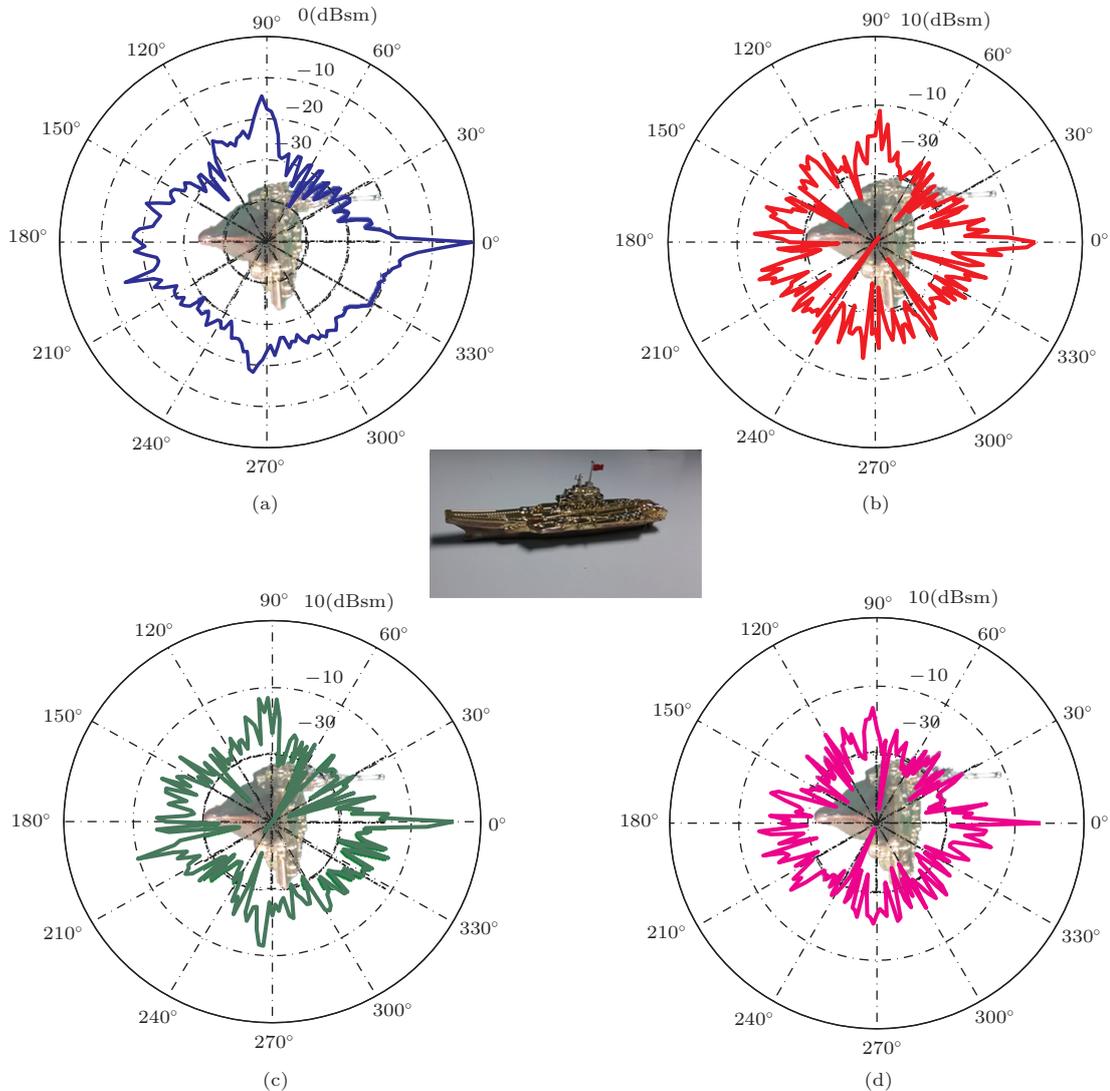


图6 (网刊彩色) 1:2000 辽宁号航空母舰模型的 RCS 分析 (a) 时域 RCS 全角度分布图 (dBsm); (b) 0.3 THz 频域 RCS 分布图 (dBsm); (c) 0.6 THz 频域 RCS 分布图 (dBsm); (d) 0.9 THz 频域 RCS 分布图 (dBsm)

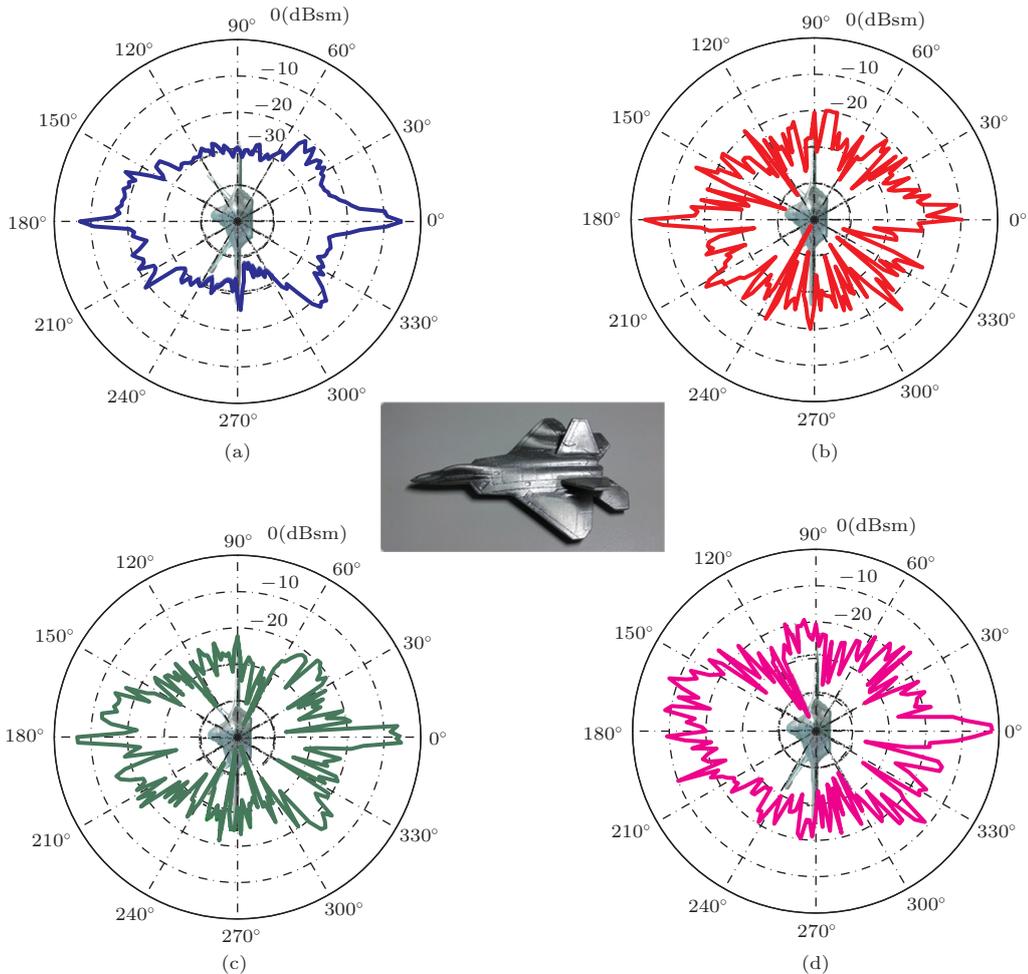


图7 (网刊彩色) 1: 200F-22 战斗机模型的 RCS 分析 (a) 时域 RCS 全角度分布图 (dBsm); (b) 0.3 THz 频域 RCS 分布图 (dBsm); (c) 0.6 THz 频域 RCS 分布图 (dBsm); (d) 0.9 THz 频域 RCS 分布图 (dBsm)

3.3 航母模型的成像结果

雷达系统可对目标进行 360° 全角度扫描, 获得各个角度下的目标回波信息, 经过进一步处理即可实现目标成像^[27,28]. 由于太赫兹时域雷达使用时域极窄脉冲信号获取目标回波, 因此在成像时一般也采用时域相关法 (time domain correlation, TDC) 和后向投影法 (back projection, BP) 等时域算法^[29]. 在大转角成像过程中, 散射点到雷达的距离轨迹不仅是弯曲的, 而且各点轨迹的弯曲程度不一致, 若采用 TDC 算法成像, 需进行大量的插值运算, 其计算量非常大. BP 算法的基本思想是在回波中沿每个散射点到雷达的距离轨迹对其进行相干累加以获得该散射点的图像, 因此对系统信号带宽和孔径形式并无太多限制, 特别适合用于大转角、尤其是全角度的成像^[30]. 尽管 BP 算法的计算量仅次于 TDC 算法, 但成像过程中不存近似过程, 成像精度较高, 因此本实验采用 BP 算法对 360° 全

角度回波进行处理以获得目标二维图像.

本实验中目标被置于转台上, 随着载物转台的转动, 目标相对平面太赫兹波的照射角度发生变化, 接收端就可以采集被测模型的 360° 全角度的反射信号, 其中包含着丰富的目标空间信息 (目标的外形), 通过对全角度回波的处理可以获得目标的二维图像^[31].

对于时域信号, 若发射信号为 $S_t(t)$, $f(x, y)$ 为目标函数, 则接收回波信号如下:

$$s_r(t, \theta) = \int_x \int_y f(x, y) s_t \left(t - \frac{2R}{c} \right) dx dy, \quad (6)$$

式中 θ 为目标旋转角度, R 为雷达到目标散射点之间的距离.

则滤波后向投影成像公式为

$$\hat{f}(x, y) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^\infty S_r(f, \theta) \cdot |k| \times \exp(j2k(x \sin \theta + y \cos \theta)) dk d\theta, \quad (7)$$

其中 f 为频率, $k = 2\pi f/c$ 为波数, $S_r(f, \theta)$ 为 (6) 式

中 $s_r(t, \theta)$ 的傅里叶变换 (极坐标格式).

根据雷达成像的经典理论, 雷达的距离向分辨率依靠发射宽带信号, 距离分辨率与发射信号的带宽相关

$$\rho_R = \frac{c}{2B}, \quad (8)$$

其中 c 为光速, B 为发射信号带宽 [27].

我们的雷达系统的带宽为 1.2 THz, 根据公式计算得到的距离向理论分辨率为 0.125 mm.

同时方位向分辨率由波长和总转动角度决定 [32]:

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\theta_{\text{integrated}}}, \quad (9)$$

其中 $\theta_{\text{integrated}}$ 为目标成像积累转角大小.

我们采用的是 360° 扫描, 步进角度为 1° , 通过计算可以得到理论方位向分辨率为 0.040 mm, 也就是 $40 \mu\text{m}$. 该方位向分辨率是在假设目标为理想点目标条件下推导得到的, 对于实际目标, 由于其散射特征随目标角度而改变, 目标函数 $f(x, y)$ 只在小转角时才可近似不变, 因此有效积累转角要远小于 360° , 方位向实际分辨率远低于 (9) 式表示的理论值.

我们对 1:2000 辽宁号航空母舰模型进行了角度间隔 1° 的 360° 全角度时域散射信号测量, 获得了全角度时域数据, 利用时域后向投影算法对航母模型进行了成像. 图 8 (a) 中展示了利用后向投影的时域算法对航母模型回波数据进行处理后得到的成像结果, 并与图 8 (b) 中的航母模型进行比较. 由图 8 (a) 可见, 重构图很好地展示了被测物的真实形状, 其外轮廓可以轻易地辨认. 不仅如此, 航母模型的甲板, 船底, 舰桥等细节散射都较容易分辨. 此外, 图 8 (a) 中航母图像周围存在一些环状图影, 这是由场景中某些非转动物体的反射信号经过后向投影算法旋转叠加而成. 在下一步的实验中可通过贴附吸波材料减少非被测目标的反射信号强度, 以及选取合适窗函数对时域回波进行优化滤波等方式, 最大程度的减弱成像中环状图影.

此外, 航母外轮廓的一些散射特征点由于散射效果较强, 因而雷达系统接收到的散射信号较大, 这些散射特征在成像后也体现在了图中. 例如在图 8 (a) 可见, 航母底部两侧以及左侧甲板的棱角处都能看到明显的散射特征点, 在图中呈现红色. 而舰岛的结构相比船体更为复杂精细, 散射点更多, 其强散射特性在图中更为明显. 这体现了本系

统在隐形目标设计中的独特作用: 通过测量目标设计样品的缩比模型, 获得成像图样, 寻找散射特征点的所在, 从而为进一步的减小散射, 优化隐身效果指明方向.

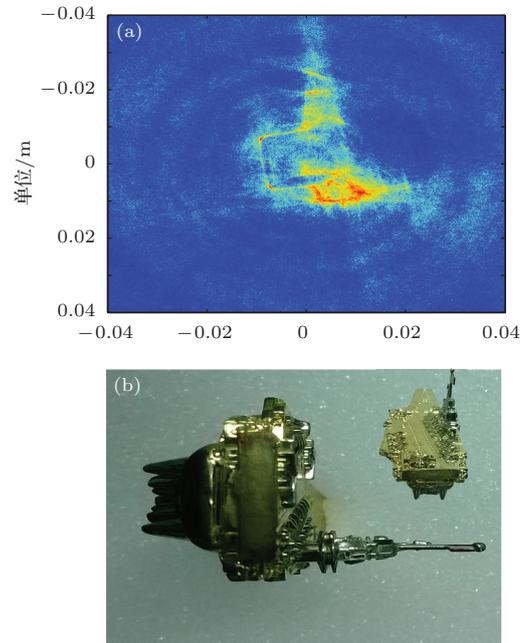


图 8 (网刊彩色) (a) 1:2000 辽宁号航空母舰模型后向投影成像结果; (b) 1:2000 辽宁号航空母舰模型实物图

4 结 论

综上所述, 本文在实验上验证了基于时域光谱技术的太赫兹雷达系统, 实现了宽频太赫兹波的时域散射信号测量, 并基于此获得了缩比模型的雷达散射截面全角度特征信息和后像投影成像. 文中给出了 1:72 M3A2 布拉德利缩比模型、F-22 隐形战斗机缩比模型以及辽宁号缩比模型的 360° RCS 测量结果, 并对航母模型的太赫兹雷达回波数据进行了后向投影图像重构, 获得了较好的成像结果. 太赫兹雷达 1.3 THz 的带宽, 分米量级的模型尺寸和极高的成像分辨率必将会在雷达设计, 目标识别, 电磁隐身和外形设计等领域发挥独特的作用.

参考文献

- [1] Siegel P H 2002 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **50** 910
- [2] Zhang TY, Cao JC 2004 *Chin. Phys.* **13** 1742
- [3] Xu J Z, Zhang X C 2007 *Applications of Terahertz Science and Technology* (Beijing: Peking University Press) p206 (in Chinese) [许景周, 张希成 2007 太赫兹科学技术和应用 (北京: 北京大学出版社) 第 206 页]

- [4] Yun-shik Lee (translated by Cui W Z) 2012 *Principles of Terahertz Science and Technology* (Beijing: National Defence Industry Press) p192 (in Chinese) [Yun-Shik Lee 著 (崔万照译) 2012 太赫兹科学与技术原理 (北京: 国防工业出版社) 第 192 页]
- [5] Gu C, Qu SB, Pei ZB, Xu Z, Liu J, Gu W 2011 *Chin. Phys. B* **20** 017801
- [6] Tian L, Zhou QL, Zhao K, Shi YL, Zhao DM, Zhao SQ, Zhao H, Bao RM, Zhu SM, Miao Q 2011 *Chin. Phys. B* **20** 010703
- [7] Goyette T M, Dickinson J C, Waldman J, Nixon W E 2000 *International Society for Optics and Photonics AeroSense, Belgium* **2000** p615
- [8] DeMartinis G B, Coulombe M J, Horgan T M 2010 *Proceedings of the Antenna Measurements and Techniques Association* Atlanta, USA 2010 p3
- [9] Danylov AA, Goyette T M Waldman 2010 *Opt. Express* **18** 16264
- [10] Dengler R J, Cooper K B, Chattopadhyay G Mehdi I, Schlecht E, Skalare A, Chen C, Siegel P H 2007 *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium* Honolulu, USA, 2007 p1371
- [11] Chattopadhyay G, Cooper K B, Dengler R, Bryllert T E, Schlecht E, Skalare A, Mehdi I, Siegel P H 2008 *Proceedings of 19th International Symposium on Space Terahertz Technology* Groningen, Netherlands, 2008 p3 **00**
- [12] Cooper K B, Dengler R J, Chattopadhyay G, Schlecht E, Gill J, Skalare A, Mehdi I, and Siegel P H 2008 *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett* **18** 64
- [13] Gu S M, Li C, Gao X, Sun Z Y Fang G Y 2012 *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* **60** 3877
- [14] Cai YW, Yang C, Zeng GH, Huang X, Wang C, Jiang G, Li RZ, Tao RH, Zhang J, Zhou CM, Yao J 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **24** 7 (in Chinese) [蔡英武, 杨陈, 曾耿华, 黄祥, 王成, 江舸, 李如忠, 陶荣辉, 张健, 周传明, 姚军 2012 强激光与粒子束 **24** 7]
- [15] Cheng BB, Jiang K, Chen P, Yang C, Lu B, Cai YW, Deng XJ, Chen Z, Zhang J, Zhou CM 2013 *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology* **1** 7 (in Chinese) [成彬彬, 江舸, 陈鹏, 杨陈, 陆彬, 蔡英武, 邓贤进, 陈樟, 张健, 周传明 2013 太赫兹科学与电子信息学报 **1** 7]
- [16] Mickan S P, Zhang X C 2003 *T-ray International Journal of High Speed Electronics and Systems* **13** 601
- [17] Appleby R, Wallace H B 2007 *IEEE transactions on antennas and propagation* **55** 2944
- [18] Grischkowsky D, Keiding S, Exter M, Fattinger Ch 1990 *JOSA B* **7** 2006
- [19] McGowan R W, Chevillet R A, Grischkowsky D R 2000 *IEEE Trans. Microwave Theory & Techn.* **48** 417
- [20] Iwaszczuk K, Heiselberg H, Jepsen P U 2010 *Opt. Express* **18** 26399
- [21] Jansen C, Krumbholz N Geisb R, Probst T 2009 *34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* Busan, Korea 2009 p1
- [22] Gente R, Jansen C, Geise R, Peters O 2012 *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on* **2** 424
- [23] Knott E F 1993 *Radar cross section measurements* (Releigh: SciTech Publishing) pp16–17
- [24] Mie G 1908 *Annalen der physik* **25** 377
- [25] Born M, Wolf E 1999 *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference, and Diffraction of Light* (Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge) pp633–644
- [26] Huang P K, Yin H C, Xu X J 2005 *Radar Target Characteristics* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp71–72 (in Chinese) [黄培康, 殷红成, 许小剑 2005 雷达目标特性 (北京: 电子工业出版社) 第 21 页, 第 71—72 页]
- [27] Bao Z, Xing M D, Wang T 2005 *Radar Imaging Technology* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp6–18 (in Chinese) [保铮, 邢孟道, 王彤 2005 雷达成像技术 (北京: 电子工业出版社) 第 6—18 页]
- [28] Zhang L X, Hu C F 2009 *Measurement and Imaging of Radar Target Scattering characteristics* (Beijing: China Astronautic Publishing House) p100 (in Chinese) [张麟兮, 胡楚峰 2009 雷达目标散射特性测试与成像诊断 (中国宇航出版社) p100]
- [29] Nguyen L, Ressler M, Sichina J 2008 *SPIE Defense and Security Symposium International Society for Optics and Photonics* orlando, USA 2008 p69470B
- [30] Su Y 2001 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [粟毅 2001 博士学位论文 (长沙: 国防科技大学)]
- [31] Xu Y Y, Zhang Q Y, Fang G Y 2011 *Journal of Electronics & Information Technology* **33** 1822 (in Chinese) [徐艳云, 张群英, 方广有 2011 电子与信息学报 **33** 1822]
- [32] Ausherman D A, Kozma A, Walker J L, Jones H M, Poggio E C 1984 *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on* **4** 363

Broad-band time domain terahertz radar cross-section research in scale models*

Liang Da-Chuan¹⁾ Wei Ming-Gui¹⁾ Gu Jian-Qiang^{1)†} Yin Zhi-Ping²⁾ Ouyang Chun-Mei¹⁾
Tian Zhen¹⁾ He Ming-Xia¹⁾ Han Jia-Guang^{1)‡} Zhang Wei-Li¹⁾

1) (*Center for Terahertz Waves, College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering Tianjin University, Tianjin 300072 China*)

2) (*Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009 China*)

(Received 7 May 2014; revised manuscript received 11 June 2014)

Abstract

Based on terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) technology, a broad-band time domain terahertz radar system can be used to do research on scattering characteristics of objects. At present, the optical structure and mechanism of this system-showing the radar detection principle and imaging mechanism-has attracted a lot of interest in the terahertz research field. Based on the femtosecond Ti: sapphire oscillators pumped terahertz time-domain spectroscopy system, this paper constructs the first terahertz radar system in this country (0.1—1.3 THz). System calibration is carried out by measurements on standard metallic spheres. Three military scale models are measured by the Radar system. The shapes of the models are retrieved by the improved back projection algorithm, which verifies the new imaging mechanism based on time domain scattering signal. With high frequency broad band spectrum and high imaging resolution, the terahertz radar would make great contribution to stealth military units design and become a new research platform on terahertz scattering characteristics.

Keywords: terahertz radar, radar cross-section, back projection imaging

PACS: 41.20.Jb, 84.40.Xb, 87.50.U-, 42.30.-d

DOI: [10.7498/aps.63.214102](https://doi.org/10.7498/aps.63.214102)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2014CB339800), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61107053, 61138001), and the Major National Development Project of Scientific Instruments and Equipment of China (Grant No. 2011YQ150021).

† Corresponding author. E-mail: gjq@tju.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: jjaghan@tju.edu.cn