



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105866759 B

(45)授权公告日 2018.04.03

(21)申请号 201610237378.2

(22)申请日 2016.04.15

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105866759 A

(43)申请公布日 2016.08.17

(73)专利权人 北京航空航天大学
地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72)发明人 许小剑 刘永泽

(74)专利代理机构 北京科迪生专利代理有限公司 11251

代理人 杨学明 顾炜

(51)Int.Cl.

G01S 7/41(2006.01)

G01S 7/02(2006.01)

(56)对比文件

CN 104614714 A,2015.05.13,全文.

CN 104635222 A,2015.05.20,全文.

童广德等.“近场测量不同距离不同方位RCS的一种方法”.《制导与引信》.2009,第30卷(第2期),第52-56页.

Lorant A. Muth et al..“Robust Separation of Background and Target Signals in Radar Cross Section Measurements”.《IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT》.2005,第54卷(第6期),第2462-2468页.

Xiaojian Xu.“A Background and Target Signal Separation Technique for Exact RCS Measurement”.《Electromagnetic in Advanced Application(ICEAA),2012 International Conference on》.2012,第891-894页.

Xiaojian Xu.“A New Approach for Background Clutter Extraction in Radar Cross Section Measurement”.《Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics(ACES),2016 IEEE/ACES International Conference on》.2016,第1-2页.

审查员 周璐璐

权利要求书3页 说明书11页 附图6页

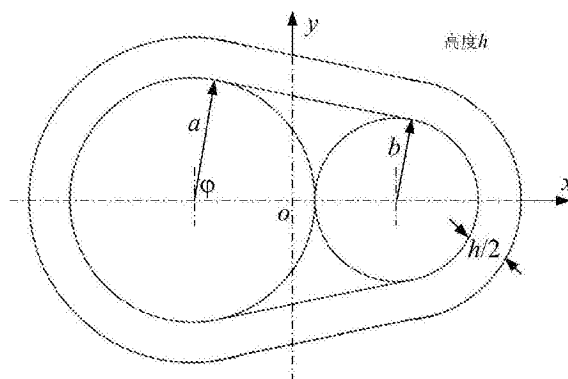
(54)发明名称

用于目标RCS测量中多重定标和背景提取的装置设计及其信号处理方法

(57)摘要

本发明公开了一种用于目标雷达散射截面(RCS)测量中多重定标和背景提取的装置设计及其信号处理方法,本发明提出了一种新的定标体外形设计,采用所设计的新型定标体SCAM,只需通过一次360°方位旋转测量,即可同时获得用于完成背景辅助测量、提取和抵消处理、以及RCS多重定标测量与处理所需的数据。本发明所设计的新定标体SCAM是对现有CAM定标体外形的改进,消除了目前国际上通用的传统圆柱定标体和CAM定标体用于背景提取辅助测量与RCS定标处理时的固有缺点。

CN 105866759 B



1. 一种SCAM标准定标体的几何外形的设计方法,其特征在于:在CAM外形的基础上,沿CAM外形的小圆柱、大圆柱和平板面,在360°全方位上增加半圆弧面,其中半圆弧面的直径等于CAM定标体的高,称这一新的外形设计为球面CAM,Spheroid CAM,简记为SCAM,其中,SCAM的基本外形构成如下:首先由两个半径不同、高度相同并互为相切的直立扁圆柱体、并用与圆柱体相同高度的两块平板与大、小圆柱体弧面相切,构成左右端面为半圆弧柱体、两个侧面和上下截面均为平板的基本体,称为CAM外形;在此基础上,沿CAM外形两端面的大小圆柱和侧面的平板面,以圆柱体的高为直径,在360°全方位上增加一个半圆弧面,由此构成新的外形,称为SCAM定标体;

在高频区,SCAM定标体的大、小球柱为CAM定标体大、小圆柱所对应的方位,SCAM定标体的大、小球柱的RCS电平分别满足以下公式:

$$\sigma_L(f) = \frac{\pi}{4} h(h+2a) \quad (14)$$

$$\sigma_S(f) = \frac{\pi}{4} h(h+2b) \quad (15)$$

式中, $\sigma_L(f)$ 和 $\sigma_S(f)$ 分别为大球柱和小球柱的RCS; a 为大圆柱体的半径; b 为小圆柱体的半径; h 为SCAM定标体的高,同时也是SCAM外圆弧曲面的直径;

若CAM和SCAM定标体的几何设计参数均为:大圆柱体的半径为 a 、小圆柱体的半径为 b 、SCAM定标体的高为 h ,则直立的金属圆柱体自身的RCS电平满足以下公式:

$$\sigma(f) = kah^2 \quad (13)$$

式中, $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}$ 为波数, λ 为雷达波长, c 为传播速度, f 为雷达频率; a 为大圆柱体的半径; h 为SCAM定标体的高,则SCAM定标体两侧也即CAM平板方向柱面的最大RCS与半径为 $h/2$ 的圆柱体的RCS成正比,可见:

(1) SCAM的这种两端散射体的RCS电平不随频率变化、两侧柱面的最大RCS与频率成正比的特性,有利于提高RCS测量定标精度;

(2) 尽管总体上SCAM的几何外形尺寸比CAM的尺寸大,但在三个等效标准体方向上,SCAM的RCS值均小于CAM的RCS值,SCAM定标体在全方位上其平均RCS电平平均低于CAM定标体的RCS电平,SCAM的这种低RCS电平特性有利于用作为背景辅助测量体。

2. 一种权利要求1所述的SCAM标准定标体的几何外形的设计方法设计出来的SCAM标准定标体,其特征在于:SCAM的基本外形构成为:两端为大、小不同的两个球柱面,两侧为柱面,上下截面为平板面,如此,当采用SCAM作为标准定标体进行360°全方位旋转测量时,这种定标体的典型散射体由SCAM两端的大、小球柱面和两侧的柱面构成;若选择大小圆柱切点位置为旋转中心,则两端的球柱面散射均为偏心球柱面散射体。

3. 一种采用权利要求2所述的SCAM定标体的背景测量和提取处理方法,其特征在于:

设雷达测得的SCAM随方位角变化的宽带散射特性回波信号可表示为:

$$S(f, \theta) = C(f, \theta) + B(f) \quad (16)$$

式中 $S(f, \theta)$ 表示测量雷达接收到的回波信号,是随方位角 θ 变化的量; $C(f, \theta)$ 表示测量辅助体SCAM的真实散射回波,也是随方位角 θ 变化的量; $B(f)$ 表示测试场固定背景回波,不随方位角旋转而变化;

上述三个信号分量均为复信号,可表示为同相(I)和正交相位(Q)通道信号,分别记为:

$$S(f, \theta) = S_I(f, \theta) + jS_Q(f, \theta) \quad (17)$$

$$C(f, \theta) = C_I(f, \theta) + jC_Q(f, \theta) \quad (18)$$

和

$$B(f) = B_I(f) + jB_Q(f) \quad (19)$$

上述三式中, $j = \sqrt{-1}$ 为虚数;下标I和Q分别表示I通道和Q通道信号,即: $S_I(f, \theta)$ 和 $S_Q(f, \theta)$ 分别表示测量雷达接收到回波的I和Q通道信号,是随方位角 θ 变化的量; $C_I(f, \theta)$ 和 $C_Q(f, \theta)$ 分别表示测量辅助体真实回波的I和Q通道信号,也是随方位角 θ 变化的量; $B_I(f)$ 和 $B_Q(f)$ 表示测试场固定背景回波的I和Q通道信号,不随方位角 θ 的改变而变化;

且有:

$$S_I(f, \theta) = A_s(f, \theta) \cos[\phi_s(f, \theta)] \quad (20)$$

$$S_Q(f, \theta) = A_s(f, \theta) \sin[\phi_s(f, \theta)]$$

$$C_I(f, \theta) = A_c(f, \theta) \cos[\phi_c(f, \theta)] \quad (21)$$

$$C_Q(f, \theta) = A_c(f, \theta) \sin[\phi_c(f, \theta)]$$

其中, $A_s(f, \theta)$ 和 $\phi_s(f, \theta)$ 分别表示测量雷达接收到回波的幅度和相位, $A_c(f, \theta)$ 和 $\phi_c(f, \theta)$ 分别表示测量辅助体真实回波幅度和相位,均是随方位角 θ 变化的量,有:

$$A_s(f, \theta) = |S(f, \theta)| = \sqrt{S_I^2(f, \theta) + S_Q^2(f, \theta)} \quad (22)$$

$$\phi_s(f, \theta) = \tan^{-1} \left(\frac{S_Q(f, \theta)}{S_I(f, \theta)} \right)$$

$$A_c(f, \theta) = |C(f, \theta)| = \sqrt{C_I^2(f, \theta) + C_Q^2(f, \theta)} \quad (23)$$

$$\phi_c(f, \theta) = \tan^{-1} \left(\frac{C_Q(f, \theta)}{C_I(f, \theta)} \right)$$

因此,由式(20)~(23)有:

$$S_I(f, \theta) = A_c(f, \theta) \cos[\phi_c(f, \theta)] + B_I(f) \quad (24)$$

$$S_Q(f, \theta) = A_c(f, \theta) \sin[\phi_c(f, \theta)] + B_Q(f)$$

或者

$$B_I(f) = S_I(f, \theta) - A_c(f, \theta) \cos[\phi_c(f, \theta)] \quad (25)$$

$$B_Q(f) = S_Q(f, \theta) - A_c(f, \theta) \sin[\phi_c(f, \theta)]$$

从以上数学式可见:只要通过对SCAM辅助测量体的测量,能够得到 $A_c(f, \theta)$ 和 $\phi_c(f, \theta)$, 则由式(25)即可提取出背景信号 $B_I(f)$ 和 $B_Q(f)$ 。

4. 根据权利要求3所述的背景测量和提取处理方法,其特征在于:

为了通过辅助测量提取背景信号,可采用偏心放置于目标支架上的圆柱体作方位旋转测量来完成背景辅助测量和提取,从测量数据在I-Q平面上拟合圆的算法,即最小中值平方-正交距离回归法(Least Median of Squares-Orthogonal Distance Regression, LMS-ODR),首先通过最小中值平方来剔除测量信号中可能存在的异常点,然后采用正交距离回

归法得到测量数据在I-Q平面上的拟合圆参数,则圆心在I-Q平面上的坐标值即为背景信号 $B_I(f)$ 和 $B_Q(f)$;

由于SCAM的大、小球柱具有同偏心圆柱一样的散射特性:在球柱所定义的方位角范围内,其散射幅度不随方位角变化,但由于偏心安装,其回波的相位是随着SCAM作方位旋转而变化的,若采用SCAM作为背景提取辅助测量体,其背景提取算法可以直接借鉴上述的I-Q平面拟合圆法;

与采用偏心圆柱作为辅助测量体所不同的是,SCAM包含大小不同的两个球柱,因此,可针对每个球柱的方位测量数据,分别进行I-Q平面拟合圆处理,得到每个频率 f 下的两组拟合参数,即:针对大球柱测量数据,得到I-Q平面拟合圆圆心参数 $B_{LI}(f)$ 和 $B_{LQ}(f)$;针对小球柱测量数据,得到I-Q平面拟合圆圆心参数 $B_{SI}(f)$ 和 $B_{SQ}(f)$,理论上,这两者应该是重合的,但由于噪声因素对测量不确定度的影响,一般 $B_{SI}(f) \neq B_{LI}(f)$ 和 $B_{SQ}(f) \neq B_{LQ}(f)$,因此,可以取两者的均值作为最终提取的背景信号,即:

$$\begin{aligned}\hat{B}_I(f) &= \frac{B_{SI}(f) + B_{LI}(f)}{2} \\ \hat{B}_Q(f) &= \frac{B_{SQ}(f) + B_{LQ}(f)}{2}\end{aligned}\quad (26)$$

式中 $\hat{B}_I(f)$ 和 $\hat{B}_Q(f)$ 为采用SCAM作为背景测量辅助体测量数据提取得到的背景的I、Q通道信号; $B_{LI}(f)$ 和 $B_{LQ}(f)$ 为采用SCAM大球柱测量数据提取得到的背景的I、Q通道信号; $B_{SI}(f)$ 和 $B_{SQ}(f)$ 为采用SCAM小球柱测量数据提取得到的背景的I、Q通道信号。

5. 一种采用权利要求2所述的SCAM定标体的背景抵消和RCS多重定标处理方法,其特征在于:

SCAM作为标准定标体,其不同方位角下的主要散射可等效为大球柱、小球柱和圆柱面3种散射体,若坐标轴x方向代表方位 0° ,y方向代表方位 90° ,则SCAM两端小球柱散射的中心方位角为方位 0° ,大球柱散射的中心方位角为 180° ,SCAM圆柱面峰值散射位于方位 φ 和 $\varphi+180^\circ$ 方向上, φ 的计算公式为:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{a-b}{a+b}\right)\quad (27)$$

用于目标RCS测量中多重定标和背景提取的装置设计及其信号处理方法

技术领域

[0001] 本发明涉及通信和雷达技术领域,特别涉及一种目标电磁散射测量中雷达散射截面(RCS)定标和背景提取的装置设计及其信号处理方法。

背景技术

[0002] 缩比模型或全尺寸目标的微波暗室和外场静态测量是低可探测目标的低散射设计、验证和改进的重要试验手段。在微波暗室和外场RCS静态测量中,一般采用低散射支架支撑被测目标,距离远处的测量雷达固定不动,置于支架上的目标作方位旋转,测量雷达录取旋转目标在不同方位转角下的散射回波并进行背景抵消和定标处理后,得到被测目标的全方位RCS测量数据。典型的外场测量几何关系如图1所示。

[0003] 为了便于讨论目标宽带雷达散射截面(RCS)幅度和相位的测量与定标,定义目标宽带复散射函数(也即一些文献中所称的目标复RCS) $\sqrt{\sigma(f)}$ 为:

$$[0004] \quad \sqrt{\sigma(f)} = \lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{4\pi R} \cdot \frac{\mathbf{E}_s(f)}{\mathbf{E}_i(f)} \quad (1)$$

[0005] 式中, $\mathbf{E}_i(f)$ 和 $\mathbf{E}_s(f)$ 分别表示雷达入射场(目标处)和目标散射场(雷达天线处);它同RCS之间的关系为 $\sigma(f) = \left| \sqrt{\sigma(f)} \right|^2$ 。

[0006] 由图1,定标体和待测目标的接收回波功率均满足雷达方程(参见文献E.F.Knott, Radar Cross Section, New York: Van Nostrand Reinhold, 1993.)

$$[0007] \quad P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \cdot \sigma \quad (2)$$

[0008] 式中, P_r, P_t 分别为雷达接收和发射功率; G 为天线增益; λ 为雷达波长; R 为雷达距离; L 为双程传输衰减; σ 为目标RCS。

[0009] 目标RCS测量中的定标可以采用相对定标法,即:同时测量一个其理论RCS已知的标准定标体和RCS未知的待测目标,依据雷达方程(2),有:

$$[0010] \quad V_{Cr}(f) = \left(\frac{P_t G^2 (c/f)^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \right)^{1/2} \cdot \sqrt{\sigma_c(f)} \quad (3)$$

$$[0011] \quad V_{Tr}(f) = \left(\frac{P_t G^2 (c/f)^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \right)^{1/2} \cdot \sqrt{\sigma_T(f)} \quad (4)$$

[0012] 式(3)-(4)中, $V_{Cr}(f), V_{Tr}(f)$ 分别表示接收机在宽带RCS测量中收到的定标体回波电压和被测目标回波电压; $\sqrt{\sigma_c(f)}, \sqrt{\sigma_T(f)}$ 分别表示定标体的理论复散射函数和被测目标的宽带复散射函数; f 为雷达频率; c 为传播速度。

[0013] 由式(3)和(4),目标复散射函数的定标式为:

$$[0014] \quad \sqrt{\sigma_T(f)} = \frac{V_{Tr}(f)}{V_{Cr}(f)} \cdot \sqrt{\sigma_c(f)} \quad (5)$$

[0015] 式中, $\sqrt{\sigma_T(f)}$ 为被测目标的复散射函数; $\sqrt{\sigma_c(f)}$ 为被测定标体的理论复散射函数, 可通过精确数值计算得到; $V_{Cr}(f)$, $V_{Tr}(f)$ 分别表示雷达接收机接收到的定标体回波电压和被测目标回波电压。

[0016] 实际RCS测量中雷达接收到的回波信号为复信号, 且受到测试场背景和各种噪声的影响。假设测目标和测定标体时雷达接收到的回波信号可表示为:

$$[0017] \quad S_T(f) = T(f) + B_T(f) + N_T \quad (6)$$

[0018] 和

$$[0019] \quad S_c(f) = C(f) + B_c(f) + N_c \quad (7)$$

[0020] 式中, $S_T(f)$ 和 $S_c(f)$ 分别表示测目标和测定标体时雷达接收到的回波信号; $T(f)$ 表示目标真实回波; $C(f)$ 表示定标体真实回波; $B_T(f)$ 和 $B_c(f)$ 分别表示测目标和测定标体时的背景回波; N_T 和 N_c 表示噪声影响, 且其均值为 $E\{N_T\} = E\{N_c\} = 0$ 。上述回波信号均为复数相量。

[0021] 在实际RCS测量中, 一般通过提高雷达发射机功率、采用地面平面场、接收机采用相参积累等技术来提高测量信噪比, 使得噪声对测量的影响可以忽略, 从而有以下公式近似成立:

$$[0022] \quad S_T(f) = T(f) + B_T(f) \quad (8)$$

[0023] 和

$$[0024] \quad S_c(f) = C(f) + B_c(f) \quad (9)$$

[0025] 为提高RCS测量精度, 一般在定标中采用背景相量相减技术处理, 目标散射函数的定标方程为:

$$[0026] \quad \begin{aligned} \sqrt{\sigma_T(f)} &= \frac{T(f)}{C(f)} \cdot \sqrt{\sigma_c(f)} \\ &= \frac{S_T(f) - B_T(f)}{S_c(f) - B_c(f)} \cdot \sqrt{\sigma_c(f)} \end{aligned} \quad (10)$$

[0027] 式(10)中, $S_T(f)$ 和 $S_c(f)$ 分别表示测目标和测定标体时的回波, 包含杂波背景; $B_T(f)$ 和 $B_c(f)$ 分别表示没有放置被测目标或定标体时的回波, 也即由目标支架及测试场其它杂散回波构成的杂波背景; $\sqrt{\sigma_T(f)}$ 为目标散射函数(也即复RCS, 是需要测量和定标的量); $\sqrt{\sigma_c(f)}$ 为定标体的散射函数, 是可通过精确理论计算得到的已知量。

[0028] 因此, 带背景抵消的目标RCS测量定标方程为:

$$[0029] \quad \sigma_T(f) = \left| \frac{S_T(f) - B_T(f)}{S_c(f) - B_c(f)} \right|^2 \cdot \sigma_c(f) \quad (11)$$

[0030] 由式(10)和(11)可见, 仅当背景回波 $B_T(f)$ 和 $B_c(f)$ 均能够被测得、并通过背景相减技术处理后, 才能消除其对目标RCS测量与定标的影响, 实现对目标RCS的精确测量与定标。如果测定标体和测目标时采用放置在同一距离上的同一支架, 则测目标时的背景回波 $B_T(f)$ 和测定标体时的背景回波 $B_c(f)$ 是相同的, $B_T(f) = B_c(f) = B(f)$, 故有:

$$[0031] \quad \sigma_T(f) = \left| \frac{S_T(f) - B(f)}{S_C(f) - B(f)} \right|^2 \cdot \sigma_C(f) \quad (12)$$

[0032] 因此,按照式(12),为了完成背景抵消和RCS定标处理,RCS测量的基本步骤如下:

[0033] 步骤-1: t_1 时刻,测量包含用于支撑目标的目标支架在内的目标区背景回波 $B(f)$;

[0034] 步骤-2: t_2 时刻,安装定标体,测量定标体回波 $S_C(f)$;

[0035] 步骤-3: t_3 时刻,安装目标,测量目标回波 $S_T(f)$;

[0036] 步骤-4:按照式(12)进行背景相量相减和目标RCS定标处理。

[0037] 问题是,对于采用金属支架的测试场,如何测得 $B(f)$ 正是难点所在!因为一般目标支架顶部安装有转台,在测目标或定标体时它被隐藏于被测物体的腹腔内,因此测目标或定标体时转顶的回波不会对雷达总回波产生实质性影响。另一方面,如果要测得未安装目标或定标体时支架本身的背景回波,需要将目标或定标体从支架上卸开,此时原来隐藏的转顶则显露出来。因此,如何测量支架的背景回波 $B(f)$ 是实现目标RCS精确定标测量的关键。

[0038] 目前国际上得到普遍应用的定标装置和背景测量技术包括:

[0039] (1) 在RCS定标体设计方面,通常采用以下定标体:(a) 金属定标球;(b) 金属圆柱定标体;(c) CAM定标体。

[0040] (2) 在支架背景控制与测量提取方面,通常采用以下技术:

[0041] (a) 通过细致的低散射设计,使得在感兴趣的测量频段,支架的散射回波远小于目标散射(一般低20dB以上);

[0042] (b) 设计一个辅助测量的低散射罩,在测背景时对支架顶部的转顶像测目标时一样用低散射罩将其“隐藏”起来。但是,由于金属支架本身RCS电平通常低于-35dBsm,若要精确测量支架的背景回波,要求低散射罩的RCS电平低20dB,也即达到-55dBsm,这显然是不现实的。因此,低散射罩的作用通常只是通过加装低散射罩对“支架+低散射罩”背景测量,验证支架的RCS低于某个门限值而已,这种不够精确的背景测量一般不能直接用于背景抵消处理;

[0043] (c) 采用背景辅助测量装置,例如能够平移的低散射载体、偏心圆柱等,通过辅助测量和信号处理完成背景提取。

[0044] 与本发明相关的现有技术分析如下:

[0045] 现有技术一:金属定标球

[0046] 金属定标球的优点是其RCS对于定标体放置的姿态不敏感。

[0047] 现有技术一的缺点:一是在采用低散射金属支架的测试场中,定标球与金属支架之间的耦合散射非常严重,因此金属定标球一般不能用于采用金属支架的RCS测试场;二是采用金属定标球没有解决目标支架的背景测量问题。

[0048] 现有技术二:采用在支架上平移的物体作为背景辅助测量体

[0049] 该技术在支架顶端安装一个自身可以前后平移运动的辅助测量载体,如图2所示。测试中(参见D.P.Morgan,“RCS Target Support Background Determination Using a Translating Test Body,”Proc.AMTA 1996,pp.15-17.),通过控制该载体前后平移运动,并记录雷达回波幅度和相位,供后续处理以提取出背景回波。

[0050] 现有技术二的缺点:采用这种辅助装置的主要缺点有两个,一是该辅助装置不能

用于RCS定标；二是需要设计专门机构驱动辅助测量载体进行前后平移，对于大型目标RCS测试场，由于目标转顶尺寸很大，而测量中需要把转顶掩藏于载体中，因此要求所设计的辅助测量载体尺寸必然很大。此外，背景提取辅助测量所要求平移的载体距离正比于雷达波长。频率越低，波长越长，所要平移的距离范围就越大。由此，该技术的实际应用受到限制。

[0051] 现有技术三：采用偏心圆柱作为定标体和背景辅助测量体

[0052] 文献(L.A.Muth,C.M.Wang,and T.Conn,“Robust Separation of Background and Target Signals in Radar Cross Section Measurements,”IEEE Trans.Instrum.Meas.,Vol.54,No.6,2005,pp.2462-2468.)针对技术-1所存在的缺点，提出了一种替代技术，即采用偏心的圆柱体进行辅助测量和背景提取，如图3所示。测试中，通过转顶带动偏心圆柱作方位旋转运动。由于从雷达视线看过去，任何转角下圆柱的投影外形是不变的，其散射幅度不变，但因圆柱是偏心安装在支架的转顶上的，这相当于在雷达看来，存在一种等效的平移运动，故其对背景回波的提取处理方法同现有技术二是一样的。

[0053] 现有技术三的缺点：采用偏心圆柱体进行辅助测量和背景提取的技术避免了使载体平移的要求，但是该技术也存在以下明显缺点：

[0054] (1) 在高频区，直立的金属圆柱体自身的RCS电平满足以下公式：

$$[0055] \quad \sigma(f) = kah^2 \quad (13)$$

[0056] 式中， $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}$ 为波数， c 为传播速度， f 为雷达频率； a 为圆柱体的半径； h 为圆柱体的高。

[0057] 在对大型目标进行RCS测量时，通常要求低散射目标支架和目标转顶承重均很大，这造成目标转顶的尺寸很大。由于用于背景辅助测量的偏心圆柱必须将转顶隐埋在其中，才能模拟真实目标测量条件下的支架背景条件并测量出来，此时所要求的偏心圆柱体尺寸将很大。而圆柱体的理论RCS值与圆柱体半径、圆柱高度的平方成正比，不利于背景测量与提取。例如，当目标转顶尺寸达到直径1m、高0.5m时，若要求完成精确RCS测量的最低雷达频率1GHz，则所要求的偏心圆柱直径将达到1.2m以上，根据(13)式，此时偏心圆柱自身的RCS电平在0dBsm (1m^2) 量级，而目标支架背景的RCS电平一般在-30dBsm (0.001m^2) 以下，两者之间相差3个数量级。此时，若采用偏心圆柱辅助提取支架的背景电平，相当于要从测量回波中精确提取出一个比主回波小1000倍的微弱信号，其提取精度难以保证。

[0058] 可见，根据(13)式，这种定标体的理论RCS值随频率升高而增大，不利于背景提取辅助测量和处理。

[0059] (2) 竖直放置的金属圆柱体RCS不随方位变化，不能用于双重定标测量和处理(参考文献W.D.Wood,P.J.Collins,T.Conn,“The CAM RCS Dual-Cal Standard,”Proc.of the 25th Antenna Measurement Techniques Association Symposium,Irvine,CA,2003.)；

[0060] (3) 圆柱体的RCS对俯仰角敏感，因此测量中对安装的垂直度提出了很高要求。

[0061] 现有技术四：采用CAM定标体作为定标体和背景辅助测量体

[0062] 文献(W.D.Wood,P.J.Collins,T.Conn,“The CAM RCS Dual-Cal Standard,”Proc.of the 25th Antenna Measurement Techniques Association Symposium,Irvine,CA,2003.)提出一种CAM定标体，它是由两个半径不同且相切的直立圆柱体以及同两个圆柱体的圆弧面相切的平面共同构成的封闭几何结构，其详细几何结构如图4所示。由于CAM定

标体的特殊几何外形,当将CAM定标体作方位向旋转时,单个定标体可等效用作为小圆柱(SC)、大圆柱(LC)和平板(FP)等3种标准定标体,故可用于RCS测量中多重定标测量和处理。此外,像偏心圆柱体一样,如果设计合理,它在一定方位范围内的大、小两个圆柱散射体,也可用于背景提取辅助测量。

[0063] 在高频区,CAM定标体的大圆柱和小圆柱的理论RCS值仍采用式(10)计算,平板的RCS则与频率的平方成正比。

[0064] 现有技术四的主要缺点:CAM定标体可等效为小圆柱、大圆柱和平板共3个标准散射体,因而可用于多重定标测量和处理。除此之外,因其几何外形是以圆柱和平板为基础构建的,故具有同圆柱体一样的所有其他缺点。

发明内容

[0065] 本发明所要解决的技术问题为:在低可探测目标RCS测量中,由于目标本身的RCS电平低,通常难以保证测试场的背景杂波电平比目标散射电平低很多。为此,一要采用背景杂波测量和背景相量相减处理,二要采用多重定标测量和处理,才能保证目标RCS测量定标的高精度。

[0066] 背景测量和提取所面临的问题是:对于采用金属支架的测试场,用于背景抵消处理的背景回波无法通过直接测量而得到,因为目标支架顶部安装有转台,在测目标时它被隐藏于被测目标的腹腔内,因此测目标时转顶的回波不会对雷达总回波产生实质性影响。另一方面,如果要测得未安装目标时支架本身的背景回波,需要将目标从支架上卸开,此时原来隐藏的转顶则显露出来。毫无疑问,转顶的雷达强散射会远远超出支架的低背景散射。因此,如何解决不放置定标体和不放置目标时,定标区和目标区的背景回波的精确测量问题,便成为能否成功进行背景抵消、实现目标RCS精确定标测量的关键。

[0067] 多重定标测量和处理所面临的问题是:采用多个标准体进行多重定标测量时,定标体替换既耗费大量架设、测量时间,也难以保证测量条件的一致性,从而影响定标精度。需要发明单一的标准定标体,只需测量单个定标体随方位旋转的回波信号,即可用于完成多重定标处理。

[0068] 本发明旨在同时解决目标RCS测量中的上述两个问题,提出一种新的标准定标体外形设计,采用该装置只需进行一次方位旋转测量,获得给定的雷达频率下的全方位测量数据,不但可以完成背景信号提取,而且可进行多重定标处理,同时,该外形设计还克服了传统偏心圆柱体、CAM定标体的所有缺点。由此,通过对该标准体一次方位旋转测量,背景提取辅助测量、定标测量、背景抵消处理和多重定标处理均可依据该测量数据一次同时完成。

[0069] 本发明采用的技术方案包括两个部分:一是一种新的标准定标体外形设计;二是采用该装置进行测量、背景提取、背景抵消处理、以及多重定标处理的方法和流程。

[0070] 一种新的标准定标体外形设计:

[0071] 新的标准定标体的外形设计是建立在CAM定标体外形设计的基础之上的,可以看成是对CAM外形的改进。具体地,在CAM外形的基础上,沿CAM外形的小圆柱、大圆柱和平板面,在360°全方位上增加半圆弧面,其中半圆弧面的直径等于CAM定标体的高。我们称这一新的外形设计为球面CAM(Spheroid CAM,简记为SCAM),其几何外形如图5所示。

[0072] 在高频区,SCAM定标体的大、小球柱(CAM定标体大、小圆柱所对应的方位)的RCS电

平分别满足以下公式：

$$[0073] \quad \sigma_L(f) = \frac{\pi}{4} h(h+2a) \quad (14)$$

$$[0074] \quad \sigma_S(f) = \frac{\pi}{4} h(h+2b) \quad (15)$$

[0075] 式中, $\sigma_L(f)$ 和 $\sigma_S(f)$ 分别为大球柱和小球柱的RCS; a 为大圆柱体的半径; b 为小圆柱体的半径; h 为SCAM定标体的高, 同时也是SCAM外圆弧曲面的直径。

[0076] 若CAM和SCAM定标体的几何设计参数均为: 大圆柱体的半径为 a 、小圆柱体的半径为 b 、定标体的高为 h , 则对比研究可发现:

[0077] (1) 对比公式 (13) 和公式 (14) - (15) 可知, 在高频区, CAM定标体的3个等效标准体分别为圆柱体和平板, 其RCS均随频率升高而快速升高; 而SCAM定标体大、小球柱的RCS不随雷达频率变化; SCAM定标体两侧 (CAM平板方向) 柱面的最大RCS与半径为 $h/2$ 的圆柱体的RCS成正比。SCAM的这种RCS电平不随频率变化的特性有利于提高RCS测量定标精度;

[0078] (2) 尽管总体上SCAM的几何外形尺寸比CAM的尺寸大, 但在三个等效标准体方向上, SCAM的RCS值均小于CAM的RCS值。事实上, SCAM定标体在全方位上其平均RCS电平均低于CAM定标体的RCS电平。SCAM的这种低RCS电平特性有利于用作为背景辅助测量体。

[0079] 采用SCAM定标体的背景测量和提取处理方法:

[0080] 假设采用SCAM定标体作为背景提取辅助测量的物体 (以下简称为辅助测量体), 若将该辅助测量体放置于目标支架转顶作方位旋转测量, 其放置方式与图3中偏心圆柱体的放置方式类似, 也即使SCAM的外圆弧曲面垂直于雷达视线。雷达测得的SCAM随方位角变化的宽带散射特性回波信号可表示为:

$$[0081] \quad S(f, \theta) = C(f, \theta) + B(f) \quad (16)$$

[0082] 式中 $S(f, \theta)$ 表示测量雷达接收到的回波信号, 是随方位角 θ 变化的量; $C(f, \theta)$ 表示辅助测量体SCAM的真实散射回波, 也是随方位角 θ 变化的量; $B(f)$ 表示测试场固定背景回波, 不随方位角旋转而变化。

[0083] 上述三个信号分量均为复信号, 可表示为同相 (I) 和正交相位 (Q) 通道信号, 分别记为:

$$[0084] \quad S(f, \theta) = S_I(f, \theta) + jS_Q(f, \theta) \quad (17)$$

$$[0085] \quad C(f, \theta) = C_I(f, \theta) + jC_Q(f, \theta) \quad (18)$$

[0086] 和

$$[0087] \quad B(f) = B_I(f) + jB_Q(f) \quad (19)$$

[0088] 上述三式中, $j = \sqrt{-1}$ 为虚数; 下标 I 和 Q 分别表示 I 通道和 Q 通道信号, 即: $S_I(f, \theta)$ 和 $S_Q(f, \theta)$ 分别表示测量雷达接收到回波的 I 和 Q 通道信号, 是随方位角 θ 变化的量; $C_I(f, \theta)$ 和 $C_Q(f, \theta)$ 分别表示表示辅助测量体真实回波的 I 和 Q 通道信号, 也是随方位角 θ 变化的量; $B_I(f)$ 和 $B_Q(f)$ 表示测试场固定背景回波的 I 和 Q 通道信号, 不随方位角 θ 的改变而变化;

[0089] 且有

$$[0090] \quad \begin{aligned} S_I(f, \theta) &= A_S(f, \theta) \cos[\phi_S(f, \theta)] \\ S_Q(f, \theta) &= A_S(f, \theta) \sin[\phi_S(f, \theta)] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
 [0091] \quad C_I(f, \theta) &= A_C(f, \theta) \cos[\phi_C(f, \theta)] \\
 C_Q(f, \theta) &= A_C(f, \theta) \sin[\phi_C(f, \theta)]
 \end{aligned} \tag{21}$$

[0092] 其中, $A_S(f, \theta)$ 和 $\phi_S(f, \theta)$ 分别表示测量雷达接收到回波的幅度和相位, $A_C(f, \theta)$ 和 $\phi_C(f, \theta)$ 分别表示辅助测量体真实回波幅度和相位, 均是随方位角 θ 变化的量, 有:

$$\begin{aligned}
 [0093] \quad A_S(f, \theta) &= |S(f, \theta)| = \sqrt{S_I^2(f, \theta) + S_Q^2(f, \theta)} \\
 \phi_S(f, \theta) &= \tan^{-1} \left(\frac{S_Q(f, \theta)}{S_I(f, \theta)} \right)
 \end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
 [0094] \quad A_C(f, \theta) &= |C(f, \theta)| = \sqrt{C_I^2(f, \theta) + C_Q^2(f, \theta)} \\
 \phi_C(f, \theta) &= \tan^{-1} \left(\frac{C_Q(f, \theta)}{C_I(f, \theta)} \right)
 \end{aligned} \tag{23}$$

[0095] 因此, 由式 (16) ~ (23) 有:

$$\begin{aligned}
 [0096] \quad S_I(f, \theta) &= A_C(f, \theta) \cos[\phi_C(f, \theta)] + B_I(f) \\
 S_Q(f, \theta) &= A_C(f, \theta) \sin[\phi_C(f, \theta)] + B_Q(f)
 \end{aligned} \tag{24}$$

[0097] 或者

$$\begin{aligned}
 [0098] \quad B_I(f) &= S_I(f, \theta) - A_C(f, \theta) \cos[\phi_C(f, \theta)] \\
 B_Q(f) &= S_Q(f, \theta) - A_C(f, \theta) \sin[\phi_C(f, \theta)]
 \end{aligned} \tag{25}$$

[0099] 从以上数学式可见: 只要通过对SCAM辅助测量体的测量, 能够得到 $A_C(f, \theta)$ 和 $\phi_C(f, \theta)$, 则由式 (25) 即可提取出背景信号 $B_I(f)$ 和 $B_Q(f)$ 。

[0100] 为了通过辅助测量提取背景信号, Muth提出(参考文献L.A.Muth, C.M.Wang, and T.Conn, "Robust Separation of Background and Target Signals in Radar Cross Section Measurements," IEEE Trans.Instrum.Meas., Vol.54, No.6, 2005, pp.2462-2468.)采用偏心放置于目标支架上的圆柱体作方位旋转测量来完成背景辅助测量和提取。Muth提出了一种从测量数据在I-Q平面上拟合圆的算法, 即最小中值平方-正交距离回归法 (Least Median of Squares-Orthogonal Distance Regression, LMS-ODR)。该方法首先通过最小中值平方来剔除测量信号中可能存在的异常点, 然后采用正交距离回归法得到测量数据在I-Q平面上的拟合圆参数, 则圆心在I-Q平面上的坐标值即为背景信号 $B_I(f)$ 和 $B_Q(f)$ 。

[0101] 注意到SCAM的大、小球柱具有同偏心圆柱一样的散射特性: 在球柱所定义的方位角范围内, 其散射幅度不随方位角变化, 但由于偏心安装, 其回波的相位是随着SCAM作方位旋转而变化的。由此可见, 若采用SCAM作为背景提取辅助测量体, 其背景提取算法可以直接借鉴Muth的I-Q平面拟合圆法。

[0102] 与采用偏心圆柱作为辅助测量体所不同的是, SCAM包含大小不同的两个球柱, 因此, 可针对每个球柱的方位测量数据, 分别进行I-Q平面拟合圆处理, 得到每个频率 f 下的两组拟合参数, 即: 针对大球柱测量数据, 得到I-Q平面拟合圆圆心参数 $B_{LI}(f)$ 和 $B_{LQ}(f)$; 针对小球柱测量数据, 得到I-Q平面拟合圆圆心参数 $B_{SI}(f)$ 和 $B_{SQ}(f)$ 。理论上, 这两者应该是重合的。但由于噪声等因素对测量不确定度的影响, 一般 $B_{SI}(f) \neq B_{LI}(f)$ 和 $B_{SQ}(f) \neq B_{LQ}(f)$ 。因此, 可以取两者的均值作为最终提取的背景信号, 即:

$$\begin{aligned}
 \hat{B}_I(f) &= \frac{B_{SI}(f) + B_{LI}(f)}{2} \\
 \hat{B}_Q(f) &= \frac{B_{SQ}(f) + B_{LQ}(f)}{2}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

[0104] 式中 $\hat{B}_I(f)$ 和 $\hat{B}_Q(f)$ 为采用SCAM作为背景测量辅助体测量数据提取得到的背景的I、Q通道信号； $B_{LI}(f)$ 和 $B_{LQ}(f)$ 为采用SCAM大球柱测量数据提取得到的背景的I、Q通道信号； $B_{SI}(f)$ 和 $B_{SQ}(f)$ 为采用SCAM小球柱测量数据提取得到的背景的I、Q通道信号。

[0105] 采用SCAM定标体的背景抵消和RCS多重定标处理方法：

[0106] SCAM作为标准定标体，其在不同方位角下的主要散射可等效为大球柱、小球柱和圆柱面等3种散射体。若以图5中坐标轴x方向代表方位 0° ，y方向代表方位 90° ，则小球柱散射的中心方位角为方位 0° ，大球柱散射的中心方位角为 180° ，圆柱面峰值散射位于方位 φ 和 $\varphi + 180^\circ$ 方向上。 φ 的计算公式为：

$$\varphi = \arccos\left(\frac{a-b}{a+b}\right)
 \tag{27}$$

[0108] Xu等人提出一种基于最小加权均方误差(MWMSE)的RCS测量多重定标处理方法(参考文献Xiaojian Xu, Yongze Liu, "Dual-Calibration Processing Based on Minimum Weighted Mean Squared Error (MWMSE) in RCS Measurement," Proc. 2015 Annual Meeting of the Antennas Measurement Technique Association, Long Beach, CA, USA, Oct. 2015)。该文献举例说明了采用CAM定标体进行多重定标测量和处理的方法。因此，若对SCAM作 360° 全方位旋转测量，其在方位 0° 、 180° 和 φ 方向的测量数据可作为3种标准体的散射数据，用于RCS测量多重定标处理，定标中所需的理论RCS值可通过电磁散射数值方法(例如矩量法)精确计算得到，而RCS测量中的背景抵消和多重定标处理方法可直接借鉴Xu等人所提出的方法。

[0109] 综上所述，对本发明所设计的SCAM标准定标体作一次 360° 方位旋转测量，所获取的测量数据可用于同时完成背景提取、背景抵消和RCS多重定标处理。

[0110] 本发明的主要技术优点是：

[0111] (1) 本发明提出了一种新的定标体外形设计，采用所设计的新型定标体SCAM，只需通过一次 360° 方位旋转测量，即可同时获得用于完成背景辅助测量、提取和抵消处理、以及RCS多重定标测量与处理所需的数据。

[0112] (2) 本发明所设计的新定标体SCAM是对现有CAM定标体外形的改进，消除了目前国际上通用的传统圆柱定标体和CAM定标体用于背景提取辅助测量与RCS定标处理时的固有缺点，包括：

[0113] (a) 采用相同的设计参数时，SCAM具有比CAM更低的RCS电平，当用作为背景辅助测量定标体时，有利于背景信号提取；

[0114] (b) SCAM用作为多重定标体时，其三个等效标准散射体为大球柱、小球柱和圆柱面，同CAM定标体的大圆柱、小圆柱和平板面相比，其理论RCS具有更好的频率特性：在高频区，与圆柱体不同，球柱的RCS电平不随频率变化；SCAM的圆柱面散射也优于CAM的平板面散射特性；

[0115] (c)与圆柱体和CAM定标体的RCS对俯仰角非常敏感不同,SCAM的RCS电平对俯仰角不敏感。

[0116] (3)本发明所提出的SCAM外形设计为采用金属支架的RCS测试场找到了一种可以替代传统金属球定标体的新型定标体,且其使用特性大大优于传统的金属球定标体。SCAM定标体的大、小球柱其RCS在较大的方位角范围和一定的俯仰角范围内对姿态不敏感,因此,具有类似于金属球的RCS对姿态不敏感的良好特性。而传统的金属球定标体因与金属支架之间存在严重的耦合散射,不能用于采用金属支架的RCS测试场。本发明所提出的SCAM外形设计不但为采用金属支架的RCS测试场找到了一种可以替代传统金属球定标体的新型定标体,而且SCAM还可同时用作为背景测量辅助体和多重定标体,有利于提高低可探测目标的RCS测量精度。可见,SCAM的使用特性大大优于传统的金属球定标体。

[0117] (4)本发明所提出的SCAM外形及其良好的RCS特性,使得其应用于采用大型目标支架和转顶的RCS测试场成为可能。图6和图7给出了采用相同设计参数的CAM和SCAM的RCS特性曲线。可以发现,尽管本发明提出的SCAM定标体其几何尺寸比CAM大,但在相同雷达频段,其RCS电平比CAM定标体的低,而且在高频区,SCAM的大、小球柱的RCS不随频率变化,而传统的圆柱体或CAM定标体的RCS电平则随频率升高而升高。对于采用大型目标支架和转顶的RCS测试场,除非采用异地定标测量技术(即为定标体单独设计支架,并将定标体安放在比目标距离较近的位置),否则传统圆柱体和CAM定标体因尺寸大、RCS电平太高而很难用于大型目标测试场。相反,由于SCAM定标体的大、小球柱RCS不随频率变化的良好特性,使得其在采用大承重支架和转顶这样一类大型目标RCS测试场中的应用成为可能。

附图说明

[0118] 图1为目标RCS测量几何关系;

[0119] 图2为用于背景提取辅助测量的可平移载体;

[0120] 图3为用于背景提取辅助测量的偏心圆柱体;其中,(a)低散射目标支架与转顶;(b)配套偏心圆柱体;

[0121] 图4为CAM定标体的几何结构示意图;其中,(a)CAM定标体的3D造型;(b)CAM定标体的横向剖面图;

[0122] 图5为本发明设计的SCAM定标体的几何结构示意图;其中,(a)SCAM定标体的3D造型;(b)SCAM定标体的横向剖面图;

[0123] 图6为CAM定标体的RCS幅度特性方位角变化特性示意图;其中,(a)RCS幅度随方位角的变化特性;(b)RCS幅度随频率的变化特性;(c)RCS幅度随俯仰角的变化特性;

[0124] 图7为SCAM定标体的RCS幅度特性方位角变化特性示意图;其中,(a)RCS幅度随方位角的变化特性;(b)RCS幅度随频率的变化特性;(c)RCS幅度随俯仰角的变化特性。

具体实施方式

[0125] 下面结合附图以及具体实施方式进一步说明本发明。

[0126] SCAM标准定标体用于同时完成背景辅助测量、背景提取与抵消处理、目标RCS测量多重定标测量与处理的具体步骤如下:

[0127] 步骤-1:SCAM标准定标体的几何外形设计和加工制造

[0128] 根据RCS多重定标和背景辅助测量与提取对于SCAM标准定标体外形尺寸的需求,选定标准定标体的外形参数,主要参数包括大圆柱尺寸 a 、小圆柱尺寸 b 、以及高度 h 。各参数的意义如图5所示。SCAM外形参数和旋转中心(图5(b)中的 o 点)的选择应综合考虑以下因素:

[0129] (1) 所设计得到的SCAM定标体其对应的大球柱、小球柱的RCS电平,可采用公式(14)和(15)进行估算;

[0130] (2) 所设计得到的SCAM定标体其几何外形尺寸以及旋转中心的选择适合用于背景辅助测量:当SCAM在测量中转过 360° 方位角时,其所对应的大、小球柱在测量过程中因旋转造成的相对于测量雷达的距离变化至少应达到 $\lambda/4$,其中 λ 为雷达波长,以便满足采用在I-Q平面拟合圆方法进行背景信号提取的要求。

[0131] 步骤-2: SCAM标准定标体的测量

[0132] 将SCAM标准定标体安装在目标支架上,并进行 360° 全方位旋转测量,获得SCAM散射回波的I、Q通道信号。假设对于给定的 N 个雷达频率点 f_i ($i=1, 2, \dots, N$), 针对每个频点SCAM以方位步长 $\Delta\theta$ 旋转, 360° 全方位共获得 M 个方位测量样本,其中 $M=\text{int}(360/\Delta\theta)+1$, int 表示取整数运算。

[0133] 如此,SCAM测量共获得 N 个离散频点、 M 个离散方位位置的回波信号,记为 $S_I(f_i, \theta_k)$, $S_Q(f_i, \theta_k)$, $i=1, 2, \dots, N, k=1, 2, \dots, M$ 。

[0134] 步骤-3: 被测目标测量

[0135] 将被测目标安装在目标支架上,并进行 360° 全方位旋转测量,获得目标散射回波的I、Q通道信号。其中,测量的频点应与SCAM测量完全对应,也即在 N 个给定的雷达频率点 f_i ($i=1, 2, \dots, N$)上进行;方位角旋转与否、方位测量步长等则可根据项目需求另行选择。假设目标以方位步长 $\Delta\theta_T$ 旋转,共获得 P 个方位测量样本。

[0136] 如此,目标测量共获得 N 个离散频点、 P 个离散方位位置的回波信号,记为 $V_I(f_i, \theta_l)$, $V_Q(f_i, \theta_l)$, $i=1, 2, \dots, N, l=1, 2, \dots, P$ 。

[0137] 步骤-4: 背景信号提取和背景抵消处理

[0138] 采用SCAM作为背景提取辅助测量体时,取其所对应的小球柱、大球柱方向的散射数据,用于背景信号提取。参考图5,假设小球柱所在方位角为 0° 方向,大球柱所在方位角为 180° 方向。则可取 $0^\circ \pm \theta_s$ 和 $180^\circ \pm \theta_L$ 方位范围内的测量数据用于背景提取。其中, θ_s 和 θ_L 的选取以SCAM定标体的小球柱和大球柱在该方位范围内RCS幅度基本不变为原则。

[0139] 背景提取算法可以直接借鉴Muth的I-Q平面拟合圆法(参考文献L.A.Muth, C.M.Wang, and T.Conn, "Robust Separation of Background and Target Signals in Radar Cross Section Measurements," IEEE Trans.Instrum.Meas., Vol.54, No.6, 2005, pp. 2462-2468.), 也即最小中值平方-正交距离回归法(LMS-ODR)。

[0140] 对于每个频率点 f_i , $i=1, 2, \dots, N$, 针对每个球柱的方位测量数据,分别进行I-Q平面拟合圆处理,得到每个频率下的两组圆心拟合参数,即:针对大球柱测量数据,得到I-Q平面拟合圆圆心参数 $B_{LI}(f_i)$ 和 $B_{LQ}(f_i)$;针对小球柱测量数据,得到I-Q平面拟合圆圆心参数 $B_{SI}(f_i)$ 和 $B_{SQ}(f_i)$ 。取两者的均值作为最终提取的背景信号,即:

$$\begin{aligned}
 \hat{B}_I(f_i) &= \frac{B_{SI}(f_i) + B_{LI}(f_i)}{2} \\
 \hat{B}_Q(f_i) &= \frac{B_{SQ}(f_i) + B_{LQ}(f_i)}{2}
 \end{aligned} \tag{28}$$

[0142] 式中 $\hat{B}_I(f_i)$ 和 $\hat{B}_Q(f_i)$, $i=1,2,\dots,N$ 为采用SCAM作为背景测量辅助体测量数据提取得到的频点 f_i 下背景的I、Q通道信号; $B_{LI}(f_i)$ 和 $B_{LQ}(f_i)$, $i=1,2,\dots,N$ 为采用SCAM大球柱测量数据提取得到的背景的I、Q通道信号; $B_{SI}(f_i)$ 和 $B_{SQ}(f_i)$, $i=1,2,\dots,N$ 为采用SCAM小球柱测量数据提取得到的背景的I、Q通道信号。

[0143] 由此,通过SCAM的测量数据可提取出每个雷达频点上的背景信号 $\hat{B}_I(f_i)$ 和 $\hat{B}_Q(f_i)$, $i=1,2,\dots,N$ 。

[0144] 根据公式(16)中的模型,采用背景抵消处理后SCAM定标体的真实回波为:

$$\begin{aligned}
 \hat{C}_I(f_i, \theta_k) &= S_I(f_i, \theta_k) - \hat{B}_I(f_i) \\
 \hat{C}_Q(f_i, \theta_k) &= S_Q(f_i, \theta_k) - \hat{B}_Q(f_i)
 \end{aligned}, \quad i=1,2,\dots,N, \quad k=1,2,\dots,M \tag{29}$$

[0146] 采用背景抵消处理后的被测目标的真实回波为:

$$\begin{aligned}
 \hat{T}_I(f_i, \theta_l) &= V_I(f_i, \theta_l) - \hat{B}_I(f_i) \\
 \hat{T}_Q(f_i, \theta_l) &= V_Q(f_i, \theta_l) - \hat{B}_Q(f_i)
 \end{aligned}, \quad i=1,2,\dots,N, \quad l=1,2,\dots,P \tag{30}$$

[0148] 步骤-5: RCS多重定标处理

[0149] 若以图5中坐标轴x方向代表方位 0° , y方向代表方位 90° , 则SCAM作为标准定标体时,其小球柱散射的中心方位角为方位 0° , 大球柱散射的中心方位角为 180° , 圆柱面峰值散射位于方位 φ 方向上,其中 φ 的计算可采用式(27)。

[0150] 因此,分别取小球柱在方位角 0° 处的回波测量数据(记为 $\hat{C}_I(f_i, \theta_{SC}), \hat{C}_Q(f_i, \theta_{SC}), i=1,2,\dots,N$)、大球柱在方位角 180° 处的回波测量数据(记为 $\hat{C}_I(f_i, \theta_{LC}), \hat{C}_Q(f_i, \theta_{LC}), i=1,2,\dots,N$)、以及圆柱面在方位 φ 方处回波数据(记为 $\hat{C}_I(f_i, \theta_{SP}), \hat{C}_Q(f_i, \theta_{SP}), i=1,2,\dots,N$)作为3个等效标准定标体的测量数据,同时采用数值方法(例如矩量法)计算得到这3个等效标准定标体的理论复RCS值。

[0151] 如此,对于经背景抵消处理后的目标测量数据,即 $\hat{T}_I(f_i, \theta_l), \hat{T}_Q(f_i, \theta_l), i=1,2,\dots,N, l=1,2,\dots,P$,利用经背景抵消处理后的3组定标数据,即: $\hat{C}_I(f_i, \theta_{SC}), \hat{C}_Q(f_i, \theta_{SC}); \hat{C}_I(f_i, \theta_{LC}), \hat{C}_Q(f_i, \theta_{LC}); \hat{C}_I(f_i, \theta_{SP}), \hat{C}_Q(f_i, \theta_{SP}), i=1,2,\dots,N$,根据RCS定标公式(12),并直接采用Xu等人提出的基于最小加权均方误差的RCS测量多重定标处理方法(参考文献Xiaojian Xu, Yongze Liu, "Dual-Calibration Processing Based on Minimum Weighted Mean Squared Error (MWMSE) in RCS Measurement," Proc. 2015 Annual Meeting of the Antennas Measurement Technique Association, Long Beach, CA, USA, Oct. 2015),即可完成目标RCS测量的多重定标处理。

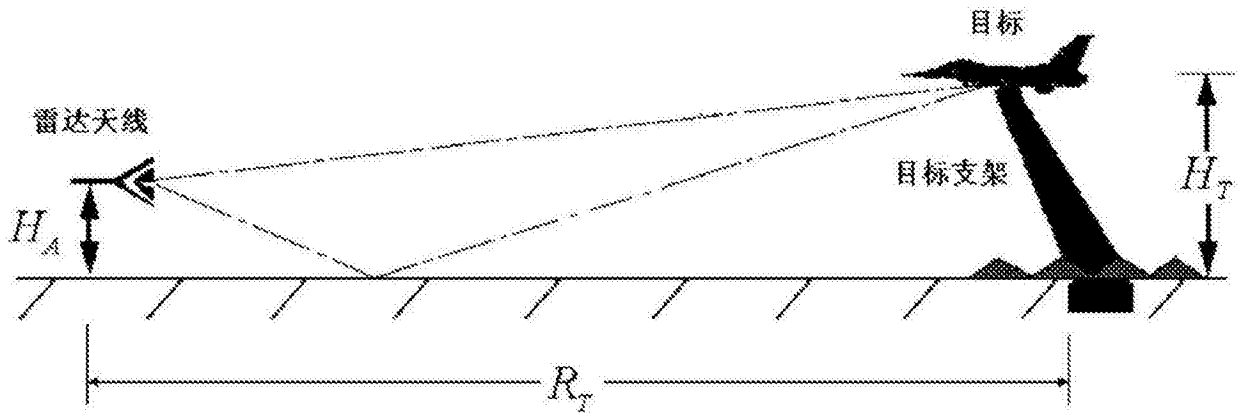
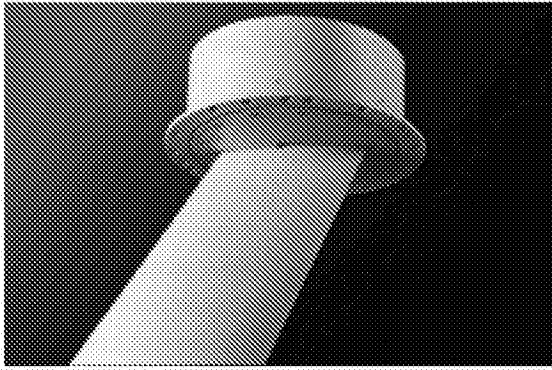


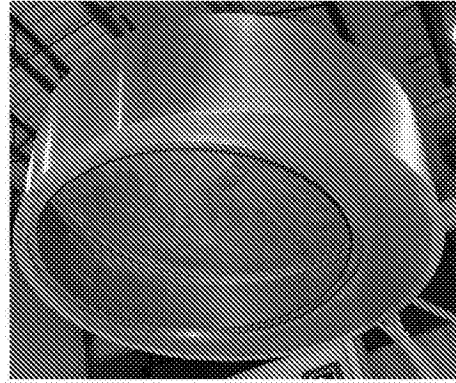
图1



图2

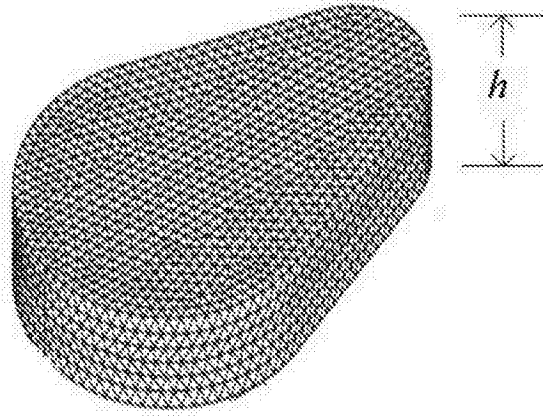


(a)

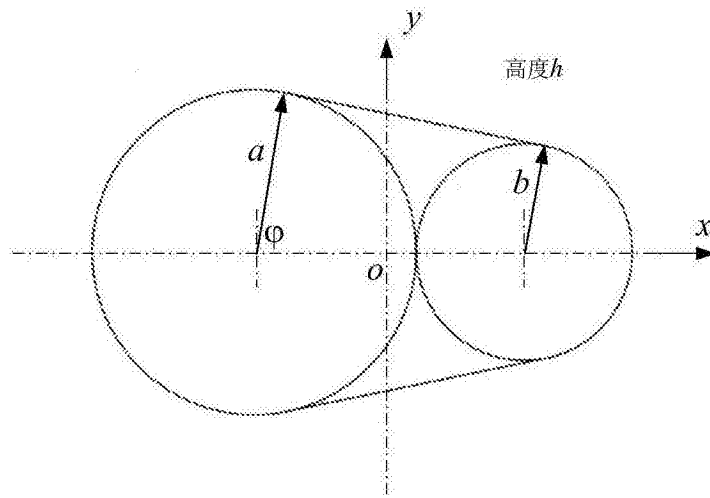


(b)

图3



(a)



(b)

图4

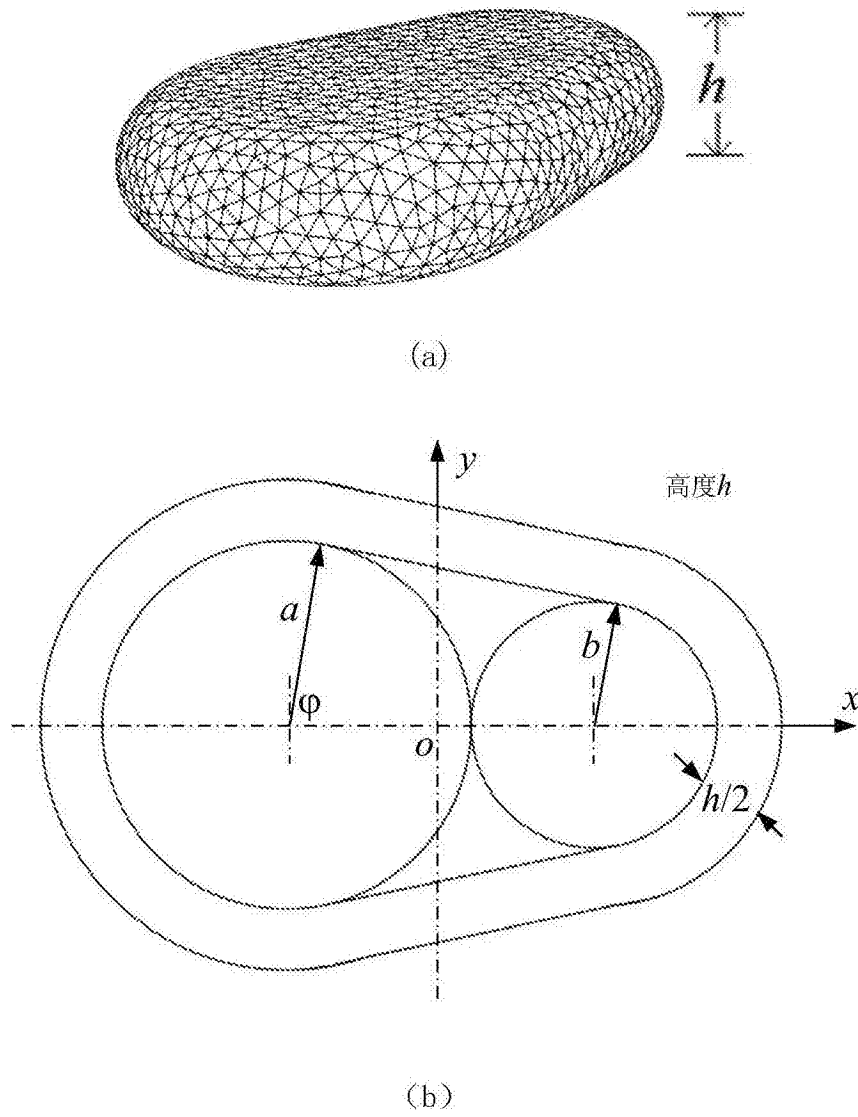
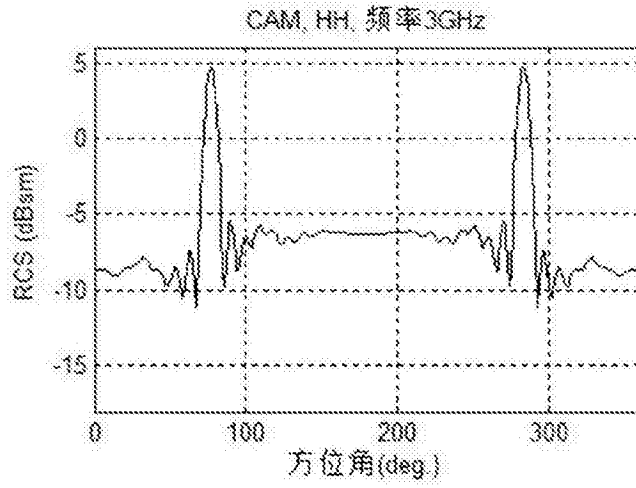
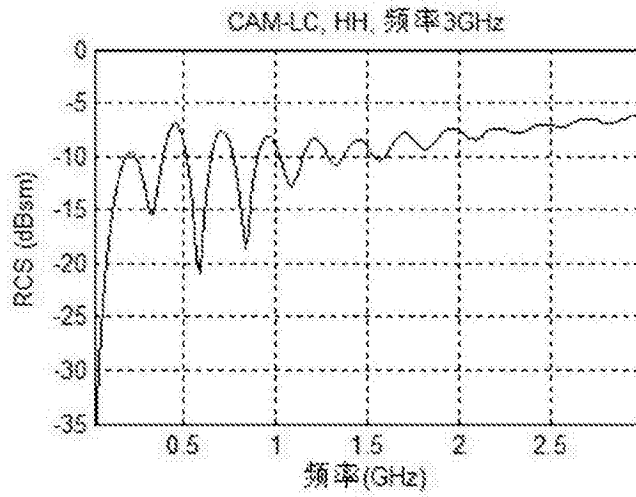


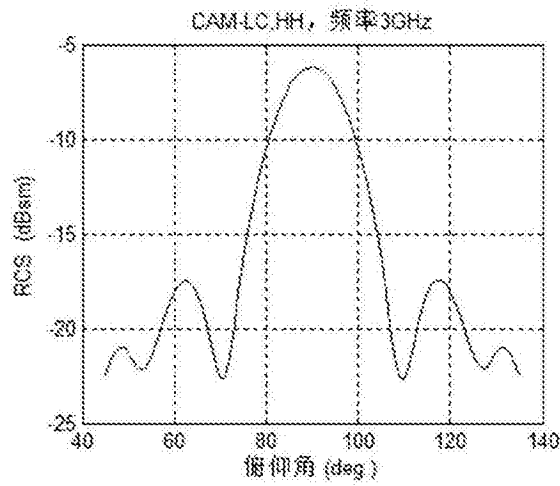
图5



(a)

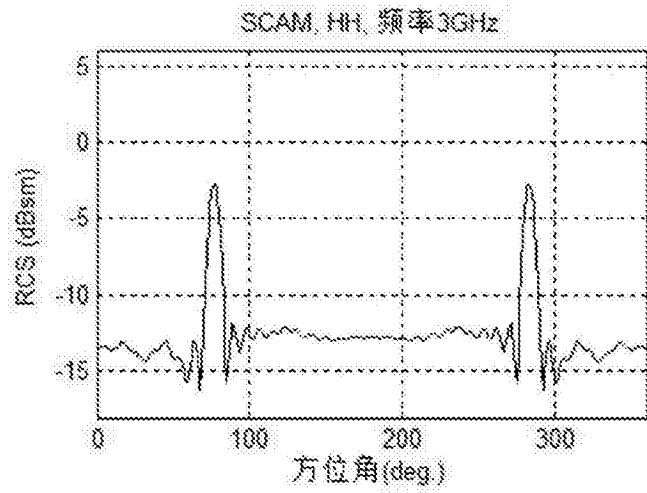


(b)

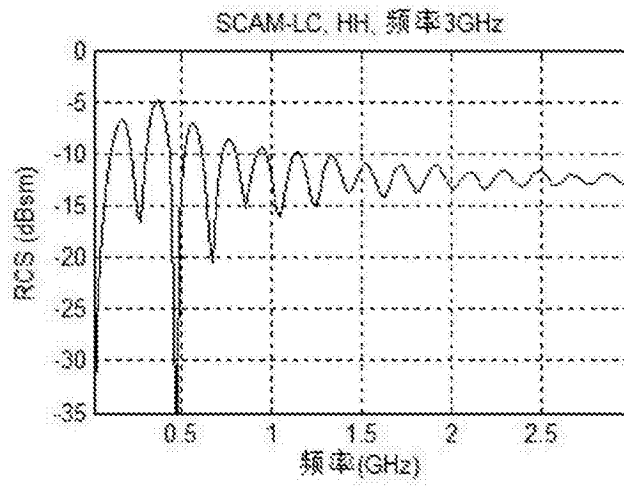


(c)

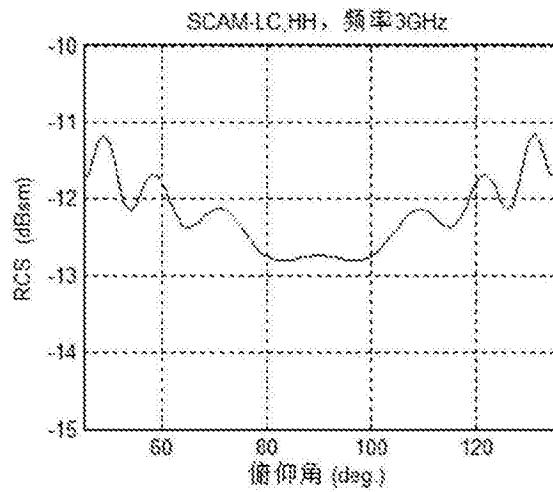
图6



(a)



(b)



(c)

图7