

# 太赫兹雷达目标 HRRP 特性分析

喻 洋 皮亦鸣

(电子科技大学电子工程学院, 四川成都 611731)

**摘 要:** 太赫兹由于其穿透性强、大带宽等优势, 在雷达信号处理领域受到了广泛的关注。同时, 高分辨率距离像(High Resolution Range Profiles, HRRP)在目标检测、识别以及成像等领域具有很高的应用价值, 但是, 针对太赫兹频段目标 HRRP 特性的研究却较少。本文首先从确定信号模型对太赫兹频段目标 HRRP 的方位角敏感性进行了研究, 并利用协方差矩阵的主特征向量提取其平均 HRRP, 从而达到抑制目标 HRRP 方位角敏感性的目的。另外, 根据距离单元中散射点的不同分布, 对太赫兹雷达目标 HRRP 距离单元进行分类, 并分别使用瑞利模型、赖斯模型以及混合分布模型进行统计建模。之后, 使用对数积累量方法(Method of Log-Cumulants, MoLC)和基于字典的随机最大期望(Dictionary-based Stochastic Expectation-Maximization, DSEM)算法对上述模型的参数进行估计。最后, 利用研制的太赫兹高分辨率雷达系统开展了不同带宽下的复杂目标 HRRP 特性实验, 实验结果表明, 太赫兹频段下目标平均 HRRP 与 HRRP 帧内其他 HRRP 的相关系数高于单个 HRRP, 同时, 对于高分辨率下的目标 HRRP 距离单元统计特性, 可以使用混合分布模型对其进行建模。

**关键词:** 太赫兹; 高分辨率距离像; 方位角敏感性; 混合分布模型; 基于字典的随机最大期望算法

**中图分类号:** TN95      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2016.06.001

## The Analysis of Target HRRP Properties in Terahertz Band

YU Yang PI Yi-ming

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

**Abstract:** Terahertz (THz) wave has aroused extensive attention since the highly penetrability and wide band signal. And it has been identified that the high resolution range profiles (HRRP) possess great potentials in target detection, recognition, imaging, and so on. However, the properties of target HRRP in THz band are rarely investigated. This paper researched the target-aspect sensitivity with the deterministic model, and planning to overcome it by extracting the average HRRP based on the principle eigenvector of covariance matrix. Then, according to the different distribution of scattering center, the range cells were classified. Rayleigh, Ricean and Mixture models were proposed to describe the statistical characteristics of range cells amplitude histogram. The Method of Log-Cumulants (MoLC) and Dictionary-based Stochastic Expectation-Maximization (DSEM) methods were utilized to estimate the parameters of statistical models. Finally, the experiments of target HRRP properties in THz band were performed with the THz high resolution radar system. The experimental results showed that average HRRP of multiple HRRPs has higher correlation coefficients with other HRRPs than single HRRP does. And the statistical characteristics of the range cell can be described by the mixture model precisely.

**Key words:** Terahertz; high resolution range profile; target-aspect sensitivity; mixture model; dictionary-based stochastic expectation-maximization

## 1 引言

雷达的主要任务为检测与识别其视场内可能存在的目标,或通过对回波信号的处理对感兴趣场

景内的目标图像进行重建。随着雷达技术的发展, 距离分辨率不断提高, 导致其回波内携带的目标与场景信息更加丰富。目标 HRRP 中包含了目标的多种信息, 如目标尺寸、运动速度、散射点分布情况

等,从而使得目标 HRRP 被广泛应用于目标检测<sup>[1-3]</sup>,目标特征提取<sup>[4-7]</sup>,自动目标识别<sup>[8-11]</sup>以及合成孔径雷达成像<sup>[12-16]</sup>等方面。

在太赫兹频段,由于其频率高、波长短,所以易实现大带宽发射信号,从而提高雷达的距离向分辨率。对太赫兹的研究虽然起步较晚,但是由于其独有的特性,在许多领域都具有很强的应用前景,如生物医学、测试化学、植物学以及工程学等。近年来,随着太赫兹技术的不断发展,尤其是可靠的太赫兹源的成功研制,使得太赫兹的应用又登上了一个新的台阶<sup>[17-20]</sup>。但是,由于太赫兹在电磁频谱中处于微波频段向光学频段过度区域,还没有成熟的理论可以准确描述其特性,传统的电磁波理论和光学理论只能对这个频段的目标与杂波特性的粗略的求解。因此,对太赫兹频段目标 HRRP 特性的研究显得尤为重要。

在目标 HRRP 特性研究领域,前人已经在传统电磁波频段做了大量研究。1996年,Hsueh-Jyh Li 等人对目标 HRRP 间匹配度的统计特性与发射带宽、目标姿态角以及目标复杂度的关系进行了研究<sup>[21]</sup>。研究结果表明,提高雷达分辨率有助于抑制方位角对目标 HRRP 抖动的影响,从而使得目标识别所需的数据库容量显著减小。Rob Williams 等人对 X 波段的目标方位角敏感性进行了研究<sup>[22]</sup>,并指出利用 8 个相邻的 HRRP 提取的平均 HRRP 可以抑制方位角对 HRRP 的影响。2001年,邢孟道等研究了 C 波段雷达下不同因素对距离像敏感性的影响,并提出使用 HRRP 协方差矩阵的主特征向量抑制方位角敏感性的方法<sup>[23]</sup>。

针对宽带雷达目标检测的需求,Lan Du 等使用了两种分布模型混合的方式对不同类型的目标距离单元进行了建模<sup>[24]</sup>。并使用中心频率为 5520 MHz、带宽为 400 MHz 的雷达实测数据对所提出的方法进行了验证。Emesto Conte 等提出了基于广义似然比(Generalized Likelihood Ratio Test, GLRT)的距离扩展目标检测方法<sup>[2]</sup>。他们发现距离单元幅度的波动会极大的影响检测性能,距离单元中散射点不同的分布将导致额外的检测损失。同样为了检测距离扩展目标,Penglang Shui 等提出了一种基于多个连续 HRRP 的启发式检测器<sup>[3]</sup>。这种检测算法在基于目标上强散射中心为离散分布的前提下,使用收缩图的方法对 HRRP 进行提取,并利用提取后的 HRRP 构造相关矩阵对其相似性进行测量,之后使用相关矩阵的权值完成目标检测。

在基于 HRRP 的目标检测方面,Zunhua Guo 等

通过目标 HRRP 的微分功率谱(Differential Power Spectrum, DPS)和乘积谱提取了目标的一维频率域特征<sup>[5]</sup>。其中微分功率谱具有平移不变性,能够保留距离像的频谱信息;乘积谱由距离像的幅度谱信息与相位谱信息构成。结果表明,使用 DPS 和乘积谱的特征可以得到更高的目标识别率。Arnab Shaw 等通过对目标 HRRP 进行特征提取,实现了雷达目标的自动识别<sup>[10]</sup>。他们使用了目标 HRRP 矩阵的主特征向量作为匹配模板进行实验,结果表明使用主特征向量可以得到更高的识别效率。

本文对太赫兹雷达目标 HRRP 特性进行分析。首先,研究了目标方位角敏感性产生机理,并对不同雷达分辨率下平均 HRRP 对方位角敏感性的抑制的作用进行了研究。其次,针对距离单元中强散射中心不同的分布情况,对目标 HRRP 距离单元进行了分类,并使用 MoLC 和 DSEM 方法对不同距离单元统计特性模型进行参数估计<sup>[25-26,32]</sup>。最后,利用室温全固态高分辨率太赫兹雷达系统开展了目标 HRRP 特性实验。

文章安排如下:第 2 节介绍了目标 HRRP 的确定性模型,并通过散射中心的距离徙动对目标 HRRP 帧进行了定义,同时分析了目标平均 HRRP 提取方法。第 3 节分别使用瑞利模型、赖斯模型和混合模型对不同的类型的距离单元进行建模。第 4 节详细介绍了 MoLC 和 DSEM 参数提取方法。第 5 节开展了太赫兹频段目标 HRRP 特性实验,并对实验结果进行了详细分析。第 6 节为全文总结以及未来工作介绍。

## 2 太赫兹目标 HRRP 确定性模型

### 2.1 散射中心模型

根据电磁散射理论,当电磁波波长小于目标尺度时,目标可以看成由多个散射中心组成<sup>[27-28]</sup>。在太赫兹频段,由于波长极短,大部分目标的尺度均大于其波长,所以可以使用散射中心模型对太赫兹频段目标进行建模。此时,目标不能再作为点目标进行处理,可以将其看作由多个主散射中心组成,其对电磁波的散射响应也由这些主散射中心的散射响应构成。这些主散射中心可以表征目标的各项物理属性,所以被广泛应用于自动目标识别和高分辨率雷达散射数据分析中。

对于高分辨率雷达系统,目标的回波由多个距离分辨单元组成,同时,目标上的散射中心也被投影到雷达视线上,所以,太赫兹频段的电大目标,其在高分辨率发射信号的作用下,将在回波信号的 HRRP 中占

据多个距离分辨单元。对于不同的目标,由于其主散射中心在目标上的分布不同,所以其对应的 HRRP 也表现为不同的形式。一般而言,目标上的腔体、锥体以及边缘等结构的散射电磁波较强,所以在对目标回波进行分析时,可以使用这些结构作为主散射中心对目标进行建模,例如,飞机上的引擎(腔体)、机头(锥体)以及机翼和尾翼的边缘都可以作为其主散射中心。这些主散射中心所占据的距离分辨单元的回波幅度将远远高于其他散射中心,利用这些距离分辨单元就可以对飞机的回波特性进行分析<sup>[29]</sup>。假设在目标 HRRP 的第  $m$  个距离分辨单元中有  $N$  个散射中心,则这个距离单元的回波  $e_m$  可以被表示为

$$e_m = \sum_{i=1}^N \sigma_i \exp \left[ -j \left( \frac{4\pi}{\lambda} r_i + \psi_{i0} \right) \right] \quad (1)$$

其中  $\sigma_i$  和  $\psi_{i0}$  为第  $i$  个散射中心子回波的幅度和初始相位,  $\lambda$  为波长,  $r_i$  表示第  $i$  个散射中心到雷达的距离。

## 2.2 目标方位角敏感性

对于静止目标,由于其散射中心和雷达的距离固定,所以其 HRRP 也将保持不变。而大部分雷达目标均为动目标,这将导致目标 HRRP 发生剧烈的变化。首先,随着目标的移动,散射中心和雷达之间的距离发生变化,将导致散射中心的信号在回波中发生距离单元徙动。其次,即使目标的运动幅度很小,没有发生距离单元徙动,由于距离单元回波由多个散射中心的子回波相干叠加而成,也将导致距离单元回波幅度发生明显的抖动,这一现象被称为目标的方位角敏感性。在太赫兹频段,由于波长极小,这一现象也将更为显著。

在没有发生距离徙动的情况下,由于主散射中心所处的距离单元不变,所以可以认为目标的散射中心模型未发生变化。理论上,可以将散射中心不发生距离徙动的多个连续 HRRP 作为一个 HRRP 帧进行分析。对于一个 HRRP 帧,其目标在方位向上的最大变化角度由下式决定

$$\Delta\phi \leq \Delta\phi_{\text{MTRC}} = \frac{c}{2BL_a} \quad (2)$$

其中  $B$  为发射信号带宽,  $L_a$  为目标方位向最大长度,  $c$  为电磁波的传播速度。根据式(1),可以得到距离单元在时刻  $t$  的回波幅度为

$$|e_m(t)|^2 = e_m(t) e_m^*(t) = \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=2}^N \sum_{k=1}^{i-1} \sigma_i \sigma_k \xi_{mik}(t) \quad (3)$$

其中

$$\xi_{mik}(t) = \cos[\theta_{mik}(t)] \quad (4)$$

$$\theta_{mik}(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} [r_i(t) - r_k(t)] + (\psi_{i0} - \psi_{k0}) \quad (5)$$

式(4)与式(5)中的  $\theta_{mik}(t)$  表示 HRRP 中第  $m$  个距离单元所包含的第  $i$  个与第  $k$  个散射中心回波的相位差。

对式(3)进行分析不难发现,其主要由两部分组成,其中第一部分为距离单元中所有散射中心的散射强度之和,被称为散射中心自身项。第二部分与散射中心之间的回波相位相关,被称为散射中心交叉项。在一个 HRRP 帧内,由于目标的散射中心模型不变,大部分散射中心均未发生距离徙动,所以可以认为其自身项在目标旋转过程中未发生变化。但是,散射中心和雷达的距离变化仍会使交叉项随时间  $t$  发生波动,因此,散射中心交叉项  $\xi_{mik}(t)$  为目标方位角敏感性的主要产生原因。为对其进行分析,重写式(5)如下

$$\theta_{mik}(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} [r_i(t) - r_k(t)] + (\psi_{i0} - \psi_{k0}) = \Delta\theta_{mik}(t) + \Delta\theta_{mik}(0) \quad (6)$$

其中

$$\Delta\theta_{mik}(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} [r_i(t) - r_k(t)] \quad (7)$$

式(6)说明,两个散射中心子回波的相位差由它们之间的初始相位差  $\Delta\theta_{mik}(0) = \psi_{i0} - \psi_{k0}$  和与距离相关的相位差  $\Delta\theta_{mik}(t)$  决定,由于散射中心回波的初始相位为常数,所以对交叉项产生影响的主要为  $\Delta\theta_{mik}(t)$ 。

文献[30-31]提出可以使用目标 HRRP 间的相关系数作为目标识别的判定参数,因此,本文将使用相关系数对确定模型下太赫兹频段目标 HRRP 方位角敏感性进行研究。

对于同一目标在不同方位角的两个归一化 HRRP,可以定义其为

$$\begin{aligned} \bar{e}(t_i) &= [\bar{e}_1(t_i), \bar{e}_2(t_i), \dots, \bar{e}_M(t_i)]^T \\ &= \frac{e(t_i)}{\sqrt{\sum_{m=1}^M |e_m(t_i)|^2}} \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $e(t_i)$  和  $\bar{e}(t_i)$  分别为  $t_i$  时刻归一化前后的目标 HRRP,并且有

$$e(t_i) = [e_1(t_i), e_2(t_i), \dots, e_M(t_i)]^T \quad (9)$$

两个不同时刻目标 HRRP 的相关系数被定义为

$$C_{12}(\Delta t) = \left| \sum_{m=1}^M \bar{e}_m(t_1) \bar{e}_m^*(t_2) \right| \quad (10)$$

其中  $\Delta t = t_2 - t_1$ ,  $(\cdot)^*$  表示复共轭操作。根据式(10),很明显可以得到  $0 \leq C_{12}(\Delta t) \leq 1$ , 而且只有当  $\bar{e}(t_1) = \alpha \bar{e}(t_2)$  时,两者的相关系数才会等于 1。

为了研究太赫兹频段目标 HRRP 间相关系数的特性,本文利用太赫兹高分辨率雷达系统对飞机模型进行了数据采集实验,相关的分析将在 5.2 节中给出。

### 2.3 平均 HRRP

由 2.2 节的分析可知,由于目标散射中心模型不变,式(3)中的自身项在一个 HRRP 帧内不会发生变化。另一方面,太赫兹极短的电磁波波长将导致这个频段目标信号中的交叉项发生剧烈的抖动。由于散射中心模型固定,所以可以认为式(3)的交叉项是均值为零的随机过程,因此,利用 HRRP 帧内的目标 HRRP 数据计算得到的目标平均 HRRP 将在有效的削弱交叉项影响的同时,保持散射中心自身项不变,从而达到抑制方位角敏感性的目的。因此,目标平均 HRRP 被广泛应用于目标特性研究与目标识别领域。

一般来讲,平均 HRRP 可以直接使用多个连续 HRRP 数据的非相干叠加得到,另外,还可以通过求解 HRRP 数据协方差矩阵的主特征向量获得。假设一个 HRRP 帧  $\mathbf{E}$  为  $M \times N$  矩阵,包含  $N$  个不同角度采集到的目标 HRRP 数据,每个 HRRP 数据包含  $M$  个距离分辨单元,可表示为

$$\mathbf{E} = [\mathbf{e}(t_1), \mathbf{e}(t_2), \dots, \mathbf{e}(t_N)] \quad (11)$$

则其距离空间的相关系数矩阵可以使用下式进行估计

$$\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{E}\mathbf{E}^T \quad (12)$$

对矩阵  $\mathbf{E}$  进行奇异值分解可以将 HRRP 数据分解到距离域子空间  $\mathbf{U}$  和方位角子空间  $\mathbf{V}$ ,如下式所示

$$\mathbf{E} \xrightarrow{\text{SVD}} \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T = \sum_{i=1}^N \mathbf{u}_i \lambda_i \mathbf{v}_i^T \quad (13)$$

其中,距离域子空间  $\mathbf{U}$  可以表示为

$$\mathbf{U} = \mathbf{E}\mathbf{V}[\mathbf{E}\mathbf{E}^T] = \mathbf{E}\mathbf{V}[\hat{\mathbf{R}}] = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_M] \quad (14)$$

方位角子空间  $\mathbf{V}$  可表示为

$$\mathbf{V} = \mathbf{E}\mathbf{V}[\mathbf{E}^T\mathbf{E}] = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_N] \quad (15)$$

奇异值矩阵  $\mathbf{\Lambda}$  为对角矩阵,表示为

$$\mathbf{\Lambda} = \text{Diagonal}[\lambda_{11}, \lambda_{22}, \dots, \lambda_{NN}] \quad (16)$$

操作符  $\text{EV}[\cdot]$  表示提取矩阵的特征向量,奇异值矩阵  $\mathbf{\Lambda}$  为包含  $N$  个特征值的对角矩阵,并且所有特征值按降序排列,即  $\lambda_{11} \geq \lambda_{22} \geq \dots \geq \lambda_{NN}$ ,  $\lambda_{ii}$  表示第  $i$  个特征向量对应的特征值。由式(12)和式(14),距离域子空间  $\mathbf{U}$  为由式(12)估计得到的距离空间相关系数矩阵的特征向量。特征值越大,表明其对应的特征向量对回波信号的贡献越大,因此,最大特征值  $\lambda_{11}$  对应的主特征向量为回波信号中幅度最大的分量,即可认为是目标的回波信号,而其他特征向量则对应幅度

较弱的杂波信号。而由于 HRRP 帧内包含多个连续的 HRRP,所以其主特征向量为目标的平均 HRRP。

从逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像方面也可以解释平均 HRRP 对方位角敏感性的抑制作用。在 HRRP 帧的方位角方向对慢时间变量  $t$  进行傅里叶变换得到 ISAR 图像  $\mathbf{F}$ ,可表示为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & \dots & f(1,N) \\ f(2,1) & f(2,2) & \dots & f(2,N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M,1) & f(M,2) & \dots & f(M,N) \end{bmatrix}_{M \times N} \quad (17)$$

其中  $f(i, j)$  表示在图像点  $(i, j)$  处散射中心回波的复幅度。利用离散傅里叶变换的帕斯瓦尔定理可得

$$\sum_{i=1}^N |e_m(t_i)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |f(m, j)|^2 \quad (18)$$

上式中等号右侧为第  $m$  个距离单元内所有散射中心强度之和,即式(3)中的散射中心自身项,而式(3)中的交叉项在此处已经消失,从而达到了抑制目标方位角敏感性的目的。

### 3 太赫兹目标 HRRP 统计模型

根据前面的分析可知,在一个 HRRP 帧内可认为散射中心未发生距离单元走动,在这种假设下,目标散射中心模型与目标方位角无关。但是,由于每个距离单元的回波信号由此距离单元内所有散射中心的子回波信号经过相干叠加而成,所以随着目标的旋转,由于各散射中心回波信号相位的变化,将导致距离单元回波幅度产生剧烈的抖动,从而对目标检测与识别造成困难,因此,对距离单元幅度统计特性的研究尤为重要。本节中,将根据距离单元中散射中心不同的分布情况对距离单元进行分类,并研究其统计模型,相关的参数估计方法将在第 4 节给出。

#### (1) 瑞利分布模型

当距离单元中包含大量目标散射中心,而且这些散射中心的散射强度相当,则满足中心极限定理。假设散射中心子回波的初始相位为均匀分布,则根据中心极限定理,距离单元回波信号的同相与正交分量的幅度将服从均值为零的高斯分布,而距离单元回波信号的幅度将服从瑞利分布,其概率密度函数为

$$p_{\text{Rayleigh}}(x) = \begin{cases} \frac{2x}{\bar{x}} \exp\left(-\frac{x^2}{\bar{x}}\right) & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

其中  $\bar{x}$  表示距离单元幅度的平均值。严格意义上讲,上述分布只有当距离单元内散射点数量足够大

时才成立,但是通过实际测量结果发现,当距离单元内主散射点达到 10 个以上时,就可以使用瑞利分布对距离单元幅度的统计特性进行良好的拟合。

## (2) 赖斯分布模型

当距离单元中包含一个散射能量较强的散射中心和大量较弱的散射中心时,根据中心极限定理,距离单元回波信号的同相与正交分量将服从高斯分布,并且均值分别由强散射中心回波信号的同相与正交分量决定。因此,此类距离单元回波信号的幅度将服从赖斯分布模型,其概率密度函数为

$$p_{\text{Rice}}(x) = \begin{cases} \frac{1 + \alpha^2}{x} \exp\left[-\alpha^2 - \frac{x}{x}(1 + \alpha^2)\right] \\ \quad \times I_0\left[2\alpha\sqrt{\frac{(1 + \alpha^2)x}{x}}\right] & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (20)$$

上式中,  $\alpha^2$  为强散射中心强度与其他弱散射中心强度之和的比值,  $I_0(\cdot)$  为零阶修正贝塞尔函数,可表示为

$$I_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{x^2}{4}\right)^k \frac{1}{k! \Gamma(k+1)} \quad (21)$$

并且有

$$\Gamma(t) = \int_0^{\infty} \nu^{t-1} e^{-\nu} d\nu \quad (22)$$

## (3) Gamma 分布模型

瑞利分布模型和赖斯分布模型只有当距离单元包含许多具有相近散射能力的散射中心时才能发挥较好的拟合能力,但是,在太赫兹频段,随着距离分辨率的不断提高,距离单元中的散射中心数量随之减少,瑞利分布模型和赖斯分布模型对数据的拟合度逐渐降低。文献[24]提出使用 Gamma 模型替代上述两种模型,其概率密度函数可表示为

$$p_{\text{Gamma}}(x) = \begin{cases} \frac{m}{x\Gamma(m)} \left(\frac{mx}{x}\right)^{m-1} \exp\left(-\frac{mx}{x}\right) & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

其中  $m$  代表模型的阶数。实际上, Gamma 分布模型是一种双参数的可变模型,通过对参数值的改变, Gamma 分布模型可以对指数分布、高斯分布、瑞利分布以及赖斯分布进行良好的逼近,所以在对实测数据进行分析时,可以使用 Gamma 分布模型对其进行拟合。

## (4) 混合分布模型

如果距离单元中包含几个强散射中心和大量弱散射中心,并且强散射中心之间的方位向距离与雷达发射信号波长相比足够大,则距离单元幅度的概率密度函数将出现多个峰值,此时,则需要使用混合分布模型对其进行建模。这种模型与强散射中心在距离单元中的几何分布相关,比如,当距离单元包含两个强散射中心,它们的散射强度分别为  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ ,假设它们子回波的初始相位服从均匀分布,并且两者之间的方位向距离大于电磁波波长,那么在一个 HRRP 帧内,随着目标的匀速转动,距离单元回波信号幅度的概率密度函数将在  $\sigma_1 + \sigma_2$  和  $|\sigma_1 - \sigma_2|$  的位置上出现两个峰值,而此时,瑞利分布模型和赖斯分布模型都不能对此类距离单元回波幅度的概率密度函数进行拟合。事实上,在太赫兹高分辨率雷达的目标回波数据中,有许多距离单元回波幅度都只能使用混合分布模型进行建模。

混合分布模型没有唯一的表达式,此类模型将随着距离单元分布的变化而自适应的对其进行拟合。文献[32]提出了 DSEM 算法对混合分布模型的参数进行估计,这种算法结合了随机最大期望 (Stochastic Expectation-Maximization, SEM) 迭代法和 MoLC 方法,可以对 SAR 图像的幅度统计特性进行准确的参数估计。在本文中,将使用这种方法对太赫兹频段下目标 HRRP 的统计模型参数进行估计。

## 4 参数估计方法

### 4.1 MoLC 参数估计方法<sup>[25]</sup>

2002 年, Nicolas 针对定义在  $[0, +\infty)$  上的统计模型提出了 MoLC 参数估计方法,并在之后被广泛应用于 SAR 图像幅度数据的统计特性分析中。MoLC 利用 Mellin 变换代替了传统矩估计方法中的傅里叶变换和拉普拉斯变换,从而计算给定统计模型中对应参数的对数矩 (log-moments) 和对数积累量 (log-cumulants)。对于给定的随机变量  $x$  和概率密度函数  $p(x)$ , 定义其第二类第一特征函数  $\phi(s)$  为  $p(x)$  的 Mellin 变换,可表示为

$$\phi(s) = \mathcal{M}[p(x); s] = \int_0^{+\infty} p(x) x^{s-1} dx \quad (24)$$

特别的,对于定义在  $[0, +\infty)$  上的概率密度函数,当  $s=1$  时,有

$$\phi(s)|_{s=1} = \int_0^{+\infty} p(x) dx = 1 \quad (25)$$

另外,定义第  $\nu$  阶二类矩  $\tilde{m}_\nu$  为

$$\tilde{m}_\nu = \left. \frac{d^\nu \phi(s)}{ds^\nu} \right|_{s=1} \quad (26)$$

由 Mellin 变换的基本性质

$$\mathcal{M}[f(u)(\log u)^v : s] = \frac{d^v \mathcal{M}[f(u) : s]}{ds^v} \quad (27)$$

$\tilde{m}_v$  可以表示为

$$\tilde{m}_v = \left. \frac{d^v \phi(s)}{ds^v} \right|_{s=1} = \int_0^{+\infty} (\log x)^v p(x) dx \quad (28)$$

由于  $\tilde{m}_v$  由变量  $x$  的对数计算得到, 所以也被称为对数矩(log-moment)。与传统统计理论中对于第二特征函数的定义相似的, 可以定义第二类第二特征函数  $\varphi(s)$  为

$$\varphi(s) = \log[\phi(s)] \quad (29)$$

从而可以得到第  $n$  阶二类积累量定义如下

$$\tilde{\kappa}_n = \left. \frac{d^n \varphi(s)}{ds^n} \right|_{s=1} \quad (30)$$

同样的,  $\tilde{\kappa}_n$  也被称为对数积累量(log-cumulants)。对数矩与对数积累量的关系与传统统计理论中矩和积累量的关系一致, 对于前三阶的对数积累量, 有

$$\begin{aligned} \tilde{\kappa}_1 &= \tilde{m}_1 \\ \tilde{\kappa}_2 &= \tilde{m}_2 - \tilde{m}_1^2 \\ \tilde{\kappa}_3 &= \tilde{m}_3 - 3\tilde{m}_1\tilde{m}_2 + 2\tilde{m}_1^3 \end{aligned} \quad (31)$$

#### 4.2 DSEM 参数估计方法<sup>[32]</sup>

虽然使用 4.1 节介绍的 MoLC 方法可以方便的对瑞利分布模型、赖斯分布模型以及 Gamma 分布模型的参数进行估计, 但是由于混合分布模型存在多个峰值, MoLC 将不再适用。Gabriele Moser 等针对这个问题提出了使用 DSEM 方法对 SAR 图像幅度概率密度函数的参数进行估计。首先, 将混合模型表示成多个模型的和, 即

$$p(x; \Theta) = \sum_{i=1}^K \alpha_i p_i(x; \theta_i) \quad (32)$$

上式表示, 混合分布模型  $p(x; \Theta)$  由  $K$  个分布组成, 其中,  $p_i(x; \theta_i)$  为混合分布模型中第  $i$  个分布的概率密度函数,  $\theta_i = [\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{in_i}]$  为其参数空间,  $\alpha_i$  为第  $i$  个分布所对应的权值, 并且有

$$\sum_{i=1}^K \alpha_i = 1, \quad 0 \leq \alpha_i \leq 1 \quad (33)$$

$\Theta$  为混合模型的参数空间, 可以表示成

$$\Theta = \left\{ (\alpha_i, \theta_i) \mid \sum_{i=1}^K \alpha_i = 1, \theta_i \in \mathcal{R}^{n_i}, 0 \leq \alpha_i \leq 1 \right\} \quad (34)$$

每一个分量  $p_i(x; \theta_i)$  都可以从一个有限的字典集合  $\mathcal{D} = \{f_1, f_2, \dots, f_L\}$  中查找得到, 字典中的每一项  $f_j(x; \xi_j)$  都是由参数向量为  $\xi_j \in \mathcal{R}^{n_j}$  确定的待查统计模型的概率密度函数。DSEM 算法的目的在于自适

应的对混合分布模型分量总数  $K$  进行优化, 在拟合度最高的前提下, 尽可能的减少模型分量的数量, 并且从字典中选取对应的模型, 利用数据估计模型中的参数, 并最终得到混合分布模型的表达式。

使用 DSEM 方法估计模型参数的过程中, 将使用多次迭代的方法。在每一次迭代过程中, 对每一个  $K=1, 2, \dots, K_{\max}$ , 估计由  $K$  个分量组成的混合分布模型的参数。这一过程中将针对每个分量生成多个待选模型, 之后利用极大似然准则选取最优的结果作为混合分布模型的概率密度函数。同时, 为了缩短计算时间, 将使用基于直方图的计算方法, 即在 DSEM 的每一步迭代过程中, 利用距离单元幅度的直方图  $h(z)$  作为估计数据。令  $p_i^t(z)$  和  $p^t(z)$  为第  $t$  步迭代过程中的分量概率密度函数和混合分布模型概率密度函数, DSEM 方法可归纳为以下步骤:

(1) E-step: 对于距离单元  $m=1, 2, \dots, M$  以及每个分量概率密度函数  $i=1, 2, \dots, K$ , 计算其与当前混合分布模型概率密度函数的后验概率, 即

$$\mu_i^t = \frac{\alpha_i^t p_i^t(z)}{p^t(z)}, \quad p^t(z) = \sum_{i=1}^K \alpha_i^t p_i^t(z) \quad (35)$$

(2) S-step: 根据计算得到的后验概率, 对不同的幅度值区间进行采样得到样本  $s^t(z)$ 。

(3) MoLC-step: 通过 4.1 节所描述的 MoLC 方法, 利用样本  $s^t(z)$  对字典集合  $\mathcal{D}$  中各模型的参数以及其对应的权值进行估计, 如式(37)所示。其中  $Q_i^t = \{z \mid s^t(z)\}$  为第  $i$  个分量的样本数据。

(4) Model Selection-step: 对于混合分布模型中的第  $i$  个分量, 计算其模型  $f_j(z; \xi_{ij}^t)$  与对应数据的对数似然函数, 如式(36)所示, 并令  $p_i^{t+1}(z)$  为使得  $L_{ij}^t$  最大的模型。

$$L_{ij}^t = \sum_{z \in Q_i^t} h(z) \ln f_j(z; \xi_{ij}^t) \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \kappa_{1i}^t &= \frac{\sum_{z \in Q_i^t} h(z) \ln z}{\sum_{z \in Q_i^t} h(z)}, \quad \kappa_{2i}^t = \frac{\sum_{z \in Q_i^t} h(z) (\ln z - \kappa_{1i}^t)^2}{\sum_{z \in Q_i^t} h(z)}, \\ \kappa_{3i}^t &= \frac{\sum_{z \in Q_i^t} h(z) (\ln z - \kappa_{1i}^t)^3}{\sum_{z \in Q_i^t} h(z)}, \quad \alpha_i^{t+1} = \frac{\sum_{z \in Q_i^t} h(z)}{\sum_z h(z)} \end{aligned} \quad (37)$$

上述迭代过程的初始步骤中, 可将待估计的数据以相同的概率  $1/K$  分配到初始混合模型的  $K$  个分量中。这相当于对所有距离单元设定了均匀的后验概率分布, 并在 S-step 中使用这一分布选取样本。

每一步迭代过程中都将产生一个与当前迭代

次数对应的混合分布模型,此时需要选取其中对实测数据拟合最优的模型。所以,在每次迭代结束之后,将计算所得到的混合分布模型  $p'(z)$  与实测数据的对数似然函数,即

$$L'_E = \sum_{i=1}^N \ln p'[e_m(t_i)] = \sum_Z h(z) \ln p'(z) \quad (38)$$

并选取最大  $L'_E$  对应的混合模型作为实测数据的分布结果。下表所示为字典集中所使用模型的 MoLC 方程。

表 1 字典集中所使用模型 MoLC 方程

Tab.1 MoLC equations for all the parametric families included in the adopted dictionary

统计模型	MoLC 方程
Gamma 模型	$2\kappa_1 = \Phi(0, L) + \ln \mu - \ln L$ $4\kappa_2 = \Phi(1, L)$
对数正态模型	$\kappa_1 = \mu$ $\kappa_2 = \sigma^2$
韦布尔模型	$\kappa_1 = \ln \mu + \Phi(1) \eta^{-1}$ $\kappa_2 = \Phi(1, 1) \eta^{-2}$
Nakagami 模型	$2\kappa_1 = \ln \mu + \Phi(L) - \ln L$ $4\kappa_2 = \Phi(1, L)$
K 分布模型	$2\kappa_1 = \ln \mu + \Phi(L) - \ln L + \Phi(M) - \ln M$ $2\kappa_2 = \Phi(1, L) + \Phi(1, M)$ $8\kappa_3 = \Phi(2, L) + \Phi(2, M)$

表 1 中  $\Phi(\cdot)$  为 DiGamma 函数,  $\Phi(\nu, \cdot)$  为第  $\nu$  阶 PolyGamma 函数, 分别表示为

$$\Phi(x) = \frac{d \ln[\Gamma(x)]}{dx} = \frac{d\Gamma(x)/dx}{\Gamma(x)} \quad (39)$$

$$\Phi(\nu, x) = \frac{d^\nu \Phi(x)}{dx^\nu} = \frac{d^{\nu+1} \ln[\Gamma(x)]}{dx^{\nu+1}} \quad (40)$$

## 5 实验与讨论

### 5.1 太赫兹高分辨率雷达系统

本节中,将使用电子科大研制的室温全固态高分辨率太赫兹雷达系统采集目标 HRRP<sup>[20]</sup>。本系统工作频率为 340 GHz, 带宽为 7.2 GHz。同时,通过可现场编程的 FPGA 模块,系统的分辨率可进行调节,最高可达 28.8 GHz。

系统利用去调频技术实现对太赫兹宽带信号的接收。电磁波经目标散射之后,散射电磁波经接收天线进入分谐波混频器,并与本振信号混频生成

差频信号。差频信号随后通过 I/Q 解调器解调形成基带信号,最终通过模数转换得到数字信号并进入上位机进行处理。

理想条件下,发射信号的调频斜率在脉冲周期内保持不变,发射信号的线性度极高。但是由于受到倍频器和功率放大器性能的限制,虽然扫频源产生的信号具有极高的扫频线性度,在通过多次倍频和功率放大之后,太赫兹频段信号的线性度将受到影响,从而导致系统的分辨率降低,影响系统的探测性能。为了解决这一问题,本文将使用点目标的回波信号作为参考信号对待测目标信号进行校正。图 1 所示为校正前后的角反射器回波 HRRP,发射信号带宽为 28.8 GHz,实验中的系统参数如表 2 所示,其中  $f_c$ 、 $B_r$ 、 $T_r$ 、PRF、 $\rho_r$  和  $f_s$  分别表示发射信号载频、带宽、脉冲宽度、脉冲重复频率、距离向分辨率以及距离向采样频率,其中距离向分辨率可表示为

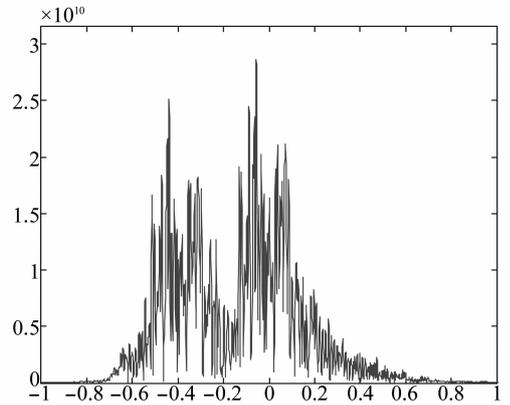
$$\rho_r = \frac{c}{2B_r} \quad (41)$$

其中  $c$  为电磁波的传播速度。

表 2 太赫兹高分辨率雷达系统参数

Tab.2 The parameters of high resolution THz radar system

参数	值
$f_c$	340 GHz
$B_r$	4.8 GHz, 10.08 GHz, 28.8 GHz
$T_r$	300 $\mu$ s
PRF	1000 Hz
$\rho_r$	3.13 cm, 1.49 cm, 0.52 cm
$f_s$	1.5625 MHz



(a) HRRP before compensation

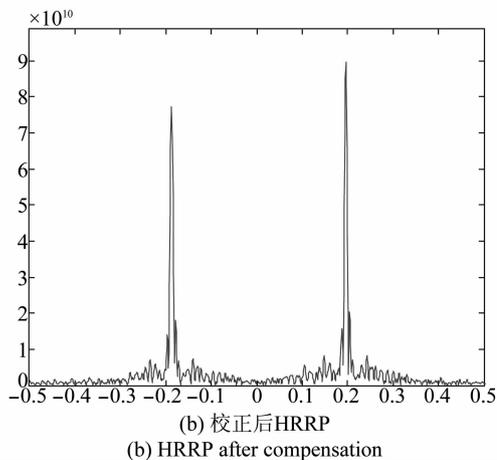


图1 非线性度校正前后角反射器 HRRP

Fig. 1 Target HRRP before and after nonlinearity compensation

从上图可以看到,在校正之前,由于发射信号非线性度的影响,角反射器在 HRRP 中占据了相当的宽度,导致两个角反射器的主瓣相互混叠在一起,无法准确的确定它们在场景中的位置和相对距离。而在经过校正之后,角反射器的主瓣变窄,不同目标在 HRRP 中相互分离,从而可以对它们进行良好的分辨。上述实验证明,使用角反射器作为参考信号对回波进行校正可以达到抑制发射信号非线性度的目的。

## 5.2 目标方位角敏感性分析

为了研究太赫兹频段复杂目标方位角敏感性,本文将使用空客 A380 的等比例模型进行实验,如图 2 所示,太赫兹波从机头方向入射,目标在距离向长度为 0.448 m,方位向宽度为 0.486 m,雷达与目标相距 3.2 m,在实验中,为了避免其他回波的影响,将目标放置于圆柱形泡沫上,泡沫的 RCS 远远小于目标 RCS,实验中可忽略不计。



图2 空客 A380 等比例模型

Fig. 2 The photograph of Airbus A380 scaled model

首先,通过雷达获取了不同带宽下静止目标的 HRRP,如图 3 所示。由于使用了 5.1 节所描述的方法对回波信号进行校正,并且作为参考信号的角反射器放置于目标场景中心位置,所以图 3 中目标 HRRP 的横轴中心为零。同时,通过去调频接收之后,差频信号的相位仅与目标和雷达的距离有关,因此,图 3 中横轴表示目标上散射中心与参考信号目标在雷达视线方向上的距离差。

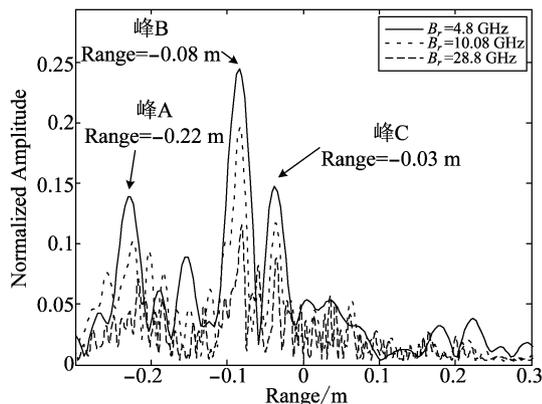


图3 不同带宽下静止目标 HRRP

Fig. 3 The HRRP of stationary target with different bandwidth

图 3 中,红色实线、绿色点线和蓝色虚线分别表示带宽为 4.8 GHz、10.08 GHz 以及 28.8 GHz 下的目标 HRRP,通过红色实线所代表的目标 HRRP 可以看到,目标在距离向上的主散射中心为机头和四个引擎。在距离向上,1 号引擎和 4 号引擎距离相近,2 号引擎和 3 号引擎较为相近,并且机头到 2 号和 3 号引擎的距离为 0.14 m,到 1 号和 4 号引擎距离为 0.19 m。在图 3 中,峰 A 和峰 B 相距 0.14 m,峰 B 和峰 C 相距 0.05 m,因此可以推断峰 A 为机头所占据的距离单元,而峰 B 和峰 C 分别为 2 号与 3 号引擎、1 号与 4 号引擎占据的距离单元。由于遮挡效应,飞机尾部的平衡尾翼和垂直尾翼的回波信号在 HRRP 中不可见。

另外,通过对比不同带宽下目标的 HRRP 不难发现,随着发射信号带宽的提高,目标 HRRP 中各峰值的能量均会下降。这是由于发射带宽的增加将导致雷达距离向分辨率的提高,单个距离单元的宽度变窄,而更窄的距离单元所包含的散射中心数量也更少,从而导致距离单元中总回波能量变低,峰值变小。同时,由于距离单元数量的增加,在低带宽条件下拥有较高回波能量的距离单元被分割为多个回波能量较小的距离单元,而目标的总回波能量并没有随着带宽的变化而发生改变。

为了分析目标方位角敏感性,实验中将目标放置于高精度转台上,雷达对目标进行照射的同时,转台进行匀速转动,从而可以获得目标在不同方位角度下的回波。实验中转动角速度设定为  $1^\circ/\text{s}$ ,观测时间为  $4.2\text{ s}$ ,通过表 2 中雷达系统参数可知,在观测时间内总共将产生 4200 个脉冲。

图 4 所示为不同带宽条件下相邻脉冲 HRRP 间的相关系数,其中红色实线、绿色点线以及蓝色虚线分别代表带宽为  $4.8\text{ GHz}$ 、 $10.08\text{ GHz}$  和  $28.8\text{ GHz}$  时相邻脉冲 HRRP 间的相关系数。

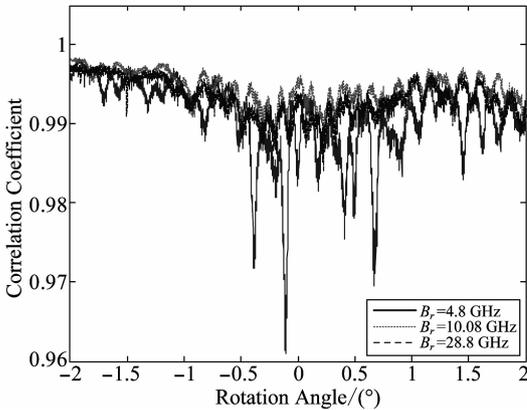


图 4 相邻脉冲 HRRP 间的相关系数

Fig.4 The correlation coefficients of neighbor HRRPs

从图中可以看到,三个带宽条件下相邻脉冲 HRRP 间的相关系数均大于 0.96,这是由于脉冲间时间相隔较短,仅为  $0.001\text{ s}$ ,两次照射中目标方位角变化仅为  $0.001^\circ$ ,目标上大部分散射中心与雷达间的距离均未发生明显变化,目标 HRRP 基本不变,所以两次相邻脉冲的 HRRP 相关系数较高。另外,当带宽为  $10.08\text{ GHz}$  和  $28.8\text{ GHz}$  时,相关系数曲线比带宽为  $4.8\text{ GHz}$  时更为稳定,这是由 HRRP 中每个距离单元中所包含的散射中心数量决定的。如前所述,随着带宽的增加,距离单元中散射中心的数量随之减少,同时单个距离单元中的散射中心模型也随之变得更加简单。而由于距离单元的回波由其中各散射中心子回波相干叠加而成,所以包含散射中心数量较多的距离单元的回波幅度将会出现更明显的抖动,相反的,距离单元中散射中心数量的减少将使得不同方位角下回波的相位差更小,于是不同方位角下距离单元回波幅度将更加稳定,从而导致相邻脉冲 HRRP 间的相关系数更高,抖动更小。

图 5 所示为第一个脉冲 HRRP 与观测时间内其他脉冲 HRRP 的相关系数,观测时间内目标总转动角

度为  $4.2^\circ$ ,在不同带宽条件下,相关系数下降的幅度也不同。从图 5 中可以看到,当信号带宽为  $4.8\text{ GHz}$  时,目标的 HRRP 在整个观测过程中首个脉冲 HRRP 与其他脉冲 HRRP 的相关系数均保持在 0.6 以上,当目标旋转了  $2^\circ$  之后,此时的 HRRP 与首个脉冲 HRRP 的相关系数为 0.8 左右,而在信号带宽为  $10.08\text{ GHz}$  和  $28.8\text{ GHz}$  的情况下,此时的相关系数已经分别下降至 0.7 和 0.6 左右。在转动角度为  $4^\circ$  时这一现象更加明显,带宽为  $4.8\text{ GHz}$  的 HRRP 与首个 HRRP 的相关系数仍可达到 0.85 左右,而信号带宽为  $10.08\text{ GHz}$  和  $28.8\text{ GHz}$  的 HRRP 与首个脉冲的 HRRP 已经分别下降至 0.75 和 0.55 左右。

产生上述现象的主要原因是不同信号带宽所对应 HRRP 帧的角度不同。从式(2)可以看到,散射中心不发生距离单元徙动的最大角度  $\Delta\phi_{\text{MTRC}}$  与信号带宽相关,当信号带宽为  $4.8\text{ GHz}$ 、 $10.08\text{ GHz}$  以及  $28.8\text{ GHz}$  时,空客 A380 模型目标所对应的  $\Delta\phi_{\text{MTRC}}$  分别为  $3.68^\circ$ 、 $1.75^\circ$  和  $0.61^\circ$ 。而在实验中,对于不同的信号带宽,均使目标旋转了  $4.2^\circ$ ,这对于带宽为  $4.8\text{ GHz}$  条件下的目标可以使得其主散射点在整个观测过程中不发生距离徙动,而对于带宽为  $10.08\text{ GHz}$  和  $28.8\text{ GHz}$  的情况,这个角度将远大于其所对应的  $\Delta\phi_{\text{MTRC}}$ 。因此,对于后两种信号带宽下得到的 HRRP,由于目标上的散射中心发生了剧烈的距离徙动,所以首个 HRRP 与其他 HRRP,尤其是与观测过程中的后期 HRRP 间的相关系数快速降低。特别的,对于带宽为  $28.8\text{ GHz}$  的情况,转动角度从  $2^\circ$  到  $4^\circ$  之间的平均相关系数仅为 0.6,说明此时目标的 HRRP 与首个 HRRP 之间相关性较低。

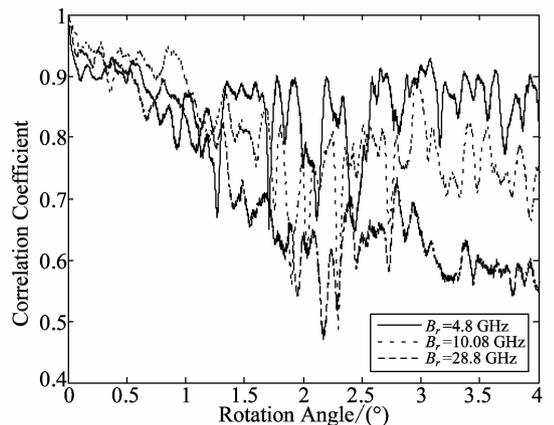


图 5 首个脉冲 HRRP 与其他脉冲 HRRP 的相关系数

Fig.5 The correlation coefficients of the first HRRP with other HRRPs

在基于模板的雷达目标识别研究中,模板的选择会对目标识别结果造成很大的影响,上述分析说明,在大带宽情况下,单个 HRRP 由于与其他 HRRP 的相关性较差,不能作为目标识别中的模板。另一方面,目标的平均 HRRP 由于包含了多个方位角度上目标 HRRP 的信息,所以在基于模板的雷达目标识别中被广泛使用。目标平均 HRRP 与观测时间内目标 HRRP 的相关系数如图 6 所示,其中图 6(a)所示为使用 2.3 节介绍的主特征向量法提取的目标平均 HRRP,与图 3 类似的,目标上的主散射中心为机头和引擎,它们的回波在图 6(a)中也可以清晰的看到,并且目标的平均 HRRP 与静止目标 HRRP 拥有相同的性质,即:随着信号带宽的增加,HRRP 中距离单元的回波信号幅度随之减弱。

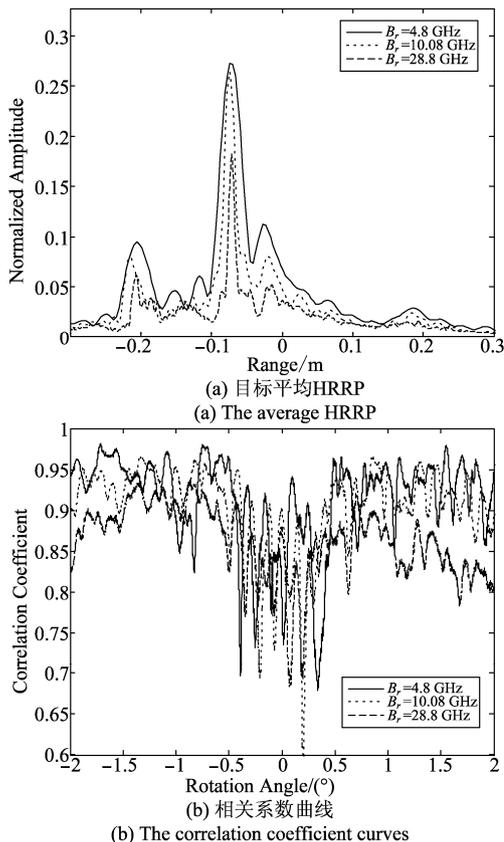


图 6 平均 HRRP 及其与其他 HRRP 的相关系数  
Fig. 6 The average HRRP and its correlation coefficients with other HRRPs

图 6(b)所示为平均 HRRP 与其他 HRRP 的相关系数曲线,从图中可以看到,当目标旋转角度在  $0^\circ$  附近时相关系数较低,其原因在于,平均 HRRP 与  $0^\circ$  HRRP 的幅度类似,但是相位上差距较大,这是由于平均 HRRP 中包含了整个观测时间内所有 HRRP 的相位与幅

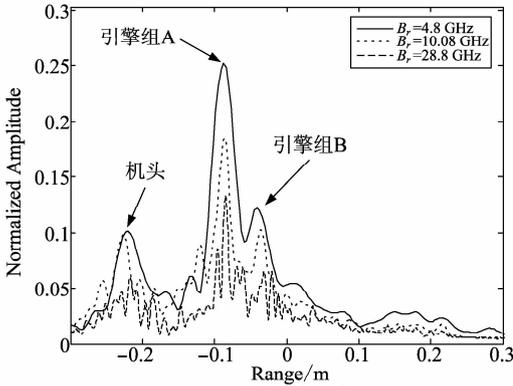
度信息,而根据式(10),HRRP 间的相关系数不仅仅与 HRRP 的幅度有关,其相位也会对相关系数产生关键的影响,而  $0^\circ$  附近 HRRP 中各距离单元的相位与其他 HRRP 相比,在整个观测过程中占比较少,所以平均 HRRP 与  $0^\circ$  附近 HRRP 的相关系数较低。

同时,从图 6(b)中可以明显看到当信号带宽为 4.8 GHz 时,相关系数普遍较高,而当信号带宽为 28.8 GHz 时相关系数最低。这一现象同样可以利用带宽和  $\Delta\phi_{\text{MTRC}}$  的关系进行解释:当带宽为 4.8 GHz 时,观测时间内目标的旋转角度与带宽对应的  $\Delta\phi_{\text{MTRC}}$  相当,所以可以认为目标的散射中心模型在整个观测过程中保持不变,由此导致了平均 HRRP 和其他 HRRP 之间有较高的相关系数。而对于 28.8 GHz 的信号带宽,由于目标的转动角度远大于其所对应的  $\Delta\phi_{\text{MTRC}}$ ,在观测过程中目标散射中心模型变化剧烈,对其进行平均 HRRP 提取时将包含大量相关度较低 HRRP,因此导致其平均 HRRP 与其他 HRRP 的相关系数较低。不过,通过对比图 5 和图 6(b)不难看出,在整个观测过程中,目标平均 HRRP 与其他 HRRP 的相关系数均保持在 0.75 以上,和单个 HRRP 相比,平均 HRRP 更适合于作为模板对目标进行识别。

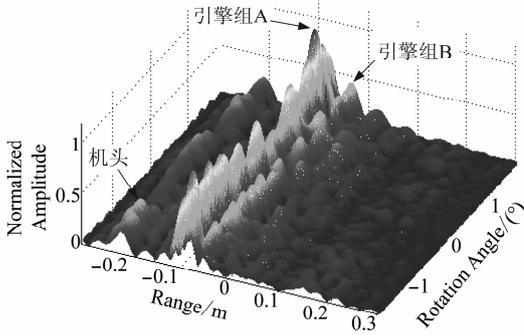
### 5.3 目标 HRRP 统计特性分析

对目标 HRRP 统计特性的分析需要足够的未发生散射中心距离徙动的数据,5.2 节中使用的 HRRP 数据无法满足这一条件,需要重新设计实验,而对于不同的信号带宽,由于雷达系统的 PRF 不变、 $\Delta\phi_{\text{MTRC}}$  不同,若要获得相同数量的 HRRP,需要在实验过程中设定不同的转速。对于 4.8 GHz、10.08 GHz 以及 28.8 GHz 的信号带宽,分别设定转台转动角速度为  $1^\circ/\text{s}$ 、 $0.4762^\circ/\text{s}$  和  $0.1667^\circ/\text{s}$ ,对于不同的信号带宽,观测时间均为 3.684 s,器件将产生 3684 个脉冲,目标的旋转角度分别为  $3.684^\circ$ 、 $1.7543^\circ$  和  $0.614^\circ$ 。由于信号带宽为 4.8 GHz、10.08 GHz 以及 28.8 GHz 时,空客 A380 模型目标所对应的  $\Delta\phi_{\text{MTRC}}$  分别为  $3.68^\circ$ 、 $1.75^\circ$  和  $0.61^\circ$ ,因此可以认为在整个观测过程中目标上的散射中心未发生距离徙动,所得到的数据满足目标 HRRP 统计特性分析的条件。

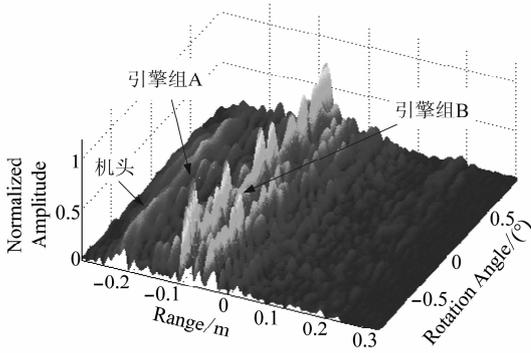
图 7 所示为不同带宽下的目标 HRRP 帧与平均 HRRP。从图 7(b)(c)(d)中可以看到,引擎组 A(2 号与 3 号引擎)、引擎组 B(1 号与 4 号引擎)以及机头作为飞机的主散射中心,在观测过程中均保持在同一个距离单元中,未发生距离徙动,随着带宽的增加,距离单元在 HRRP 中越来越小,对应的峰值也越来越窄。



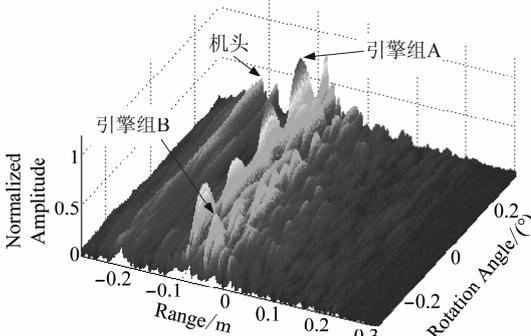
(a) Average HRRPs with different bandwidth



(b) HRRP frame with bandwidth of 4.8 GHz



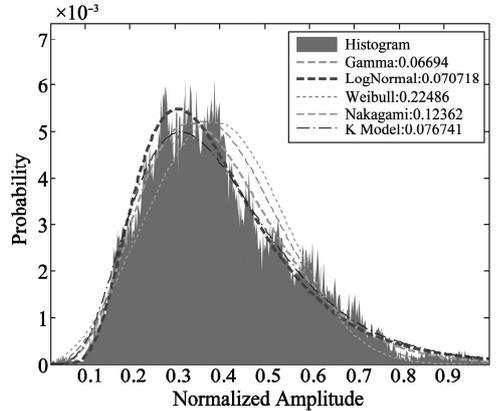
(c) HRRP frame with bandwidth of 10.08 GHz



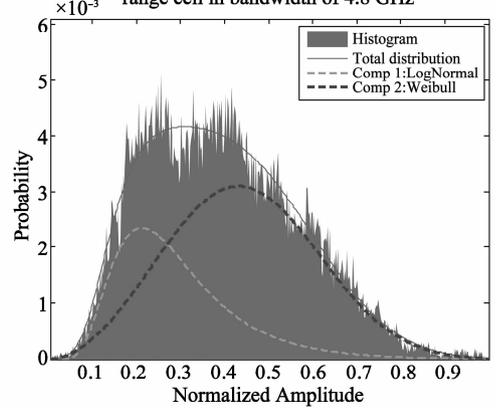
(d) HRRP frame with bandwidth of 28.8 GHz

图 7 目标平均 HRRPs 以及 HRRP 帧

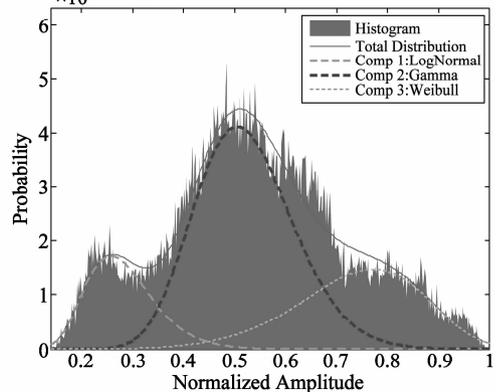
Fig. 7 The average HRRPs and HRRP frames



(a) The histogram and MoLC estimation results of interested range cell in bandwidth of 4.8 GHz



(b) The histogram and DSEM estimation results of interested range cell in bandwidth of 10.08 GHz



(c) The histogram and DSEM estimation results of interested range cell in bandwidth of 28.8 GHz

图 8 不同带宽下距离单元幅度直方图与模型拟合结果  
Fig. 8 The distribution and estimation of interested range cell with different bandwidth

图 8 所示为引擎组 A 所占据的距离单元回波幅度的概率密度分布,图 8(a)中,4.8 GHz 带宽下距离单元回波幅度的统计特性可以用单峰模型描述,所以可以使用 MoLC 方法估计其参数,并使用 KL 散度测量不同模型估计结果与实测数据直方图

的拟合度。如图 8(a) 所示,使用 Gamma 分布模型估计得到的结果与实测数据的 KL 散度为 0.06694,在所有模型中为最小,拟合度最高,所以可以认为在该距离单元的分布服从 Gamma 分布模型。实际上,此距离单元中不仅仅包含了引擎组 A 的回波,还包含了其他强散射中心,如机翼的前边缘、飞机腹部的支架结构以及机翼根部的转角结构,当距离单元包含这些强散射中心时,其回波可用瑞利分布建模,如第 3 节中描述的那样,瑞利分布模型可用 Gamma 分布模型逼近,所以此处 Gamma 分布模型的拟合度最高。

随着带宽的增加,距离单元的分布变得更加复杂,如图 8(b)(c) 所示。当信号带宽为 10.08 GHz 时,对距离单元回波贡献最大的为 2 号与 3 号引擎,如第 3 节中描述的,当距离单元中包含两个主散射中心时,其幅度的概率密度函数将出现双峰的情况,所以此处使用 DSEM 方法对其概率密度函数的参数进行提取,最终得到当信号带宽为 10.08 GHz 时,距离单元的幅度直方图的概率密度函数由对数正态分布与威布尔分布模型组成。而当带宽达到 28.8 GHz 时,距离单元中的主散射中心仍为 2 号与 3 号引擎,但是,此时的距离分辨率已经足够高,使得引擎的细部结构与内部结构回波也会对距离单元的总回波产生明显的影响,因此,直方图呈现出三峰分布的形式,而通过 DSEM 方法进行分析后发现其可以用对数正态分布、Gamma 分布以及威布尔分布模型的和进行建模,如图 8(c) 所示。

## 6 结论

本文通过太赫兹频段目标的确定性模型和统计模型对目标 HRRP 带宽敏感性、方位角敏感性以及距离单元的统计特性进行了分析,结果表明,平均 HRRP 在太赫兹频段依旧可以有效的抑制目标 HRRP 的方位角敏感性,同时,随着信号带宽的增加,距离单元的统计特性变得更为复杂,因此,使用了混合分布模型对太赫兹高分辨率雷达目标 HRRP 距离单元的幅度特性进行建模。

基于 HRRP 矩阵的主特征向量提取的平均 HRRP 拥有较高的稳定性,它与单个 HRRP 的高相关系数使其可以作为目标识别中的模板。另外,通过太赫兹频段目标 HRRP 的确定性模型,可以通过提取散射中心等技术完成对目标的识别与分类。

通过对载频为 0.34 THz 的高分辨率雷达目标 HRRP 统计特性的研究,完成了太赫兹频段目标建

模的首要任务,并且为基于广义似然比 (Generalized Likelihood Ratio Test, GLRT) 检测的研究奠定了基础。因此,将混合分布模型与 GLRT 检测进行结合将作为作者未来工作的重点。另外,当雷达工作频率达到十几甚至几十太赫兹时,还需要采用更多的实测数据对其统计模型进行研究与验证。

## 参考文献

- [1] Conte E, De Maio A, Ricci G. CFAR detection of distributed targets in non-Gaussian disturbance [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(2): 612-621.
- [2] Conte E, De Maio A, Ricci G. GLRT-based adaptive detection algorithms for range-spread targets [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(7): 1336-1348.
- [3] Shui P L, Xu S W, Liu H W. Range-Spread Target Detection using Consecutive HRRPs [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(1): 647-665.
- [4] Demissie B, Berge C R. High-resolution range-Doppler processing by coherent block-sparse estimation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(2): 843-857.
- [5] Guo Z H, Li S H. One-Dimensional Frequency-Domain Features for Aircraft Recognition from Radar Range Profiles [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(4): 1880-1892.
- [6] Zheng C D, Zhou D Y, Wang R. Radar high resolution range profiles analysis based on sparse decomposition [C] // IEEE International Workshop on Electromagnetics; Applications and Student Innovation, 2012: 1-3.
- [7] Pan X Y, Wang W, Feng D J, et al. Signature Extraction From Rotating Targets Based on a Fraction of HRRPs [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(2): 585-592.
- [8] Zhou D Y, Shen X F, Yang W L. Radar target recognition based on fuzzy optimal transformation using high-resolution range profile [J]. Pattern Recognition Letters, 2013, 34(3): 256-264.
- [9] Feng D J, Xu L T, Dai D H. Radar target recognition method based on physical-statistical model [C] // IEEE ICSPCC, 2012: 5-10.
- [10] Shaw A, Paul A, Williams R. Eigen-Template-Based HRR-ATR with Multi-Look and Time-Recursion [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(4): 2369-2385.
- [11] Wang J Q, Li Y H, Chen K. Radar high-resolution range profile recognition via geodesic weighted sparse representation [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2015, 9

- (1): 75-83.
- [12] Meta A, Hoogeboom P, Ligthart L. Signal Processing for FMCW SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3519-3532.
- [13] Zhao H P, Fu X J, Zhang Y J, et al. Three-dimensional ISAR imaging using high resolution range profiles[C]// IET International Radar Conference, 2013:1-6.
- [14] Zhang B, Pi Y M, Min R. A Near-Field 3D Circular SAR Imaging Technique Based on Spherical Wave Decomposition[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 141: 327-346.
- [15] Wang R J, Deng B, Qin Y L, et al. Bistatic Terahertz Radar Azimuth-Elevation Imaging Based on Compressed Sensing[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014, 4(6): 702-713.
- [16] Bardak C, Yanhan Z, Bernussi A, et al. Terahertz Imaging With a Time-Reversed Finite Difference Time-Domain Method[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014, 4(2): 240-246.
- [17] Berry W, Wang N, Hashemi M R, et al. Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes[J]. Nature Commun., 2013, 4: 1622.
- [18] Huang S W, Granados E, Huang W Q, et al. High conversion efficiency, high energy terahertz pulses by optical rectification in cryogenically cooled lithium niobate[J]. Opt. Lett., 2013, 38(5): 796-798.
- [19] Turcinkva D, Otani K, Scalari G, et al. High power terahertz quantum cascade laser at 63  $\mu\text{m}$ [C]// IRMMW-THz, 2013:1-3.
- [20] Zhang B, Pi Y M, Li J. Terahertz Imaging Radar With Inverse Aperture Synthesis Techniques; System Structure, Signal Processing, and Experiment Results[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(1): 290-299.
- [21] Li H J, Wang Y D, Wang L H. Matching score properties between range profiles of high-resolution radar targets[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(4): 444-452.
- [22] Williams R, Westerkamp J, Gross D, et al. Automatic target recognition of time critical moving targets 1D high range resolution (HRR) radar[J]. IEEE Aerospace Electronic Systems Magazine, 2000, 15(4): 37-43.
- [23] Xing M D, Bao Z. The properties of range profile of aircraft[C]// CIE International Conference on Radar, Proceedings, 2001:1050-1054.
- [24] Du L, Liu H W, Bao Z, et al. A two-distribution compounded statistical model for Radar HRRP target recognition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(6): 2226-2238.
- [25] Jeam-Marie N. Introduction to second kind statistics; Application of log-moments and log-cumulants to analysis of radar images[J]. Traitement du Signal, 2002, 19(3): 139-167.
- [26] Li H C, Hong W, Wu Y R, et al. On the Empirical-Statistical Modeling of SAR Images With Generalized Gamma Distribution[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(3): 386-397.
- [27] Walter C, Ron G, Ron M, et al. Spotlight Synthetic Aperture Radar-Signal Processing Algorithms[M]. Norwood, MA: Artech House, 1995:21-32.
- [28] Donald W. High resolution radar[M]. 2<sup>nd</sup> edition. Norwood, MA: Artech House, 1995:57-65.
- [29] Yu Y, Li J, Min R. A Scattering Model Based on GTD in Terahertz Band[C]// The Proceedings of the Second International Conference on Communications, Signal Processing, and Systems, 2014:879-886.
- [30] Li H J, Yang S H. Using range profiles as feature vectors to identify aerospace objects[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(3): 261-268.
- [31] Li H J, Chiou V. Aerospace target identification-Comparison between the matching score approach and the neural network approach[J]. J. Electromagn. Waves Appl. , 1993, 7(6): 873-893.
- [32] Moser G, Zerubia J, Serpico B. Dictionary-based stochastic expectation-maximization for SAR amplitude probability density function estimation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(1): 188-200.

### 作者简介



喻 洋 男,1985 年生,四川成都人。电子科技大学电子工程学院在读博士。研究方向为太赫兹雷达信号处理。  
E-mail: ocean\_uestc@163.com



皮亦鸣 男,1968 年生,贵州人,现为电子科技大学电子工程学院教授,博士生导师。主要研究方向为雷达信号处理、图像传输与处理和导航定位新技术等。  
E-mail: ympi@ uestc. edu. cn