2023年11月

文章编号: 2095-4980(2023)11-1324-09

# 宽带聚合雷达稀疏频率配置及距离估计

张 慧,马 莎,万 蕾,宋思达

(北京华为数字技术有限公司,北京 100095)

摘 要: 雷达高距离分辨力需要大带宽发射信号,而雷达发射连续大带宽信号受硬件成本和 频谱资源限制。利用多个窄带发射信号进行宽带合成时,由于窄带信号频谱不连续性和步进量的 增大,会出现距离旁瓣增大、不模糊距离范围缩小的问题。为解决上述问题,并充分利用不连续 或跨波段的频谱资源,提出一种用于宽带聚合的雷达稀疏频率配置方式。通过子频带之间的差分 处理,获得等效的连续均匀步进虚拟频率信号,在获得高分辨力的同时避免距离旁瓣增大和距离 模糊;对于频率跨度较大的子频带,提出了基于几何绕射理论(GTD)模型的目标散射特性频率一致 性校正方法,并仿真分析了不同频率跨度对宽带聚合效果的影响和跨波段宽带聚合的可能性。该 研究可进一步为雷达系统的后续兼容研究提供参考。

# Sparse frequency allocation and range estimation for wideband aggregation radar

ZHANG Hui, MA Sha, WAN Lei, SONG Sida (Beijing Huawei Digital Technologies Co., Ltd., Beijing 100095, China)

**Abstract:** High range resolution of radar requires wideband transmitted signals, but the radar transmission of continuous wideband signal is limited by hardware cost and available spectrum resources. When multiple narrow-band signals are used for wideband aggregation, the range side-lobes will increase and the unambiguity range will decrease as the spectral discontinuity and step size of the narrowband signals increase. In order to solve the above problems, a new sparse frequency configuration is proposed, which can obtain equivalent continuous uniform stepped frequency signals through differential processing between sub-bands. Moreover, to make full use of the discontinuous sub-bands with large frequency span, the influence of frequency spans on target scattering characteristics is analyzed and a frequency consistency correction method based on Geometric Theory of Diffraction(GTD) model is proposed. The effects of different frequency spans on wideband aggregation are simulated and analyzed. The possibility of cross-band wideband aggregation is proved. The research of this paper can provide a reference for the backward compatibility of radar systems.

**Keywords:** sparse frequency; high resolution; range ambiguity; virtual frequency; target scattering characteristic; frequency span

雷达系统的距离分辨力由发射信号带宽决定,获得高距离分辨力需要大带宽的发射信号,但大带宽信号的 收发成本高,具有一定的硬件实现难度。同时,连续大带宽信号需要完整的连续频谱资源。在某些情况下,受 频谱资源发放政策的限制,大带宽连续频谱资源难以保证,实际可用的频率资源往往是不连续的、零散的。

为获得高距离分辨力,同时不增加硬件收发的成本,一种可行的解决方式是:发射多个窄带信号,通过合成处理获得等效大宽带信号的效果。多个窄带信号可以工作在时分模式或频分模式,时分模式如频率步进雷达或调频步进雷达<sup>[1]</sup>;频分模式如多载频雷达、频控阵(Frequency Diversity Array, FDA)雷达<sup>[2]</sup>。时分模式由于实现和处理简单而更为常用,以频率步进雷达和调频步进雷达为例,通过发射一串载频线性跳变的单脉冲或线性调

频信号(也称为 chirp 信号),并对混频后或脉冲压缩后的信号进行逆离散傅里叶变换(Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT)处理完成距离估计,从而通过N个窄带信号获得NΔf(Δf为频率步进量)的等效带宽。理论上,N和Δf越大,合成的带宽越大,但上述雷达需要N个脉冲才能得到一次距离估计结果。为提高数据率,需要降低N;同时,由于最大不模糊距离与频率步进量成反比,即Δf越大,不模糊距离范围越小。为保证一定的距离不模糊范围,Δf不能过大,一般情况下,频率步进量需小于单个窄带信号的带宽。为减少距离测量所需的时间和频谱资源,可考虑进一步将频率步进雷达或调频步进雷达的均匀频率步进信号进行稀疏化,但稀疏化需保证不同子脉冲间频率间隔的增大不会引入额外的距离模糊。

稀疏频率最早在高频(High Frequency, HF)波段(3~30 MHz)雷达中被提出<sup>[3]</sup>,由于该频段内存在大量用户,导 致可使用的连续频带极为有限,限制了雷达发射连续的大带宽信号。当频谱不连续时,会出现旁瓣增大的现象, 且频谱连续性越差,旁瓣抬升越严重<sup>[4]</sup>。另外,由于可用稀疏频率信号的随机性,一般采用基于压缩感知 (Compressed Sensing, CS)的信号处理方法<sup>[5-6]</sup>,但CS算法运算量大,鲁棒性差,不利于实时运算。

目前频率步进雷达、调频步进雷达或稀疏频率雷达所使用的多个子频带间的频率跨度均不大,即这些子频 带均在窄带假设范围内进行频带合成。实际中,受频谱分配政策的影响,可利用的不连续频谱资源的频率跨度 可能远超过窄带假设,如果可以利用跨波段的多个子带信号进行频带合成,则可以充分地利用频谱资源获得更 大的合成带宽和更高的距离分辨力,但此时必须考虑频率跨度较大时不同频率对目标散射特性的影响。

本文研究的目的在于提供一种稀疏频率配置方式,降低宽带聚合中距离测量所需的时间和频谱资源,在获 得等效大带宽高距离分辨力的同时降低距离模糊和距离旁瓣;同时,将用于频带聚合的稀疏频率范围扩展至窄 带假设之外,从而进一步扩大稀疏频率宽带聚合的适用范围。

### 1 稀疏频率配置及距离估计

图 1 为经典的步进频发射信号和调频步进频信号,发射信号频率步进量为 $\Delta f$ ,第 n个子频带的发射载频为 $f_n$ =  $f_1 + (n-1)\Delta f, n = 1, 2, ..., N$ 。二者均可通过窄带发射、窄带接收获得等效宽带处理结果。当频率步进量增大时,最 大不模糊距离减小。随机抽取一部分子频率成分,会导致距离旁瓣产生,影响目标检测效果。



图 2 为提出的稀疏频率配置方式,其中,发射的 N 个稀疏子频带分为 2 个均匀步进的子组。第 1 组均匀步进 频带集合中包含  $N_1$  个子频带,相邻子频带的频率间隔为  $\Delta f_1 = \Delta f$ ,每个子频带的载频(起始频率或中心频率)用  $f_1$ ,  $f_2, \dots, f_{N_1}$ 表示。第 2 组包含  $N_2$  个子频带,相邻子频带的频率间隔  $\Delta f_2 = (N_1+1)\Delta f$ ,每个子频带的载频用  $f_1, f_2, \dots, f_{N_2}$ 表示。

类似多人多出系统(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)雷达或阵列天线,对接收数据进行差分运算能够获得虚拟差分频率,产生的虚拟差分频率由集合 {±( $f_i - f_j$ ),1≤i≤ $N_1$ ,1≤j< $N_2$ }中的不同值来决定。以 $N_1$ = $N_2$ =3为例, 6个子频带可以产生-11 $\Delta f$ ~11 $\Delta f$  + 23个均匀分布的虚拟频率。更一般地,图2所示的嵌套式稀疏频率结构,能够在 { $n\Delta f$ , n=-L,…,L,L= $N_2(N_1$ +1)-1}获得 2 $N_2(N_1$ +1)-1个虚拟频率。当子频带个数N确定时,对于二阶嵌套式频谱分布,两组均匀间隔频率集合中子带个数的最佳分配为 $N_1$ = $floor\left(\frac{N}{2}\right)$ , $N_2$ = $ceil\left(\frac{N}{2}\right)$ ,其中, $floor(\cdot)$ 表示向下取整, $ceil(\cdot)$ 表示向上取整。可见,通过将频率步进雷达或调频步进雷达的均匀频率步进信号进行稀疏化,可以用更少的脉冲获得一次距离估计结果,即提高了数据率(时间资源),同时由于脉冲更少,需要的频率资源也大大降低。



上述N个稀疏子频带的配置方式可以扩展到 多个发射天线的频分模式,如FDA 雷达,如图 3 所示。后续以时分模式为例进行说明,处理方法 及结论等同样适用于频分模式。

上述两级嵌套形式可以扩展到多级,若第*i* 级均匀频率集的子频带个数为*N<sub>i</sub>*,子频带间频率 间隔为Δ*f<sub>i</sub>*,则第*i*+1级频率集的子频带频率间隔 为(*N<sub>i</sub>*+1)Δ*f<sub>i</sub>*。

以平滑多重信号分类方法(Multiple Signal Classification, MUSIC)<sup>[7]</sup>为例,利用上述稀疏频率分布信号构造虚拟频率进行宽带聚合,从而获得高分辨力距离估计。具体步骤如下:

1) 计算接收信号(对于线性调频信号,首先 需进行脉冲压缩,取脉冲压缩后的峰值信号)的 协方差矩阵 **R**<sub>xx</sub>,对其进行向量化处理得到向量 z,将z排序并删除冗余(或进行冗余平均),得到 虚拟频率信号 zz;

2) 通过空间平滑获得zz的协方差矩阵R<sub>z</sub>;
 3) 利用 R<sub>z</sub>进行特征值分解,得到噪声子空间;

4) 构造 MUSIC 谱, 遍历不同的距离值, 通 过谱峰搜索获得距离估计结果。



 (a) transmitted subpulse is single frequency (b) transmitted subpulse is chirp Fig.3 Sparse frequency distribution for FDA
 图 3 频分模式下的稀疏频率分布

可见,采用上述具有嵌套形式结构特点的稀疏频率进行高分辨力距离估计,可以利用更少的时间资源和频 率资源,获得等效的连续均匀步进信号,达到高分辨力、低距离模糊、无旁瓣的距离估计效果。

除了上述具有嵌套式结构的稀疏频率设置方式外,还可以利用以下两种具有互质结构特点的稀疏频率设置 方式:一是各子频带相对参考频带的频率偏移量两两互质,从而消除距离模糊;二是稀疏子频带分为两个具有 均匀步进量的子集,假设子集1包含的频带个数为N<sub>1</sub>,子集2包含的频带个数为N<sub>2</sub>,子集1中频率步进量为 N<sub>2</sub>Δf,子集2中频率步进量为N<sub>1</sub>Δf,其中N<sub>1</sub>与N<sub>2</sub>互质,此时不仅可以避免距离模糊,还可以与嵌套式结构类似, 通过求和/差分处理获得更大数量的连续均匀步进虚拟频率量。对此不再详细展开。

#### 2 目标散射特性一致性校正

如前所述, 雷达可用的频谱资源可能跨越几个波段, 此时不能直接利用上面的宽带聚合处理, 必须考虑在 不同频率下目标散射特性的变化及其对距离估计的影响。

在光学区(入射电磁波波长远小于目标尺寸), 雷达目标的散射回波可以看成是有限个强散射中心的相干叠加。经典的散射中心模型主要包括几何绕射理论(GTD)散射中心模型<sup>[8]</sup>、衰减指数和模型<sup>[9]</sup>。在高频区, GTD散射中心模型对散射中心宽带频率特性的描述更为准确:

$$E(f) = \sum_{m=1}^{M} A_m \left( j \frac{f}{f_0} \right)^{a_m} \times e^{-j \frac{4\pi f}{c}_{r_m}} = \sum_{m=1}^{M} A_m \times j^{a_m} \times e^{-j \frac{4\pi f_0}{c}_{r_m}} \times e^{-j \frac{4\pi \delta f_n}{c}_{r_m}} \times \left( 1 + \frac{\Delta f_n}{f_0} \right)^{a_m}$$
(1)

式中: *M*为散射中心的个数;  $A_m$ 为第*m*个散射中心的散射强度;  $r_m$ 为第*m*个散射中心的位置;  $f = f_0 + \Delta f_n$ ,  $f_0$ 为初始频率,  $\Delta f_n$ 为频率值f与起始频率的频率差; c为电磁波传播速度;  $a_m$ 为第*m*个散射中心的频率依赖因子/散射 点类型因子。

式(1)中,前3项为与频率无关的幅度项,第4项指数项为频率差引入的相位差,用于距离估计。最后一项为 频率差引入的目标散射特性差异项,当子带频率差距跨度较大时,该项不可忽略,此时需要在距离估计之前首 先进行目标散射特性一致性补偿。将这种情况下的频带分布简单称为跨波段分布。

从式(1)可以看出,待补偿的误差项的校正依赖于散射点类型因子 $\alpha_m$ 的估计, $\alpha_m$ 取决于目标几何结构,为1/2的整数倍,一般取{-1,-0.5,0,0.5,1}。 $\alpha_m$ 可以通过传统的GTD模型参数估计方法得到,即将GTD参数模型经过近似化简后,散射系数估计问题就可转化为经典空间谱估计问题<sup>[10]</sup>。利用经典空间谱估计算法可以对GTD散射中心模型参数进行提取,获得 $\tilde{\alpha}_m$ 。此处, $\alpha_m$ 只和目标几何有关,与频率无关,可以通过部分子频带进行估计。后面的仿真将进一步证明, $\alpha_m$ 的粗估计和补偿可使宽带聚合成为可能。

利用估计的 $\tilde{a}_m$ 对各子频带间频率差异导致的误差项进行补偿:

$$\tilde{E}\left(f\right) = \sum_{m=1}^{M} A_m \times j^{a_m} \times e^{-j\frac{4\pi d_0}{c}r_m} \times e^{-j\frac{4\pi d_0}{c}r_m} \times \left(1 + \frac{\Delta f_n}{f_0}\right)^{a_m} \times \left(1 + \frac{\Delta f_n}{f_0}\right)^{-\tilde{a}_m} \approx \sum_{m=1}^{M} A_m \times j^{a_m} \times e^{-j\frac{4\pi d_0}{c}r_m} \times e^{-j\frac{4\pi d_0}{c}r_m}$$
(2)

此时,各子频带间频率差异仅引入与距离r<sub>m</sub>相关的相位项,可以通过第2部分的处理算法或对差分信号进行 IDFT 算法完成距离估计。

#### 3 仿真分析及试验

### 3.1 稀疏频率宽带聚合效果仿真、试验验证

3.1.1 稀疏频率宽带聚合效果仿真

不考虑目标频率散射特性影响的稀疏频率宽带聚合效果仿真。仿真条件:图4(a)、4(b)分别为*N*=12 和*N*=6 的均匀频率步进信号,步进频率量均为Δ*f*=10 MHz,最大不模糊距离为15 m;图4(c)为稀疏嵌套频率方案,其中 *N*=6、*N*<sub>1</sub>=*N*<sub>2</sub>=3、Δ*f*=10 MHz。此时通过差分操作可以获得23个虚拟的均匀步进频率,对应最大不模糊距离为15 m。通过空间平滑 MUSIC 算法,实际用于距离估计的均匀步进频率个数为12 个。



第 11 期

为仿真距离分辨力,选择2个分别位于5m、5.3m处的 目标,在不同SNR下,图4中3种发射信号模式对应的距离 估计结果。如图6所示,图6(d)~(f)为图6(a)~(c)对应结果的局 部放大图。由图6(a)~(b)可见,在 $R_{sn}$ =10 dB和 $R_{sn}$ =15 dB时, 提出的稀疏频率信号配置和ULF1配置下2个目标均可以被分 辨,而ULF2配置下2个目标不可分辨。可见稀疏频率设置方 式在SNR较低时优势更大。随着SNR的进一步提高,如图6 (c)所示,3种情况下2个目标均可以被分辨,且稀疏频率下 的距离分辨力优于N=6时的均匀步进频信号。



Fig.5 Range estimation for 8 targets 图5 对8个目标的距离估计结果



图 7 为进行 1 000 次蒙特卡洛(Monte Carlo)试验得到的不同频率配置对应的不同 SNR 下距离估计结果的均方 误差(Mean Square Error, MSE)。图 7(a)为仅考虑 1 个目标时的距离精确度,可见,稀疏嵌套频率下的距离估计精 确度介于两种均匀步进信号之间;随着目标数量增加,稀疏嵌套频率下目标估计精确度随着 SNR 增大趋于平衡, 而两种均匀步进信号条件下目标距离估计精确度可以随着 SNR 增大而不断增大。

另外,由图7可见,随着目标个数的增加,不同频率设置方式下的距离估计精确度均下降。原因在于,当目标个数增多时,噪声对应的特征向量减少,估计得到的噪声子空间小,用于近似真实噪声子空间时"不够完备",导致估计精确度下降。

3.1.2 试验验证

利用 77 GHz FMCW 雷达对稀疏频带下载波聚合效果进行试验验证。接收天线接收到目标的回波信号后,经 混频器与本振混频,得到相应的中频信号。试验系统按时分模式发射调频步进信号,步进 chirp 子信号个数 N= 20,频率步进量 Δf=80 MHz。为方便,将20个子频带按起始频率从低到高分别称为第1,2,…,20个子频带。为简 化处理,试验中设置静止角反射器作为被测目标,试验在普通室内环境下完成。

第 21 卷



图7 不同目标个数下距离估计结果的均方误差

从N个接收信号中进行子带抽取,获得所需的不同稀疏频带构型的实测数据。从接收的子频带数据中进行均匀2倍抽取,可以获得频率步进量为2公f的10个子频带进行处理后的结果,如图8(a)所示。从图中可见,除了目标实际位置(约0.85 m)外,在1.787 m处存在虚假目标,即出现距离模糊。图8(b)为从20个子频带信号中抽取部分子带构成非均匀稀疏频带,为避免距离模糊,选择具有互质频率偏移量结构的子频带,即以最低子频带为参考,其他子频带关于参考频带的频率偏移量与公f之比满足两两互质关系。图中,互质分布1(对应图8(b)中Coprime 1)包含第1、2、3、4、6、8、12、14、18共9个子频带,互质分布2(对应图8(b)中Coprime 2)包含第1、2、6、12、14、18共6个子频带,互质分布3(对应图8(b)中Coprime 3)包含第1、2、14、18共4个子频带,从图中可见,随着频率稀疏程度的增大,距离旁瓣现象严重,进而影响目标检测结果。



图 8 实测数据处理结果

图9为不同子频带配置下的距离压缩结果。其中虚线对应利用20个子频带的距离压缩结果,点画线表示仅利 用前7个均匀步进子频带的结果,实线表示利用具有嵌套分布子频带宽带聚合结果。子频带选择第1、2、3、4、 8、12、16共7个子带,通过差分处理获得-15~15共31个步进量为Δf的虚拟均匀步进子频带。图9(a)~(b)分布为基

- · ULF1 (N=20 ••• ULF2 (N=7) ULF2 (N=7)NF (N=7)-20 \_4 mplitude/dB -10 amplitude/dB -4( -15 -80 -20 -100-25 0.5 1.0 1.5 2.0 0.5 1.5 2.0 0 1.0 range/m range/m (a) comparison of results with IDFT processing (b) comparison of results with MUSIC algorithm Fig.9 Data processing results of measured sparse nested frequency bands 图9 实测稀疏嵌套频带数据处理结果

实测结果进一步证明了采用稀疏嵌套频带发射信号,可以在不出现距离模糊和距离旁瓣的情况下,获得大带宽。

# 3.2 频率跨度对跨波段宽带聚合的影响仿真

图 10为 GTD 模型下频率对目标散射特性的影响。其中图 10(a)为 8~8.5 GHz 总频带内的目标散射幅度,可见 总频带内频率对目标散射幅度的影响可以忽略;图 10(b)为 8~28.5 GHz 总频带内的目标散射幅度,此时由于频带 跨度过大,频率对目标散射幅度的影响不可忽略。



图 11 为 $R_{sn}$ =10 dB 时,不同  $\Delta f_N / f_0$  比值下 5 个目标的距离压缩结果。5 个目标从左至右频率依赖因子  $\alpha$  分别为 -1、-0.5、0、0.5、1。图中两条水平虚线分别对应-3 dB 和-13 dB 的信号水平,竖直虚线对应了目标实际距离 对应的位置。可以看出,随着  $\Delta f_N / f_0$  比值的增大,不同频率依赖因子对应目标的强度变化剧烈,且主旁瓣比降低;尤其频率依赖因子  $\alpha$  相对较小的目标,主旁瓣比降低更严重,此时频率依赖因子  $\alpha$  相对较小的目标容易被频率依赖因子  $\alpha$  相对较大的目标淹没,从而发生漏警。在这种仿真条件下,从图 11 可见,当  $\Delta f_N / f_0$  比值小于 1 时,5 个目标的检测基本不受影响;当  $\Delta f_N / f_0$  比值小于 2 时,5 个目标仍可以被检测;当比值大于 2 时,会出现漏警。

图 12 为 $R_{sn}$ =10 dB时,不同 $\Delta f_N/f_0$ 比值下,频率依赖因子 $\alpha$ 分别为-1和1的2个目标所对应的强度对比(比值), 图中2条水平虚线分别为-3 dB和-13 dB。从图中可以看出,当 $\Delta f_N/f_0$ 比值约为0.4时(对应于图中与-3 dB的水平 虚线相交的点的横坐标),其中一个目标的能量降低为另一个目标能量的1/2;当 $\Delta f_N/f_0$ 比值约为2.5时, $\alpha$ 为-1的 目标的主瓣能量与 $\alpha$ 为1的目标的第一旁瓣能量相当(对应于图中与-13 dB的水平虚线相交的点的横坐标),此时  $\alpha$ 为-1的目标有可能被淹没。

根据上面的仿真可见:

1) 当 \df\_n/f\_0 比值较小,尤其是比值小于1 时,不同频率引入的目标散射特性的影响可以不用考虑,这也从另 一个角度证明了宽带聚合对目标散射特性一致性补偿的精确度要求不高;

2) 当多个频率依赖因子α相差较大的散射点同时存在时,对频率依赖因子α越小的目标,检测越不利。

于IDFT处理的算法和基于MUSIC算法的结果比较。可见,利用提出的嵌套分布可以获得最高的距离分辨力。



 Fig.11 Range compression results for different ratios between the frequency spans and the start frequency

 图 11 不同频带跨度与起始频率比值下目标距离压缩结果

# 4 结论

本文提出利用具有嵌套结构特点的稀疏频带配置,通 过频带差分处理获得自由度更大、且频率连续均匀步进的 虚拟子频带,进而完成频带聚合和距离估计,达到高距离 分辨力、低距离模糊范围、低距离旁瓣、低频率占用率的 效果,并通过仿真试验进行了验证。提出的稀疏频率配置 方式不仅限于时分模式下的稀疏频率步进雷达和稀疏调频 步进雷达,也可用于FDA雷达;不仅限于窄带假设内窄带 信号的宽带聚合,也可用于频带跨度较大的跨波段宽带聚 合。当频率跨度较大时,需要首先基于GTD散射模型进行 目标散射点类型因子估计和频率依赖项补偿,使补偿后不 同子频带信号等效于窄带假设下的信号处理。仿真结果证 明,对于频带跨度相对起始频率的比值不超过1时,频率 对目标特性不一致性的影响在距离估计时可以忽略。后续





亦存任不一我任的影响在起离怕计时可以忍喻。后续

将利用实测数据对稀疏频带宽带聚合效果及跨波段下更复杂散射目标的宽带聚合效果进行进一步的验证。

#### 参考文献:

- [1] 毛二可,龙腾,韩月秋. 频率步进雷达数字信号处理[J]. 航空学报, 2001,22(z1):16-25. (MAO Erke,LONG Teng,HAN Yueqiu. Digital signal processing of stepped frequency radar[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001,22(z1):16-25.) doi:10. 3321/j.issn:1000-6893.2001.z1.003.
- [2] ZHANG Lihua,XU Wei,HUANG Pingping, et al. Comparison of frequency diverse array patterns with nonuniform frequency offset
   [C]// 2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium(IWS). Shanghai, China: IEEE, 2020: 1-3. doi: 10.1109/IWS49314.
   2020.9360153.
- [3] GREEN S D, KINGSLEY S P. Investigation of wide bandwidth HF radar waveforms[C]// IEEE Colloquium on Advanced Transmission Waveforms. London, UK:IET, 1995:2-1-8. doi:10.1049/ic:19950783.
- [4] CARLSON J, KENNEDY J, CHAKRAVARTHY V. SMSE-based DSA radar waveforms[C]// 2010 International Waveform Diversity and Design Conference. Niagara Falls, ON, Canada: IEEE, 2010:169-176. doi:10.1109/WDD.2010.5592484.

- [5] LINDENFELD M J. Sparse frequency transmit-and-receive waveform design[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004,40(3):851-861. doi:10.1109/TAES.2004.1337459.
- [6] 陈秋实.稀疏步进频率高频雷达信号处理方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019. (CHEN Qiushi. Research on signal processing method for high frequency radar based on sparse stepped frequency signal[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2019.)
- [7] 王永良,陈辉,彭应宁,等. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京:清华大学出版社, 2004. (WANG Yongliang, CHEN Hui, PENG Yingning, et al. Theory and algorithm of spatial spectrum estimation [M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2004.)
- [8] POTTER L C, CHIANG D M, CARRIERE R, et al. A GTD-based parametric model for radar scattering[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995,43(10):1058-1067. doi:10.1109/8.467641.
- [9] KANNAN N, KUNDU D. Estimating parameters in the damped exponential model[J]. Signal Processing, 2001, 81(11): 2343-2351. doi:10.1016/S0165-1684(01)00119-0.
- [10] 张小宽,郑舒予,奚之飞,等. 基于改进LS-ESPRIT 算法的 GTD 模型参数估计与 RCS 重构[J]. 电子与信息学报, 2020,42(10):
   2493-2499. (ZHANG Xiaokuan,ZHENG Shuyu,XI Zhifei,et al. GTD model parameters estimation and RCS reconstruction based on the improved LS-ESPRIT algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2020,42(10):2493-2499.) doi:10. 11999/JEIT190747.

# 作者简介:

张 慧(1987-), 女, 博士, 高级工程师, 主要研 究方向为雷达信号/数据处理、多源数据融合.email: 123happy.zh @163.com. **马** 莎(1977-),女,硕士,高级工程师,主要研 究方向为毫米波雷达信号处理、雷达干扰抑制技术.

**宋思达**(1987-),男,博士,高级工程师,主要研 究方向为毫米波雷达信号处理、雷达干扰抑制技术.