

OFDM 新体制雷达研究现状与发展趋势

霍凯* 赵晶晶

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 正交频分复用(OFDM)雷达是近些年才提出的一种新体制雷达,它借鉴了通信系统中正交多载频的原理,相比于传统雷达,具有一些独特的优势。该文系统地介绍了 OFDM 雷达的特点,全面梳理了国内外关于 OFDM 新体制雷达研究的文献,总结了信号特性与波形设计、信号处理、新体制雷达系统等几个重点方向的研究进展,并分析了 OFDM 雷达未来的几个发展趋势和应用前景。

关键词: 正交频分复用雷达;多载频;相位编码;波形设计;信号处理

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)11-2776-14

DOI: 10.11999/JEIT150335

The Development and Prospect of the New OFDM Radar

Huo Kai Zhao Jing-jing

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

Abstract: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) radar is a newly developed radar system, which uses the OFDM principle in communication systems, and has some unique advantages over traditional radar systems. This paper formulates the characteristics of OFDM radar, reviews thoroughly the Literatures on OFDM new radar system, summarizes the research achievements in the key research directions of signal properties and waveform design, signal processing, and new radar system, and finally analyzes the future development tendencies and application prospects of OFDM radar.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) radar; Multicarrier; Phase-coded; Waveform design; Signal processing

1 引言

正交频分复用^[1,2](Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM)技术易于实现频谱资源控制和无线环境下的高速传输,因而被首先应用于通信领域。Jankiraman 等人^[1,2]于 1998 年将 OFDM 技术引入到雷达系统中,他们设计了名叫“PANDORA”的雷达,它的信号由几个窄带的 LFM 通道组成,各通道的输出信号在接收机中进行合成来获得高分辨特性。近几年来,OFDM 新体制雷达引起了包括美、德等多国在内的世界范围内研究者的兴趣,在国际期刊和会议上涌现出不少高水平的相关论文,从不同角度和背景研究了相关的技术和理论,推动着 OFDM 雷达向前发展。

本文系统地介绍了 OFDM 雷达的特点,全面梳

理了国内外关于 OFDM 新体制雷达研究的文献,总结了信号特性与波形设计、信号处理、新体制雷达系统等几个重点方向的研究进展,并分析了 OFDM 雷达未来的几个发展趋势和应用前景。

2 OFDM 雷达的基本概念与特点

OFDM 雷达采用了多载频发射信号体制,通过同时发射多个相互正交的子载频,每个子载频上均可采用各种调制方式,从而获得大的时宽带宽积。

设雷达发射信号为

$$s(t) = \exp(j2\pi f_0 t) \sum_{m=0}^{M-1} u(t - mT_r) \quad (1)$$

其中, f_0 为发射中心载频, M 是脉冲个数, T_r 是脉冲重复周期, $u(t)$ 为 OFDM 多载频信号的复包络:

$$u(t) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n \text{rect} \left[\frac{t - T_p/2}{T_p} \right] \exp(j2\pi n \Delta f t) \quad (2)$$

其中, N 是子载频个数, w_n 是第 n 个子载频的加权系数, $\text{rect}(\bullet)$ 为单位矩形窗函数, T_p 是脉冲宽度, Δf 是相邻子载频之间的频率间隔,满足 OFDM 条件:

$$\Delta f = 1/T_p \quad (3)$$

从数学意义上来说,两子载频正交是指:

收稿日期: 2015-03-20; 改回日期: 2015-07-14; 网络出版: 2015-08-27

*通信作者: 霍凯 huokai2001@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61501481); 中国航天科技创新基金; CEMEE 国家实验室开放课题基金 (CEMEE2014K0207B)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61501481); The Foundation of China Aerospace Science and Technology Corporation (CASC); The Foundation of the State Key Laboratory of CEMEE (CEMEE2014K0207B)

$$\frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} \exp(j2\pi n\Delta ft) \exp(-j2\pi m\Delta ft) dt = \begin{cases} 1, & m = n \\ 0, & m \neq n \end{cases} \quad (4)$$

若 $T_r = T_p$ ，则 OFDM 雷达为连续波体制。事实上， $\Delta f \cdot T_p = M$ (M 为大于 1 的整数)也是可以满足 OFDM 条件的，相当于在频域进行了 M 倍的抽样，会对后端的信号处理带来一些影响。

理论上 OFDM 雷达的子载频上可以进行任何形式的调制，最常见的有线性调频调制(Linear Frequency Modulation, LFM)和相位编码(Phase Coded, PC)调制，分别称为 LFM-OFDM 和 PC-OFDM，其与基本 OFDM 信号的区别如图 1 所示。图 1(a)是基本的 OFDM 信号，每个子载频是单载频，子载频之间的频率间隔为 Δf ；图 1 (b)是 LFM-OFDM 信号，每个子载频采用线性调频，带宽均为 Δf ；图 1 (c)是 PC-OFDM 信号，每个子载频上采用相位编码调制，且子载频频率间隔 Δf 和码元宽度 t_b 满足 $\Delta f = 1/t_b$ 。这种 PC-OFDM 信号脉内、脉间子载频上编码可以相同也可以不同，设计非常灵活，而且还具备一些独特优点，如抗干扰能力强、易于数字化、通信雷达一体化等，因此这种信号是 OFDM 雷达研究的热点。

PC-OFDM 信号单脉冲的复包络可表示为

$$u(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{K-1} w_n a_{nkm} \text{rect} \left[\frac{t - t_b/2 - (k-1)t_b}{t_b} \right] \cdot \exp(j2\pi n\Delta ft) \quad (5)$$

其中， w_n 是第 n 个子载频的频率加权系数， K 为编码长度， a_{nkm} 为第 m 个脉冲上第 n 个子载频的第 k 个编码。

OFDM 雷达体制主要有以下几个方面的特点：

(1)波形设计灵活。OFDM 雷达信号参数很多，都可以进行相应的设计并很容易实现参数的改变。例如子载频加权系数 w_n ，表示了各子载频上能量的大小，它在发射时很容易根据需求进行变化，也就意味着较易实现频谱能量分配和频谱管理。每个子载频上的编码也可以灵活设计，这种特点从体制上

带来了一些优点，例如易于通过频率捷变有效对抗窄带干扰，通过设计实现低截获，在复杂战场电磁环境中有较强的适应能力。事实上，OFDM 雷达信号包络是时变的，与传统的恒包络信号不同，这种时变包络带来了上述优点的同时，也产生了包络峰均比 (Peak-to-Mean Envelope Power Ratio, PMEPR)过高的问题。

(2)距离高分辨和多普勒高分辨。OFDM 雷达信号具有图钉状模糊函数，这就意味着 OFDM 雷达同时具备距离高分辨和多普勒高分辨，不存在距离多普勒耦合，这是传统的 LFM 雷达和频率步进 (Stepped Frequency, SF)雷达所不具备的。这就意味着 OFDM 雷达可以采用一种信号体制实现多普勒测速、高分辨成像等多种功能。然而，图钉状的模糊函数也使 OFDM 雷达信号成为“多普勒敏感”信号，在回波处理时如果匹配滤波器存在细微的多普勒失配，将导致滤波器性能迅速下降。从另外一个角度来看，多普勒频偏将破坏 OFDM 雷达信号的正交性，出现子载频间串扰，导致脉冲压缩峰值降低，因此需要频偏估计与补偿。

(3)PC-OFDM 信号在雷达和通信中的发射机制相同。PC-OFDM 信号最早应用在通信系统中，是将信息编码并调制到每个子载频上。在 PC-OFDM 雷达中，其发射信号也是将相位编码调制到每个子载频上，它们的区别在于，通信调制的编码是以发送信息为目的，而雷达的相位编码是以降低 PMEPR 或回波处理为目的。但是无论 PC-OFDM 通信还是雷达，信号调制、发射的机制是相同的，这就意味着雷达和通信系统可以共用发射硬件设备，即采用 PC-OFDM 这一种信号体制可实现雷达和通信的一体化。

(4)频率分集与正交性。OFDM 雷达信号本身实现了频率分集，并且具备了正交性，这种特性使其具备了优势。例如较易实现多基地、多频段的雷达组网，与 MIMO 技术结合，形成新体制雷达。

总的来说，OFDM 雷达是一个全能选手，它既具备宽带雷达成像的能力，又可以实现目标检测、多普勒测速；既具备波形捷变、抗干扰、低截获的

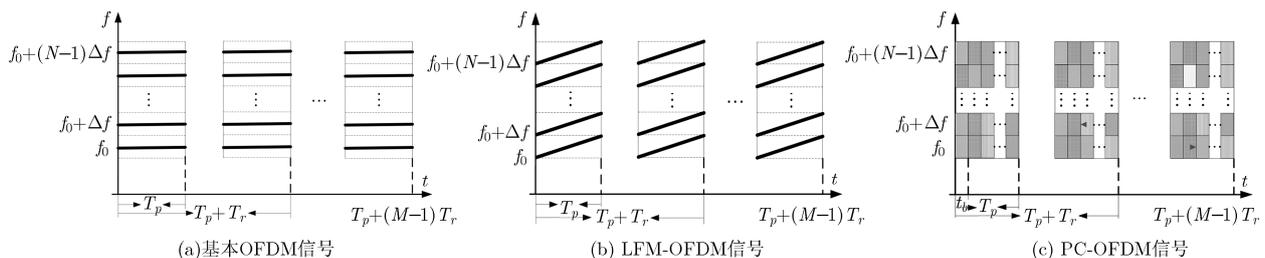


图 1 3 种 OFDM 雷达信号时频结构示意图

优势,又有应用于雷达通信一体化、雷达组网等新体制雷达的潜力。在单个功能方面,例如宽带成像,它可能不比 LFM 有明显的优势,甚至后端信号处理更复杂;在抗干扰低截获方面,它的性能可能并不比随机单载频 PC 更优良,但它比 LFM 的抗干扰低截获性能更好,比单载频相位编码信号宽带成像能力更强。综合来看,常见的雷达信号体制(LFM、SF、PC)没有一个像 OFDM 雷达这样能力全面,它的众多优点使其成为新体制、多功能雷达研究的热点之一,具有广泛的应用前景。

OFDM 雷达在实际应用上主要存在两个缺点:

(1)发射波形的包络峰均比(PMEPR)较高,导致射频放大器功率效率低。由于雷达发射机的功率放大器一般都不是线性的,且其动态范围有限,当 OFDM 信号这种变化范围较大的信号通过非线性部件(例如进入放大器的非线性区域时),信号会产生非线性失真,产生谐波,造成较明显的频谱扩展干扰以及带内信号畸变,从而导致整个雷达系统性能的下降,而且同时还会增加 A/D 和 D/A 转换器的复杂度并降低它们的准确性。因此 OFDM 雷达要获得高的发射功率,就要尽量降低信号的 PMEPR 并采用大动态范围的线性放大器,一般情况下设计 PMEPR 降低到 2 以内就可满足普通雷达的发射要求^[3]。在雷达发射功率不很高的情况下,对不是很大的 PMEPR 也可以忍受。

(2)对多普勒频偏和相位噪声较为敏感。OFDM 技术区分各子载频的关键在于利用个载频之间严格的正交关系。雷达信号的目标或者雷达平台运动产生的多普勒频偏以及相位噪声会破坏 OFDM 雷达回波子载频间的正交性,产生邻道干扰,损失一定的信号能量,从而导致检测、测速或成像性能的下降。低速运动目标产生的这种影响不大,但是针对高速运动目标,影响不可忽略,需要进行运动补偿。

3 OFDM 雷达的研究现状

第 1 篇关于 OFDM 雷达的文献是 1998 年 Jankiraman 等人^[1]发表的多载频调频连续波雷达,之后以色列的 Levanon 教授发表了一系列关于多载频雷达信号方面的论文^[4-10]。最近十年,国外关于 OFDM 雷达的文献大幅增加,包括美、德、法、以、荷、印等多个国家的大学和研究机构都开展了相关研究,内容涉及从 OFDM 雷达波形设计、OFDM 雷达信号处理,到 OFDM 新体制雷达系统设计等各个方面。国内的国防科技大学、北京航空航天大学、电子科技大学、南京理工大学等单位也针对 OFDM 雷达展开了相关的研究。下面就将从信号特性与波

形设计、信号处理、新体制雷达系统等几个方面介绍 OFDM 雷达的研究进展。

3.1 OFDM 雷达信号特性与波形设计

现有文献主要针对 OFDM 雷达信号模糊函数(Ambiguity Function, AF)、自相关函数(Auto-Correlation Function, ACF)、包络峰均比(PMEPR)以及功率峰均比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)等特性展开研究,并在此基础上,进行信号波形设计与优化。

以色列的 Levanon 针对 OFDM 雷达信号特性开展了系统的研究工作^[4-11],特别对相位编码 OFDM 信号的研究尤为深入。他提出了一种多载频互补相位编码(Multicarrier Complementary Phase-Coded, MCPC)信号^[4,5],采用构成互补集的编码序列进行调制,这种信号具有良好的特性:PMEPR 可控制在 2 左右,模糊函数为图钉状,自相关旁瓣较低,同一系列的 MCPC 的互模糊函数的峰值较低,互相干扰小,该信号已申请了美国专利^[11]。图 2 为 MCPC 信号的结构图与模糊函数。他还研究了相位编码 OFDM 脉冲串信号和连续波信号的性质^[7,9],其中脉冲串信号分为两种情况,一种是脉冲串每个脉冲各子载频编码相同,所有脉冲所用编码序列构成同一互补集(Identical Complementary Set, ICS),其模糊函数为峰值周期重复的“钉床”,PMEPR 可达到 1.48,但是自相关函数第一码元内的旁瓣相对较高;一种为 MPCP 脉冲串,各脉冲采用周期循环移位的同一互补集进行编码,其模糊函数不再具有周期重复的峰值,峰值的个数和旁瓣基座高度受编码方式和加权系数影响。相位编码 OFDM 连续波信号的周期自相关函数具有较窄的主瓣,旁瓣受相位编码形式影响;不同编码的互模糊函数没有主瓣,表明相互间干扰较小。Ruggiano 等人^[12]对相位编码 OFDM 信号的宽带模糊函数进行了推导,并且考虑了目标散射特性随频率的变化情况,研究结果适用于超宽带雷达的情况,在一定的条件下,可进行窄带近似。

为了减轻 OFDM 雷达信号包络起伏较大带来的影响,现有常用方法主要有:第一,增大系统功率放大器的动态范围和线性度,但这种方法势必会增加系统复杂度;第二,限幅方法,空军预警学院的李自琦等人^[13]在雷达通信一体化系统中,利用直接限幅法对发射信号 PAPR 进行抑制,并研究了直接限幅法对系统性能的影响,直接限幅是一种非线性操作,会带来明显的带内噪声和带外干扰,进而破坏信号子载频之间的正交性,影响目标信息提

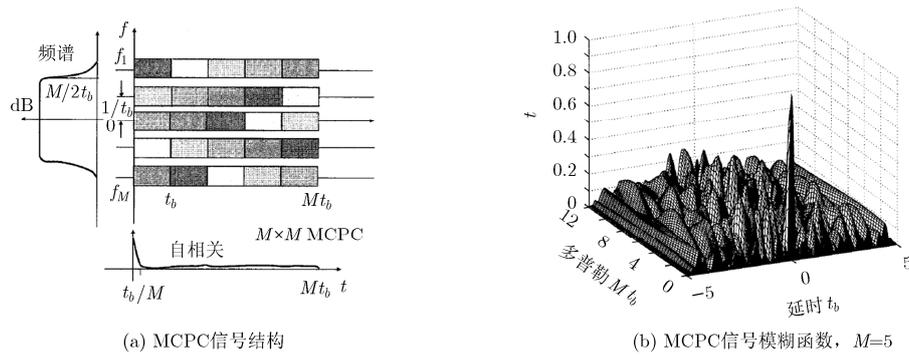


图 2 MCPC 信号结构图与模糊函数

取, 因此可采用多次限幅的方法抑制带外干扰, 但带内噪声仍无法避免; 第三, 优化设计雷达波形参数, 这种方法目前研究最为广泛, 印度的 Irukulapati 等人^[14]、Gupta 等人^[15]和中国的 Cheng 等人^[16]利用选择性映射方法(Selected Mapping, SLM)降低了 OFDM 信号 PAPR, 其思想为, 用不同的相位序列对传输数据进行加权, 从得到的信号集中选出 PAPR 值最低的信号发射, Irukulapati 等人^[14]选用归一化黎曼矩阵的行向量作为相位序列, 可使信号的 PAPR 值降低 2.3 dB 左右; Cheng 等人^[16]研究了不同相位序列降低 PAPR 的效果, 并将混沌序列引入 SLM 中; Gupta 等人^[15]则提出了一种现代化 SLM 算法(MSLM), 通过将复基带信号的实部和虚部分离, 分别进行相位加权, 选择 PAPR 最低的再进行组合, 相较于传统的 SLM 算法, 该算法所得信号的 PAPR 值降低了 0.25~1 dB 之间。另外, 伊朗的 Mohseni 等人^[17]将相位调制(PC)和频率调制(Frequency Coding, FC)与 OFDM 信号相结合, 得到恒包络信号(Constant Envelope, CE), 并进行了脉冲压缩与参数设计。中国电子科技大学的 Wang 等人^[18]通过随机子线性调频方法降低 OFDM Chirp 信号的 PAPR, 该信号同时具有 OFDM 信号较大的时间带宽积和较低的发射功率, 近乎不变的时域频域模数, 较低的 PAPR, 且跟踪运动目标时, 回波不存在时间-多普勒耦合现象, 具有较大的优越性。

为了得到“图钉形”的模糊函数, 伊朗的 Sebt 等人^[19]运用最小二乘法来分配编码相位, 并且设计了一种迭代算法, 压缩模糊函数的旁瓣; Alimosaymer 等人^[20]通过最小化实际与理想模糊函数之间的均方误差, 提出了相应迭代算法, 设计了一种多载频小波调制 OFDM 雷达信号(WPM-OFDM), 该方法可以有效降低 OFDM 雷达信号模糊函数旁瓣, 得到适用于雷达应用的理想信号。在此基础上, 他们还提出了一种 WPM-OFDM 雷达

信号系统化设计方法^[21], 该方法可以有效降低整个模糊函数平面上的旁瓣, 他们还将该方法扩展到 WPM-OFDM 脉冲对的设计中, 使得脉冲对互模糊函数接近于理想情况。

OFDM 信号多载频的信号体制, 提高了稀疏条件下目标的检测概率, 且信号体制包含有可供设计的波形参数, 因此可以通过自适应波形设计进一步提高系统的性能, 美国的 Sen 等人^[22-26]发表了一系列论文介绍 OFDM 雷达自适应波形设计方法。为了设计发射信号的参数, 他们提出了一个多目标优化问题^[22,23], 同时提高系统检测性能、估计精度、提高稀疏估计方法的性能; 进一步建立了一个 PAPR 约束下的多目标优化方案^[26], 同时优化 4 个目标函数, 设计了一种 OFDM 空时自适应处理雷达, 性能相比于传统雷达有较大提升; 通过最小化角速度估计的克拉美罗限(Cramér-Rao Bound, CRB)自适应设计波形参数, 提高了转动目标的微多普勒频率估计精度^[25]。空军工程大学的 Luo 等人^[27], 研究了一种认知雷达波形设计方法, 该方法基于压缩感知理论, 并且提出了 LFM-OFDM 波形自适应设计及其高分辨率成像的方法。Sebt 等人^[19,28]同时考虑了 OFDM 模糊函数的优化和 PMEPR 的降低, 提出了一种迭代算法, 首先以获得接近理想的模糊函数为目的, 寻求最优的信号编码形式, 然后再通过编码修正来减小发射信号的 PMEPR。Mohseni 等人^[29,30]用正交小波复用(Orthogonal Wavelet Division Multiplexing, OWDM)代替传统的 OFDM, 获得了设计更加灵活的 OWDM 编码信号, 这种信号模糊函数的旁瓣较低, 并且频谱利用率较高。考虑到 OFDM 信号在雷达通信中的双重用途, 美国的 Guo 等人^[31]提出了一种基于凸优化的 OFDM 波形设计框架, 同时获得深度零谱、较低的自相关函数旁瓣以及良好的距离分辨。

总体来说, 在 OFDM 雷达信号特性与波形设计方面, 国内外诸多学者都开展了针对不同应用场景、

不同设计目的的研究,取得了一些建设性的成果,但是缺乏系统和全面的理论。降低 OFDM 信号的 PMEPR 是信号设计的一个关键环节,但不能单纯片面地追求这一目标,设计的信号还与信号其它特性及后续信号处理密切相关,在很多应用场景下需要一体化考虑信号的设计与处理。信号特性分析与波形设计多以模糊函数为理论基础,然而模糊函数描述信号性质有一定的局限性,其关注信号本身的分辨能力,而未考虑实际情况中是否能达到以及如何达到这一理论极限值,这就导致在实际中应用这一理论的困难。例如信噪比是信号处理的很重要一个因素,信号处理效果受信噪比的影响较大,在低信噪比下根据模糊函数分析得到的分辨率往往无法达到,这就导致在检测、成像等处理时采用模糊函数分析分辨率说服力不足,需要构建更加贴近实际应用的系统全面的信号设计与特性分析理论,统筹考虑从信号发射到接收、处理各个环节的主要因素。

3.2 OFDM 雷达信号处理

对 OFDM 雷达信号处理方面的研究,目前主要集中在 OFDM 雷达脉冲压缩、多普勒处理等方面,以实现包括目标检测、测速、成像在内的多种雷达常见功能。

伊朗的 Mohseni 等人^[32,33]针对相位编码 OFDM 信号的特点,提出了一种基于 FFT 的脉冲压缩方法。这种方法等效于匹配滤波,主要优势在于降低了计算复杂度,降低的程度取决于信号参数,并且估计了不同子载波的相位和幅度便于用作雷达系统中的能量管理。他们同时提出了一种低采样的脉冲压缩处理方法,采样速率仅为原来的四分之一。

在多普勒处理方面,南非的 Lellouch 等人^[34-36]就 OFDM 脉冲串信号展开研究,主要包括其频率捷变特性和多普勒处理能力。OFDM 脉冲都具有明显的宽带特性,且易实现距离高分辨。他们将全部子载波分为两部分,一部分进行多普勒处理,另一部分实现频率捷变。这种算法通过将每一个子载波看成窄带来处理,提高了信噪比,一般适用于多普勒频移很小的情况。他们还分析了窄带和宽带情况下,OFDM 脉冲串的多普勒处理能力^[35]。当目标速度较低时,适用窄带假设,运用传统的多普勒处理算法,基于 FFT 进行处理;而当速度升高时,距离单元走动增大,不可忽略,此时适用宽带假设,需考虑 OFDM 频谱的缩放比例,再利用频谱的偏移估计多普勒频移。另外,他们利用回波载频与发射信号载频相位信息获得了点目标信号的距离及径向速度估计^[34],讨论了多普勒频移对 OFDM 单脉冲的影响,提出了无模糊的多普勒估计方法。荷兰

的 Franken 等人^[37]推导了 OFDM 编码信号的多普勒容许范围,描述该范围为多普勒频率和时延的函数。在脉冲压缩的误差要求限制下,多普勒频移即目标的速度也有所限制。Tigrek 等人^[38]利用 OFDM 雷达同时进行距离和多普勒处理,处理流程如图 3 所示。他们同时研究了 OFDM 雷达解多普勒模糊的问题^[39]。在充分研究随机相位调制 OFDM 信号结构的基础上,他们还提出了一种基于多普勒补偿原则的算法^[40],该算法可以解决脉冲多普勒雷达的多普勒模糊问题。利用加权 OFDM 波形,美国的 Turlapaty 等人^[41]提出了一种非线性最小均方准则,对运动目标进行距离及速度估计,并得到了相应的克拉美罗下限,他们提出的加权 OFDM 波形相较于传统的 OFDM 信号,时延估计精度有所提高,且信号 PAPR 控制在相对较低的水平。俄罗斯的 Kashin 等人^[42]对发射 OFDM 波形的多普勒高分辨雷达速度估计方法进行研究,主要运用两种子空间方法进行速度估计,第一种方法为传统的 MUSIC 算法,第二种方法则为综合子载波减秩 (RANK Reduction, RARE) 算法,实验证明两种方法均具有较好性能, RARE 算法略优于 MUSIC 算法。

在目标检测方面,德国的 Fink 等人^[43]提出了基于多用户访问原则的目标检测。该原则下,每个用户随机选取 OFDM 信号全部子载波的一个子集,每个子载波被选择的概率相等,且所选的子载波频率间隔是任意的,这就大大降低了两个用户选择完全相同子集的情况发生,这种原则下的目标检测器较传统的检测性能有所下降,但是更加适应实际的需要。伊朗的 Kafshgari 等人^[44],利用广义似然比检测器研究了高斯杂波背景下的起伏目标检测问题。他们共研究了 4 种杂波分布下 3 种目标运动情况下 OFDM 雷达检测性能。美国的 Bufler 等人^[45]研究了基于成像的目标检测,将 OFDM 信号应用与超宽带 SAR 成像领域,可以同时产生多幅图像,每个子载

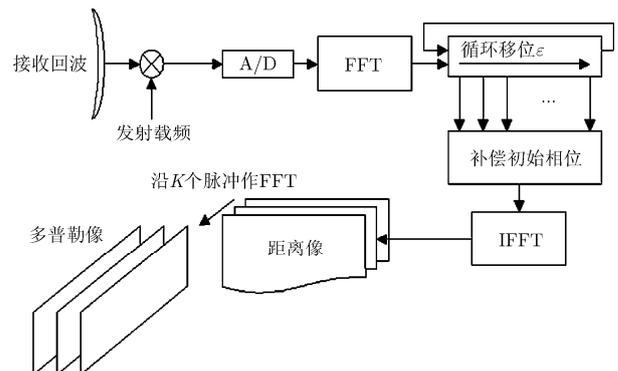


图3 一种OFDM雷达信号距离和多普勒处理流程

频可单独产生一个图像,并利用改进的自动目标检测算法对所成的像进行检测。荷兰的Ruggiano等人^[46-48]对OFDM雷达目标检测问题进行了一系列研究,他们将CLEAN和LMMSE算法运用于OFDM雷达目标检测问题中^[46,47],并证明了OFDM信号的均方误差比P3编码信号要小,可以更有效地分辨出被旁瓣遮掩的微弱目标。综合考虑旁瓣压缩比和输出信噪比^[48],他们提出了一种基于最小均方误差的滤波方法并运用于自适应脉冲压缩中,该方法适用于多目标和弱目标检测。他们将这种算法运用于编码OFDM信号处理中,研究了雷达通信一体化的实现。南京理工大学的顾陈等人^[49]对OFDM雷达信号处理及目标检测方法进行了研究,证明了在测量高速目标时,OFDM雷达相较单载频调制雷达具有更优的脉冲压缩性能和更高的检测概率。空军预警学院的Gu等人^[50]利用相位编码OFDM-MIMO雷达系统,对高速目标进行检测,结果显示该体制下,检测性能有所提高,检测RCS起伏较为平滑。

在雷达成像方面,Schuerger等人^[51]在欺骗式干扰背景下,研究了OFDM-SAR的成像性能,并且证明了随机子载频编码OFDM信号具有优良的抗干扰性能。Riché等人^[52]也对SAR的距离模糊进行了压缩,对于遥感目标而言,距离模糊是SAR系统一个不可回避的问题,当回波时延大于雷达脉冲重复周期时,SAR成像出现距离模糊。他们用实验证明了相较于传统的chirp信号,编码OFDM信号可以有效缓解脉冲重复率的限制。Wang^[53]利用OFDM信号消除高脉冲重复率SAR的距离模糊,研究了相关的系统规划、波形设计,详细推导了该情况下的距离模糊-信号比。Buhari等人^[54]对超宽带OFDM-SAR雷达多目标成像进行了研究。中国科学院的王杰等人^[55]分析了多普勒频移对OFDM-SAR信号的影响,多普勒频移不仅降低了距离向的脉冲压缩系数,还影响了SAR系统的方位向聚焦效果,他们提出了一种距离多普勒域的多普勒频移补偿方案,消除了多普勒偏移对距离向脉冲压缩性能的影响。

针对OFDM-SAR雷达无副瓣距离向处理引起了广泛的研究,中国电子科技大学的Zhang等人^[56,57]将引入通信中发展已较为成熟的保护间隔和循环前缀技术引入雷达信号处理中,提出了一种基于循环前缀的SAR成像方法,该方法对每个发射脉冲添加循环前缀,可以有效消除距离单元间的干扰,在距离像重构中获得理想的零距离旁瓣效果。图4所示为加入循环前缀的OFDM信号结构示意图,该方法中,每个脉冲所加循环前缀长度必须约等于成像带内距离单元数,而OFDM信号子载频数须大于循环前缀

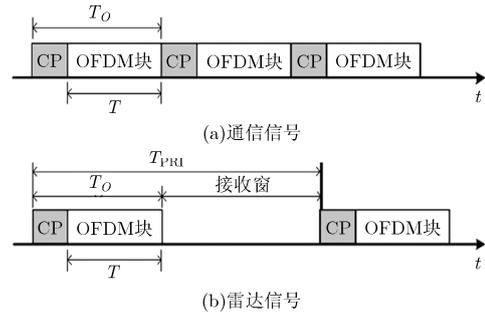


图4 基于循环前缀的OFDM信号结构示意图

长度,此时发射OFDM单脉冲序列长度至少为距离单元数的两倍,为解决这一问题,他们进一步提出了一种随机长度循环前缀法,该方法在有效消除距离向旁瓣的同时,消除了发射信号能量冗余。西安电子科技大学的Cao等人^[58]也提出了一种基于循环前缀的MIMO-OFDM SAR成像系统,该系统中各发射机均发射一个OFDM单脉冲以获得目标距离像,并且具有相同的频带,因此,并未降低距离分辨率。该方法利用循环位移的Zadoff-Chu序列对MIMO阵列中各个发射天线发射OFDM波形进行加权,并对各接收天线分别进行空间滤波以将完整成像带分割成多个子带,达到消除距离向旁瓣的目的。

另外,还有多篇文献针对OFDM-MIMO这种新体制雷达的信号处理开展研究。德国的Sit等人^[59]将OFDM信号的距离和多普勒估计算法,运用于MIMO雷达中,通过研究多对收发天线之间的相位差异,运用MUSIC算法对波到达方向(Direction Of Arrival, DOA)进行估计,达到目标方位向定位的目标。所使用的天线对越多,该算法精度越高。他们还基于OFDM-MIMO体制的雷达通信一体化系统进行了研究^[60],由于OFDM信号对载频内失配较为敏感的特点,他们提出了相应的抗干扰措施,以提高系统稳定性。他们将OFDM-MIMO体制运用于车载雷达通信系统中^[61],并分析了相应的载频分配方法以充分利用空间分集对目标进行定位,提高估计精度,为了解决车载系统的多用户多通道环境的特殊问题,他们提出了相应的解决措施。电子科技大学的袁海峰等人^[62],利用在OFDM的多载频带来的频率分集,和MIMO技术通过阵元分布带来的空间分集,降低多径信号对消的概率,有效抑制了镜面反射多径干扰,经验证,OFDM-MIMO雷达体制能够带来目标检测性能的提高。新加坡的Kim等人^[63]提出一种利用MIMO雷达阵列结构来压缩栅瓣的算法,以解决DOA估计中的模糊问题。国防科技大学的Cheng等人^[64]将调频连续波SAR与正交多发波形结合起来,该发射信号结合了线性调频与OFDM波

形的优势。中国电子科技大学的Cheng等人^[65]对MIMO-OFDM雷达波形设计问题展开了研究,提出了基于直接序列扩频编码技术的OFDM-chirp信号设计方法,他们将这种方法称为扩频编码OFDM-chirp(Spread Spectrum Coding OFDM Chirp, SSCOC)信号,他们还分析了扩频编码长度、类型、信号带宽、脉宽对信号互模糊函数的影响,该信号具有超高分辨率,对于临近目标分辨有较大优势。大连科技大学的Lin等人^[66]充分利用了I-OFDM体制的载频间的正交性,并将该信号运用于均匀线性阵列(Uniform Linear Array, ULA)MIMO雷达中。

清华大学的孟藏珍等人^[67-70]针对同频码分正交信号发射波形的MIMO-SAR雷达因波形互耦合而产生的互相关噪声导致成像质量降低的问题展开了大量研究。他们对发射脉冲进行脉间相位调制^[67],以增加频率分集,并且在接收端进行距离-多普勒解耦滤波(Range-Doppler Decouple Filtering, RDDF)来进行多波形分割,该方法可以有效提高成像质量。他们又基于CLEAN方法分离多个正交波形^[68],以逐步获取单波形回波,该方法接近单波形SAR成像性能。进一步,提出了一种基于辅助变量设计接收滤波器的方法^[69],通过失配处理低距离旁瓣电平,从而达到抑制波形间互耦合而产生的互相关噪声,仿真实验表明,该方法可以有效抑制正交波形间的互相关噪声,改善综合积分旁瓣比。他们利用粒子群优化方法设计极化参数^[70],通过虚拟极化滤波的方法分离多正交波形回波,与传统的匹配滤波方法相比,互相关噪声大大降低。在这些方法都为OFDM-MIMO雷达提供了新的研究方向和发展思路。由于编码长度的限制,同频完全正交波形并不存在,而OFDM信号通过频率分集实现发射信号正交,因此并不受到编码长度的限制,可以达到发射信号完全正交,从信号波形设计角度解决了同频正交编码信号所固有的问题。由于码元宽度并不能无限制压缩,对于同频编码信号而言,其带宽和脉冲宽度是一对不可调和的矛盾,若想获得较大带宽,势必以牺牲脉宽为代价。而OFDM信号,每个子载频理论上均可被调制,因而在保证大带宽的情况下,可以获得较大脉冲宽度,保证了信号发射功率,获得了更大的作用距离。单频码分信号具有优良的测速测距性能,而OFDM信号易受到多普勒频偏的影响,载频间正交性受到破坏,因此还需要通过多普勒补偿的方式消除频偏带来的影响,这一方法还有待进一步研究。

OFDM信号还可以应用于无源雷达设计中,Berger等人^[71]研究了针对OFDM广播通信信号的

OFDM被动雷达检测旋转运动目标的方法,并研制了被动雷达试验系统进行了验证。武汉大学的Yi等人^[72]研究了一种新的分载波杂波抑制方法,该方法针对带循环前缀的正交频分复用信号所设计,能较好地克服单频网配置下,多径杂波和地杂波成倍增长的问题。Lehmann^[73]采用先跟踪再检测的原则,研究了多目标背景下OFDM雷达被动联合检测跟踪的问题,提出了一种递推贝叶斯滤波器。Arroyo等人^[74]针对被动处理合成孔径雷达WIMAX OFDM波形进行研究。德国的Searle等人^[75]研究了杂波环境下OFDM被动雷达的模糊处理方法,并实验证明了OFDM信号在被动雷达运用中的优越性能。武汉大学的赵志欣等人^[76]研究了载波频偏(Carrier Frequency Offset, CFO)对OFDM波形外辐射源雷达性能的影响,CFO会影响参考信号的重构误码率,从而影响时域杂波抑制和匹配滤波,CFO本身会对时域杂波抑制性能产生影响,另外,CFO估计误差还会影响目标的速度估计精度。

从众多文献可以看出,OFDM信号可应用于多种雷达体制,实现多种功能。针对传统的雷达目标检测、测速、成像等功能,OFDM信号处理的难点不在于其实现功能的理论方法,而在于其方法对比于传统雷达体制体现出来的优势。在某些方面,获得同样功能的效果可能OFDM雷达需要付出更大的代价,但其优势在于一种体制同时实现多种功能,如何使OFDM雷达成为集多种功能于一身的“全能型选手”将是未来研究的重点方向之一。另外,在新体制雷达方面,例如MIMO、多基地、通信雷达一体化系统等,OFDM信号体制均具有较多的优势和潜力,这是另一个研究的重点方向。虽然各种信号处理技术还未成熟,但随着研究的不断展开和深入,可以预计未来OFDM雷达将在多功能、新型雷达方向上占有重要的地位。

3.3 OFDM新体制雷达系统

美国迈阿密大学研制了超宽带SAR,并使其成为通信雷达一体化系统^[77],图5为其假想的应用场景,为多个无人机组成的侦察雷达网络,对复杂地形的目标进行探测与识别。图6为他们在实验室研制的OFDM超宽带SAR试验系统。德国Sturm等人^[78]也研究了OFDM雷达通信一体化系统,他们设计的雷达中心载频为24 GHz。Slimane等人^[79]设计了OFDM超宽带SAR穿墙成像雷达,工作在3 GHz,距离分辨率约为10 cm。法国ONERA(The French Aerospace Lab)成功研制了名叫HYCAM的超宽带数字雷达^[80],采用OFDM编码信号体制。如图7所示,它是一个高动态范围的数字系统,用

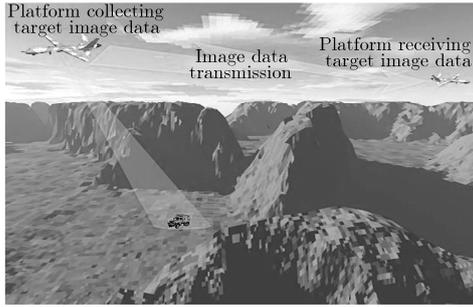


图 5 组网 OFDM 超宽带 SAR 的应用场景



图 6 OFDM 超宽带 SAR 试验系统

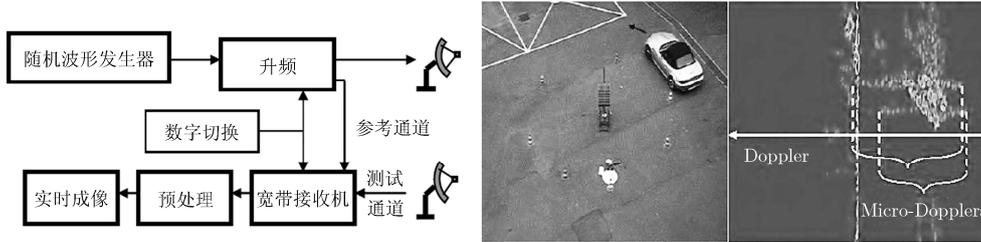


图 7 HYCAM 雷达结构图及其试验结果

来测量和实时分析时变目标的 RCS，带宽达到 8 GHz，距离分辨率为 1.8 cm。

Paichard 等人^[81]研究了 OFDM 组网雷达系统的发射编码信号及其特性，Lellouch 等人^[82]研究了支持通信的 OFDM 雷达网络的性能。美国 Stralka 等人^[83]研究了 OFDM 雷达系统在实际应用中的几个关键问题，包括收发装置、天线阵列、多径衰落等。另外，荷兰 Van Genderen 等人^[84]还研制了多载频 SFCW 雷达，同时发射 8 个子载频，用来探测地雷。美国华盛顿大学 Sen 等人^[85]提出了动目标检测的自适应 OFDM 雷达，能根据实际情况自适应设计下一时刻发射信号的频谱加权系数，提高雷达的动目标检测性能。Lellouch 等人^[86]还基于 OFDM 信号提出了一种结合频率捷变雷达和感知雷达的新概念雷达，指出 OFDM 信号体制在新概念雷达实现方面具有很大的优势。部分文献还将 OFDM 体制与 MIMO 体制结合，研究 OFDM-MIMO 新体制雷达的一些问题^[87-89]。

Kim 等人^[90]提出了一种 OFDM MIMO-SAR 系统，介绍了其调制与解调过程。Wang^[91]设计了一种多孔径天线 SAR 遥感系统，并采用多发多收的天线阵列和线性调频 OFDM 信号，获得了更宽成像带，提高了距离模糊压缩比。德国的 Reichardt^[92]和 Braun^[93]都将 IEEE 802.11p 标准下的 OFDM 信号作为雷达通信一体化系统的发射信号，实现了机动车辆间(Car-to-Car, C2C)的通信。Sturm 等人^[94]研究了无线通信和雷达探测一体化系统中的波形设计

和信号处理问题，并验证了雷达通信一体化系统的现实可行性。武汉大学的邵启红等人^[95]利用武汉大学研制的全数字化被动一体化高频地波雷达硬件平台，开展了短波通信与雷达探测一体化实验研究，证明了 OFDM 信号是一种性能良好的雷达通信一体化共享信号。空军预警学院的杨瑞娟等人^[96]分别研究了频多载波 Chirp 技术、OFDM 技术和扩频技术作为雷达通信共享信号的可行性和相关方案，并初步分析了共享信号雷达目标回波检测、数据调制解调方式以及相关性能。Braun 等人^[97]对 OFDM 雷达通信一体化网络进行了研究，网络中每一个节点均发射 OFDM 信号同时实现雷达和通信功能，为分析系统性能，他们将通信系统中常见的停机概念引入雷达系统中，并以停机概率作为性能指标。德国的 Koslowski 等人^[98]设计了一种滤波器组多载频(Filter Bank Multi-Carrier, FBMC)OFDM 雷达通信一体化系统，该系统被用于车载雷达通信应用中。

20 世纪 90 年代，西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室和中国电子科技集团第 38 所共同研制了一部米波稀布阵综合脉冲孔径雷达(Synthetic Impulse and Aperture Radar, SIAR)试验系统^[99]，该雷达采用稀布阵列天线，克服了米波雷达分辨率差的不足，通过各个阵元全向发射正交编码频率信号以使得各向同性照射，在接收端通过信号处理形成接收与发射波束。SIAR 系统是一种典型的 MIMO 雷达，多个天线同时发射相互正交的多载频信号，其发射信号采用了 OFDM 体制，实际上

是 OFDM 与 MIMO 的结合。SIAR 这种独特的体制和工作方式使其与常规雷达有许多不同之处,文献[93]探讨了将其应用于高频和微波波段的一些关键技术,但遗憾的是未进一步开展微波雷达的试验系统的工作。

从文献可以看出,国外研制了各种类型的 OFDM 雷达试验系统,开展了许多有意义的试验。国内在这方面还处于起步阶段。OFDM 新体制雷达系统在实现上还存在一些技术难点,例如信号发射多载频频率稳定度对系统的影响,大动态范围的线性功率放大器,大带宽情况下回波接收采集及处理问题等,每个环节都与雷达系统关系密切。但从发展过程上看,开展试验系统研究是新体制新技术从理论走向实用的必经环节,应在加强理论研究的同时积极开展 OFDM 雷达试验系统研制,攻克研制过程中的瓶颈技术,推动新体制雷达从理论走向实际应用。

4 OFDM 雷达的发展趋势及应用前景

通过总结和分析国内外研究现状可知,OFDM 新体制雷达的研究还不成熟,未来可以围绕波形设计、信号处理、试验系统、新体制雷达技术等几个方面开展研究。

(1)波形设计。在波形设计方面,不仅需要解决 PMEPR 较高这个问题,还要综合考虑实际应用中的其它需求。为了控制 OFDM 雷达发射波形的 PMEPR 小于 2,采用相位编码调制是一种较好的解决途径,通过初相加权和幅度加窗,能有效降低 PMEPR,但是同时带来了脉冲压缩旁瓣比较高的问题,特别是整数倍码元长度处的旁瓣较高,这就需要解决相位编码 OFDM 信号的旁瓣问题。脉冲压缩旁瓣低的优良编码前人已有丰富的研究成果,但是总的来说,性质优良的编码数目有限,而且编码长度也不能任意,无法满足实际应用的需求。因此,需要一体化考虑 PMEPR 改善、旁瓣抑制和编码数量长度的问题,建立 OFDM 雷达波形设计的系统完善的理论,并针对不同应用提出可行的设计方案。其中,编码优化设计算法是一个关键技术,也是研究热点,可以借鉴优化理论的成果,重点解决优化建模及寻优算法性能问题。

另外,如果将 OFDM 与 MIMO 相结合,如 SIAR 体制或者采用发射阵列体制,多个天线同时发射相互正交的多载频信号,每个天线只发射一个单载频或者一个调制信号,则可以绕开发射波形 PMEPR 的问题,但同时带来波束形成、相位补偿等其它方面的技术问题。将 OFDM 与认知雷达相结合,其中

的一个关键环节是自适应波形设计,需要根据具体应用场景开展研究。

(2)信号处理。在 OFDM 雷达信号处理方面,根据应用背景的不同可以研究不同的具体方向,例如目标检测、测速、SAR/ISAR 成像等。OFDM 信号体制同时具备距离和多普勒高分辨,因此具有一种信号体制同时实现多功能的潜力。OFDM 雷达信号处理最基本的两个研究点是脉冲压缩和多普勒处理:脉冲压缩是宽带回波处理的基础,经典的基于 FFT 的方法计算复杂度低,但对采样有较高要求,需要进一步研究性能更好的脉冲压缩方法;多普勒频移的处理是速度估计、动目标指示等多种功能的技术基础,其难点在于多普勒解模糊,特别是 OFDM 信号为宽带信号时,传统的多普勒频移的处理算法不再适用,需要研究新的算法。同时,还需要研究 OFDM 雷达回波处理中面临一些特殊问题,如速度补偿、脉冲压缩旁瓣抑制、多普勒频偏导致的子载频串扰等。

另外,目标检测的关键技术还涉及到杂波抑制、动目标检测、旁瓣抑制等。雷达成像方法也是宽带 OFDM 雷达的一个重要方向,除了传统的成像原理之外,新的研究热点包括 OFDM-MIMO 雷达的目标 ISAR 成像、稀疏成像、组网超宽带 SAR 成像、多波段融合成像、OFDM 被动雷达检测等前沿技术。更具有现实意义的是针对不同的应用场景,研究 OFDM 雷达实现多功能的技术,以克服现有多功能雷达采用宽窄交替波形导致的雷达资源不足。

(3)试验系统。搭建试验系统是推动 OFDM 新体制雷达从理论走向实际应用的必经环节。在 OFDM 雷达试验系统研究方面,有两条研究思路:一是开发半实物雷达模拟器,前端发射信号可采用 DDS 信号源产生,主要对关键器件和功能模块进行开发,这样做可以灵活设计和改进,较好节约成本,并验证关键技术和功能;二是直接研制雷达试验系统,可以在威力或者指标上进行缩减,但所有功能与实际雷达近似,这样可以更好地验证 OFDM 雷达的性能指标,获得实测试验数据,更利于雷达成品的研制和各项技术的验证。OFDM 雷达试验系统包含若干关键部件和核心功能,硬件包括大动态范围的线性放大器等元器件开发,算法包括各种信号处理技术,它是一项系统工程,需要研究者不断进行创新和攻关,通过循环反复的试验推动 OFDM 雷达新技术从试验系统走向成熟。

(4)新体制雷达技术。OFDM 体制可以与其它新体制雷达相结合,形成新概念、新体制、新技术。OFDM-MIMO 雷达是热点之一,实际上 MIMO 的

概念也是首先在通信领域中提出的,而且 OFDM-MIMO 技术也最早在通信领域开展研究。OFDM-MIMO 体制有很多优势,前面文献中有很多阐述,其应用也包括目标检测、定位、成像等多种功能,但也存在很多未解决的问题,其中一个很重要的同步技术,特别是稀布阵 MIMO,时间同步是其相参工作的前提。OFDM-MIMO 雷达还在阵列设计、波形设计、信号处理等方面均有大量的问题需要研究,有许多是跟 MIMO 体制共性的问题。

分布式组网 OFDM 雷达是一种很有潜力的雷达,其较易实现空-时-频-码 4 个域的分集,充分挖掘雷达的潜能;另外,由于 OFDM 本身可用于通信,因此在组网雷达中,可以很容易实现数据传输,将多部机载雷达通过这种通信雷达一体化系统组成侦察网络,实现网络化。基于 OFDM 信号的被动雷达也是研究的热点,OFDM 信号已广泛应用于 4G 移动通信网络,基于广播通信信号的被动雷达目标检测是重点区域低空防空和航空管控的途径之一;OFDM 雷达由于其信号设计灵活、易于控制等优点使其比较适合应用于感知雷达,但研究较多的是其自适应波形设计方面,对于如何进行感知环境和目标的变化问题仍然是感知雷达的核心问题有待解决。研究这些新雷达技术分支也具有前瞻性和创新性,但其最基本的波形设计和信号处理问题也必须先行突破。

从本质上说,OFDM 技术实际上是一种频率分集,如果与相位编码结合,就增加了一种编码分集,这对于我们常用的时间、空间分集是一个有力的拓展。OFDM 具备同时进行空-时-频-码域综合利用的潜力,可充分挖掘雷达的综合潜能。从雷达技术的发展趋势看,多功能、智能化、网络化代表着下一代雷达的特点,OFDM 雷达在这一发展潮流下有着先天的优势,虽然在实用化上面临着诸多工程上的难题,但随着技术的发展和研究的深入,难题终会获得突破和解决。OFDM 新体制雷达技术将在以下几个领域具有重要的应用前景:

(1)抗干扰。目前干扰的形式和手段多种多样,其中最典型的有源欺骗式干扰是基于数字射频存储器(Digital Radio Frequency Memory, DRFM)的转发式干扰。它依赖于对雷达信号的截获、侦收和精确复制。传统的雷达信号多为确定性信号,由于形式单一、参数简单,很容易被 ESM、有源干扰机等所截获。OFDM 雷达的波形设计灵活,易于捷变,相位编码 OFDM 信号更继承了相位编码雷达的低截获性能,是对抗这类干扰的有效途径之一。

(2)多功能。OFDM 雷达具有距离高分辨能力和

多普勒分辨能力,可采用这一种信号体制同时实现检测、测速、宽带成像等多种功能,避免了雷达窄窄交替的低效率工作模式。据报道美国最先进的 X 波段多功能前置雷达 FBX 具备高精度测距测速、跟踪、成像识别等多种功能,其发射的就是一种不同于传统雷达的复杂的新波形体制。另外,相位编码 OFDM 信号体制支持通信功能的开发,还有利于实现雷达、通信一体化。

(3)智能化。OFDM 雷达体制具有良好的智能化潜力,它的波形设计具有极大的灵活性,例如很容易设计信号频谱能量、带宽等,这是传统的线性调频、步进频等信号不能比拟的,并且波形易于产生和改变,可实现完全数字化存储和处理,为智能化雷达提供了良好的前提。

(4)网络化。雷达网络化是利用多部雷达相互合作实现远超过单部雷达的信息获取能力,其实现形式有多种,例如雷达分布式组网,OFDM-MIMO 新体制雷达等。当然,雷达网络化也面临着一些难题,例如雷达之间的同步性、相参性,多部雷达获取数据的处理方法等。值得一提的是,OFDM 雷达组网有一点优势其它体制不具备,就是 OFDM 相位编码信号在通信中的应用已非常成熟,能够实现同时具备雷达之间的数据传输通信能力,这在组网卫星、组网临近空间飞行器、组网无人机等雷达通信一体化平台的应用上具有较大潜力。

在雷达技术多功能、智能化、网络化的发展趋势下,OFDM 雷达技术具有广阔的应用前景。虽然当前只是刚刚开始,面临着一些困难,但相信通过雷达研究者的不懈努力,一定会在不久的将来取得令人鼓舞的成果。

参 考 文 献

- [1] Jankiraman M, Wessels B J, and van Genderen P. Design of a multifrequency FMCW radar[C]. The 28th European Microwave Conference, Amsterdam, 1998: 548-589.
- [2] Jankiraman M, Wessels B J, and van Genderen P. Pandora multifrequency FMCW/SFCW radar[C]. IEEE National Radar Conference, Alexandria, VA, USA, 2000: 750-757.
- [3] 佟学俭, 罗涛. OFDM移动通信技术原理与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 23-47.
- [4] Levanon N. Multifrequency complementary phase-coded radar signal[J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 2000, 147(6): 276-284.
- [5] Levanon N. Multifrequency radar signals[C]. IEEE International Radar Conference, Alexandria, VA, USA, 2000: 683-688.
- [6] Levanon N. Train of diverse multifrequency radar pulses[C].

- Proceedings of the IEEE International Radar Conference, Atlanta, GA, 2001: 93–98.
- [7] Levanon N. Multicarrier radar signal - pulse train and CW[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 707–720.
- [8] Levanon N. Multicarrier radar signals with low peak-to-mean envelope power ratio[J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(2): 71–77.
- [9] Levanon N and Mozeson E. Radar signals[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2004: 327–372.
- [10] Sverdlik M B and Levanon N. Family of multicarrier bi-phase radar signals represented by ternary arrays[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(3): 933–953.
- [11] Levanon N. Multifrequency signal structure for radar[P]. US Patent, US 6392588B1. 2002.05.21.
- [12] Ruggiano M and Van Genderen P. Radar and communication waveform: wideband ambiguity function and narrowband approximation[C]. IET International Conference on Radar Systems, Edinburgh, United Kingdom, 2007: 1–5.
- [13] 李自琦, 梅进杰, 胡登鹏, 等. 限幅法降低OFDM雷达通信一体化系统PAPR研究[J]. *雷达科学与技术*, 2014, 12(4): 406–410.
- Li Zi-qi, Mei Jin-jie, Hu Deng-peng, *et al.* Research on deliberate clipping for PAPR reduction of integrated radar and communication systems based on OFDM signals[J]. *Radar Science and Technology*, 2014, 12(4): 406–410.
- [14] Irukulapati N V, Chakka V K, and Jain A. SLM based PAPR reduction of OFDM signal using new phase sequence[J]. *IET Electronics Letters*, 2009, 45(24): 1231–1232.
- [15] Gupta Sudesh, Mishra Ravi Shankar, and Nema Rajesh. PAPR reduction in OFDM via separation of complex baseband signal[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2011, 16(4): 44–48.
- [16] Cheng Peng, Xiao Yue, Dan Li-lin, *et al.* Improved SLM for PAPR reduction in OFDM system[C]. The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication, Athens, Greece, 2007: 1–5.
- [17] Mohseni R, Sheikhi A, and Masnadi Shirazi M A. Constant envelope OFDM signals for radar applications[C]. Proceedings on IEEE Radar Conference, Rome, 2008: 453–457.
- [18] Wang Wen-qin, So H C, Huang Long-ting, *et al.* Low peak-to-average ratio OFDM chirp waveform diversity design[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Florence, Italy, 2014: 8351–8354.
- [19] Sebt M A, Norouzi Y, Sheikhi A, *et al.* OFDM radar signal design with optimized ambiguity function[C]. Proceedings of IEEE Radar Conference, Rome, 2008: 448–452.
- [20] Alimosaymer Mostafa and Mohseni Reza. Least square synthesis of WPM-OFDM radar signal[C]. 20th Telecommunications forum, Serbia, Belgrade, 2012: 847–850.
- [21] Alimosaymer Mostafa and Mohseni Reza. Systematic approach in designing wavelet packet modulation-orthogonal frequency division multiplexing radar signal by applying the criterion of least-squares[J]. *IET Signal Processing*, 2014, 8(5): 475–482.
- [22] Sen Satyabrata and Glover Charles W. Frequency adaptability and waveform design for OFDM radar space-time adaptive processing[C]. IEEE Radar Conference, Atlanta, 2012: 230–235.
- [23] Sen Satyabrata. OFDM radar space-time adaptive processing by exploiting spatio-temporal sparsity[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(1): 118–130.
- [24] Sen Satyabrata, Tang Gongguo, and Nehorai Arye. Designing OFDM Radar Waveform for Target Detection Using Multi-objective Optimization[M]. *Advances in Heuristic Signal Processing and Applications*, Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 35–61.
- [25] Sen Satyabrata. Adaptive OFDM radar waveform design for improved micro-Doppler estimation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(10): 3548–3556.
- [26] Sen Satyabrata. PAPR-constrained Pareto-optimal waveform design for OFDM-STAP radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(6): 3658–3669.
- [27] Luo Ying, Zhang Qun, Hong Wen, *et al.* Waveform design and high-resolution imaging of cognitive radar based on compressive sensing[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2012, 55(11): 2590–2603.
- [28] Sebt M A, Sheikhi A, and Nayebi M M. Orthogonal frequency-division multiplexing radar signal design with optimised ambiguity function and low peak-to-average power ratio[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2009, 3(2): 122–132.
- [29] Mohseni R, Sheikhi A, and Masnadi Shirazi M A. UWB radars based on wavelet packet OFDM signals[C]. Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Hannover, 2008, 2: 89–92.
- [30] Mohseni R, Sheikhi A, and Masnadi Shirazi M A. Wavelet packet based OFDM radar signals[C]. Proceedings of the 2008 International Conference on Radar, Adelaide, 2008: 579–584.
- [31] Guo T and Qiu R. OFDM waveform design compromising spectral nulling, side-lobe suppression and range resolution [C]. IEEE Radar Conference, Cincinnati, USA, 2014: 1424–1429.

- [32] Mohseni R, Sheikhi A, and Masnadi Shirazi M A. A new approach to compress multicarrier phase-coded signals[C]. Proceedings of IEEE Radar Conference, Rome, 2008: 442-447.
- [33] Mohseni R, Sheikhi A, and Shirazi M A Masnadi. Compression of multicarrier phase-coded radar signals with low sampling rate[C]. Proceedings of the 2008 International Conference on Radar, Adelaide, 2008: 718-721.
- [34] Lellouch G, Mishra A, and Inggs M. Impact of the Doppler modulation on the range and Doppler processing in OFDM radar[C]. IEEE Radar Conference, Cincinnati, USA, 2014: 803-808.
- [35] Lellouch G, Pribic R, and Van Genderen P. Wideband OFDM pulse burst and its capabilities for the doppler processing in radar[C]. Proceedings of the 2008 International Conference on Radar, Radar 2008, Adelaide, SA, Australia, 2008: 531-535.
- [36] Lellouch Gabriel, Pribic Radmila, and Van Genderen Piet. Frequency agile stepped OFDM waveform for HRR[C]. 2009 International Waveform Diversity and Design Conference Proceedings, Kissimmee, 2009: 90-93.
- [37] Franken G E A, Nikookar H, and Van Genderen P. Doppler tolerance of OFDM-coded radar signals[C]. 3rd European Radar Conference, Manchester, 2006: 108-111.
- [38] Tigrek R F, De Heij W J A, and Van Genderen P. Multi-carrier radar waveform schemes for range and Doppler processing[C]. IEEE National Radar Conference-Proceedings, Pasadena, CA, USA, 2009: 1-5.
- [39] Tigrek R F, De Heij W J A, and Van Genderen P. Solving Doppler ambiguity by Doppler sensitive pulse compression using multi-carrier waveform[C]. 2008 5th European Radar Conference Proceedings, Amsterdam, The Netherlands, 2008: 72-75.
- [40] Firat T R, De Heij Wim J A, and Van Genderen Piet. OFDM signals as the radar waveform to solve Doppler ambiguity[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(1): 130-143.
- [41] Turlapaty A, Jin Yuan-Wei, and Xu Yang. Range and velocity estimation of radar targets by weighted OFDM modulation[C]. IEEE Radar Conference, Cincinnati, USA, 2014: 1358-1362.
- [42] Kashin V A and Mavrychev E A. Target velocity estimation in OFDM radar based on subspace approaches[C]. 14th International Radar Symposium, Dresden, Germany, 2013: 1061-1066.
- [43] Fink Johannes, Braun Martin, and Jondral Friedrich K. Effects of arbitrarily spaced subcarriers on detection performance in OFDM radar[C]. IEEE Vehicular Technology Conference, Quebec City, Canada, 2012: 1-5.
- [44] Kafshgari Shaghayegh and Mohseni Reza. Fluctuating target detection in presence of non Gaussian clutter in OFDM radars[J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 2013(67): 885-893.
- [45] Bufler Travis D and Garmatyuk Dmitriy S. Image-based target detection with multispectral UWB OFDM radar[J]. *Radar Sensor Technology*, 2012, 8361: 1-10.
- [46] Ruggiano Mayazzurra, Stolp Emiel, and Van Genderen Piet. Performance of reiterated LMMSE filtering and coded radar waveforms[C]. Proceedings of the 5th European Radar Conference, Amsterdam, 2008: 132-135.
- [47] Ruggiano Mayazzurra, Stolp Emiel, and Van Genderen Piet. Resolution and unmasking of CLEAN and LMMSE algorithms using coded waveforms[C]. International Conference on Radar, Adelaide, Australia, 2008: 374-379.
- [48] Ruggiano Mayazzurra, Stolp Emiel, and Van Genderen Piet. Multi-target performance of LMMSE filtering in radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(1): 170-179.
- [49] 顾陈, 张劲东, 朱晓华. 基于OFDM的多载波调制雷达系统信号处理及检测[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(6): 1298-1300. Gu Chen, Zhang Jin-Dong, and Zhu Xiao-Hua. Signal processing and detecting for multicarrier modulated radar system based on OFDM[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(6): 1298-1300.
- [50] Gu Wen-kun, Wang Dang-wei, and Ma Xiao-yan. High speed moving target detection using distributed OFDM- MIMO phased radar[C]. 12th International Conference on Signal Processing, Hangzhou, China, 2014: 2087-2091.
- [51] Schuerger Jonathan and Garmatyuk Dmitriy. Multifrequency OFDM SAR in presence of deception jamming[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, 2010: 1-14.
- [52] Riche V, Meric S, Baudais J Y, et al. Investigations on OFDM signal for range ambiguity suppression in SAR configuration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4194-4197.
- [53] Wang Wen-qin. Mitigating range ambiguities in high-PRF SAR with OFDM waveform diversity[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(1): 101-105.
- [54] Buhari M D and Muqaibel A H. SAR multiple targets imaging using UWB OFDM signals[C]. 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing, Manchester, 2014: 485-490.
- [55] 王杰, 梁兴东, 丁赤飏, 等. OFDM SAR多普勒补偿方法研究[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(12): 3037-3040. Wang Jie, Liang Xing-dong, Ding Chi-biao, et al. Investigation on the Doppler compensation in OFDM SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013,

- 35(12): 3037-3040.
- [56] Zhang Tian-xian, Xia Xiang-gen, and Kong Ling-jiang. IRCI free range reconstruction for SAR imaging with arbitrary length OFDM pulse[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(18): 4748-4759.
- [57] Zhang Tian-xian and Xia Xiang-gen. OFDM synthetic aperture radar imaging with sufficient cyclic prefix[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(1): 394-404.
- [58] Cao Yun-he and Xia Xiang-gen. IRCI-free MIMO-OFDM SAR using circularly shifted zadoff-chu sequences[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015: 1-5.
- [59] Sit Yoke Leen, Sturm Christian, Baier Johannes, *et al.* Direction of arrival estimation using the MUSIC algorithm for a MIMO OFDM radar[C]. *IEEE Radar Conference*, Atlanta, 2012: 226-229.
- [60] Sit Y L and Zwick T. MIMO OFDM radar with communication and interference cancellation features[C]. *IEEE Radar Conference*, Cincinnati, USA, 2014: 265-268.
- [61] Sit Y L and Zwick T. Automotive MIMO OFDM radar: Subcarrier allocation techniques for multiple-user access and DOA estimation[C]. *11th European Radar Conference*, Rome, Italy, 2014: 153-156.
- [62] 袁海峰, 江朝抒. OFDM-MIMO雷达体制的多径抑制性能分析[J]. *信号处理*, 2012, 28(7): 1000-1005.
Yuan Hai-feng and Jiang Chao-shu. Performance of OFDM-MIMO radar for multipath suppression[J]. *Signal Processing*, 2012, 28(7): 1000-1005.
- [63] Kim Chee Wee, Luo Bin, Liang Ying-chang, *et al.* MIMO-OFDM radar array configuration for resolving DOA ambiguity[C]. *IEEE ICCS*, 2012: 85-89.
- [64] Cheng Pu, Wang Zhan, Xin Qin, *et al.* Imaging of FMCW MIMO radar with interleaved OFDM waveform[C]. *12th International Conference on Signal Processing*, Hangzhou, China, 2014: 1944-1948.
- [65] Cheng Sheng-juan, Wang Wen-qin, and Shao Huai-zong. MIMO OFDM chirp waveform design with spread spectrum modulation[C]. *IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing*, 2014: 208-211.
- [66] Lin Zhi-bin, Zhang Li-li, and Wang Zong-bo. Interleaved OFDM signals for multi-input multi-output radar[C]. *11th European Radar Conference*, Rome, Italy, 2014: 21-24.
- [67] Meng Cang-zhen, Xu Jia, Xia Xiang-gen, *et al.* MIMO-SAR waveform separation based on inter-pulse phase modulation and range-Doppler decouple filtering[J]. *IET Electronics Letters*, 2013, 49(6): 420-422.
- [68] 孟藏珍, 许稼, 王立宝, 等. 基于Clean处理的MIMO-SAR正交波形分离[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(12): 2809-2814.
- Meng Cang-zhen, Xu Jia, Wang Li-bao, *et al.* An orthogonal waveform separation method based on Clean processing in MIMO-SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(12): 2809-2814.
- [69] 孟藏珍, 许稼, 花良发, 等. 基于接收滤波器设计的MIMO-SAR波形耦合抑制[J]. *电波科学学报*, 2014, 29(3): 401-407.
- Meng Cang-zhen, Xu Jia, Hua Liang-fa, *et al.* MIMO-SAR waveform coupling suppressing based on design of receiver filter[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(3): 401-407.
- [70] Meng Cang-zhen, Xu Jia, Xia Xiang-gen, *et al.* MIMO-SAR waveforms separation based on virtual polarization filter[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2015, 58(4): 1-12.
- [71] Berger Christian R, Demissie Bruno, Heckenbach Joerg, *et al.* Signal processing for passive radar using OFDM waveforms[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2010, 4(1): 226-238.
- [72] Yi Jian-xin, Wan Xian-rong, Zhao Zhi-xin, *et al.* Subcarrier-based processing for clutter rejection in CP-OFDM signal-based passive radar using SFN configuration[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(1): 1-13.
- [73] Lehmann Frederic. Recursive bayesian filtering for multitarget track-before-detect in passive radars[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(3): 2458-2480.
- [74] Arroyo Jose R, Gutierrez, and Jackson Julie Ann. WiMAX OFDM for passive SAR ground imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(2): 945-959.
- [75] Searle S, Palmer J, Davis L, *et al.* Evaluation of the ambiguity function for passive radar with OFDM transmissions[C]. *IEEE Radar Conference*, Cincinnati, USA, 2014: 1040-1045.
- [76] 赵志欣, 万显荣, 谢锐, 等. 载波频偏对正交频分复用波形外辐射源雷达性能的研究[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(4): 871-876.
Zhao Zhi-xin, Wan Xian-rong, Xie Rui, *et al.* Impact of carrier frequency offset on passive bistatic radar with orthogonal frequency division multiplexing waveform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(4): 871-876.
- [77] Garmatyuk Dmitriy, Schuerger Jonathan, Kauffman Kyle, *et al.* Wideband OFDM system for radar and communications [C]. *IEEE National Radar Conference-Proceedings*, Pasadena, CA, USA, 2009: 1-6.
- [78] Sturm Christian, Zwick Thomas, and Wiesbeck Werner. An OFDM system concept for joint radar and communications operations[C]. *IEEE Vehicular Technology Conference*, Barcelona, Spain, 2009: 1-5.

- [79] Slimane Z, Abdelmalek A, and Feham M. OFDM based UWB synthetic aperture through-wall imaging radar[C]. The 3rd International Conference on Broadband Communications, Information Technology & Biomedical Applications, Gauteng, 2008, 23: 293-300.
- [80] Paichard Yoann, Castelli Juan Carlos, Dreuillet Philippe, *et al.*. HYCAM: a RCS measurement and analysis system for time-varying targets[C]. Instrumentation and Measurement Technology Conference, Sorrento, Italy, 2006: 921-925.
- [81] Paichard Yoann. Orthogonal multicarrier phased coded signal for netted radar systems[C]. 2009 International Waveform Diversity and Design Conference Proceedings, WDD 2009, Kissimmee, FL, USA, 2009: 234-236.
- [82] Lellouch G and Nikookar H. On the capability of a radar network to support communications[C]. 14th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux, Delft, 2007: 1-5.
- [83] Stralka John P and Meyer Gerard G L. OFDM-based wideband phased array radar architecture[C]. IEEE Radar Conference, Adelaide, 2008: 1892-1897.
- [84] Van Genderen P. Multi-waveform SFCW radar[C]. 33rd European Microwave Conference, Munich, Germany, 2003: 849-852.
- [85] Sen Satyabrata, Hurtado Martin, and Nehorai Arye. Adaptive OFDM radar for detecting a moving target in urban scenarios[C]. 2009 International Waveform Diversity and Design Conference Proceedings, WDD 2009, Kissimmee, FL, USA, 2009: 268-272.
- [86] Lellouch Gabriel, Pribic Radmila, and Van Genderen Piet. Merging frequency agile OFDM waveforms and compressive sensing into a novel radar concept[C]. 6th European Radar Conference, Rome, Italy, 2009: 137-140.
- [87] Qin G D, Chen B X, and Chen D F. A new method for velocity estimation in multi-carrier-frequency MIMO radar [C]. IET Conference Publications, Guilin, China, 2009: 216.
- [88] Yang M L, Chen B X, Qin G D, *et al.*. High range resolution based on multi-carrier-frequency MIMO radar[C]. IET Conference Publications, Guilin, China, 2009: 407.
- [89] Wu X H, Kishk A A, Glisson A W. MIMO-OFDM radar for direction estimation[J]. *IET Radar Sonar & Navigation*, 2010, 4(1): 28-36.
- [90] Kim Jung-hyo, Younis Marwan, Moreira Alberto, *et al.*. A novel OFDM chirp waveform scheme for use of multiple transmitters in SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 10(3): 568-572.
- [91] Wang Wen-qin. Wide-swath SAR remote sensing using a multiaperture antenna with waveform diversity[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(12): 4142-4155.
- [92] Reichardt Lars, Sturm Christian, Grunhaupt Frank, *et al.*. Demonstrating the use of the IEEE 802.11P Car-to-Car communication standard for automotive radar[C]. 6th European Conference on Antennas and Propagation, Prague, 2011: 1576-1580.
- [93] Braun Martin, Fuhr Manuel, and Jondral Friedrich K. Spectral estimation-based OFDM radar algorithms for IEEE 802.11a signals[C]. IEEE Vehicular Technology Conference, Quebec City, Canada, 2012: 1-5.
- [94] Sturm Christian and Wiesbeck Werner. Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(7): 1236-1259.
- [95] 邵启红, 万显荣, 张德磊, 等. 基于OFDM波形的短波通信与超视距雷达集成实验研究[J]. *雷达学报*, 2012, 1(4): 370-379.
- Shao Qi-hong, Wan Xian-rong, Zhang De-lei, *et al.*. Experimental study on shortwave communication and OTHR integrated system based on OFDM waveform[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(4): 370-379.
- [96] 杨瑞娟, 陈小民, 李晓柏, 等. 雷达通信一体化共享信号技术研究[J]. *空军预警学院学报*, 2013, 27(1): 39-43.
- Yang Rui-juan, Chen Xiao-min, Li Xiao-bai, *et al.*. Study of signal sharing technologies for integration of radar and communication systems[J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2013, 27(1): 39-43.
- [97] Braun Martin, Tanbourgi Ralph, and Jondral Friedrich K. Co-channel interference limitations of OFDM communication-radar networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2013(1): 1-16.
- [98] Koslowski S, Braun M, and Jondral F K. Using filter bank multicarrier signals for radar imaging[C]. IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Monterey, California, USA, 2014: 152-157.
- [99] 陈伯孝, 吴剑旗. 综合脉冲孔径雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 1-234.
- 霍 凯: 男, 1983 年生, 博士, 讲师, 研究方向为雷达波形设计与信号处理.
- 赵晶晶: 女, 1990 年生, 硕士生, 研究方向为空间信息获取与处理技术.