

文章编号:1004-9037(2014)04-0584-06

OFDM 雷达信号源设计与实现

张 卫 薄 超 顾 红 苏卫民

(南京理工大学电子工程与光电技术学院,南京,210014)

摘要:为了验证正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplex, OFDM)信号雷达的可行性,本文在研究信号产生原理和波形设计方法的基础上,提出了一种基于现场可编程门阵列技术和快速傅里叶变换算法的雷达信号实时产生方案。该方案采用数字可编程技术实现正交多载波调制,信号参数和调制方式具有可重配置的特点,满足多种场合的应用要求。本文针对 OFDM 信号产生的关键步骤展开讨论,并给出测试结果。外场试验验证了该方案的可行性。

关键词:正文频分复用;雷达信号源;现场可编程门阵列

中图分类号:TN95

文献标志码:A

Design and Realization of OFDM Radar Signal Generator

Zhang Wei, Bo Chao, Gu Hong, Su Weimin

(School of Electronic Engineering and Optical Electronic, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, China)

Abstract: To address the feasibility of orthogonal frequency division multiplex (OFDM) radar signal, a real-time OFDM radar signal generator based on field programmable gate array (FPGA) and fast Fourier transform (FFT) algorithm is proposed on research of synthesis and waveform design. Orthogonal multi-carrier modulation is implemented with digital signal processing approach. Signal parameters and the modulation scheme are reconfigurable, and can be adapted to different applications and platforms. The design principle and key steps involved in OFDM signal generation are discussed, and test results are provided. Test shows the feasibility of the OFDM signal generator, which is fundamental for theoretical research and application of OFDM radar systems.

Key words: orthogonal frequency division multiplex; radar signal generator; field programmable gate array

引 言

正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplex, OFDM)是一种正交多载波调制技术。OFDM 信号雷达就是以 OFDM 调制信号作为发射波形的一种雷达体制。该雷达体制的基本思想在于将系统可用频带分割成若干个相邻子频带,每个子频带的中心设置一路子载波信号。对各子载波信号的相位和幅度进行调制,将已调子载波信号

进行合成,得到最终的正交多载波调制信号,即 OFDM 调制信号。

作为一种复杂调制的雷达信号波形,OFDM 信号不容易被侦察接收机截获,具有低截获概率的特点。它可以在干扰频点实施零陷,实现频谱和功率管理,达到抑制射频干扰的目的。由于 OFDM 技术在通信系统中广泛应用,使得 OFDM 信号雷达也具有无线通信的潜力。因此 OFDM 信号雷达是能兼顾雷达和通信的功能的一种新体制雷达。

传统的多载波调制使用多个模拟调制器分别

在不同的子载波上进行信号调制,并使用模拟滤波器来保证载波之间干扰最小化^[1]。随后又出现一种采用离散傅里叶变换实现正交多载波调制与解调的方法,成为 OFDM 技术的最初原型^[2]。20 世纪 90 年代,随着数字集成电路技术的快速发展,OFDM 技术在通信系统中得到了广泛应用^[3]。

波形设计和产生技术是 OFDM 信号雷达实现工程应用的关键技术之一。传统的模拟调制技术使得系统比较复杂,特别是在子载波数较多的情况下,系统稳定性和可靠性得不到保证^[4-5]。直接数字频率合成技术(Direct digital synthesizer, DDS)可以进行频率、相位及幅度的调制,但仅限于单个载波调制的场合^[6-8]。宽带 LFM 信号通常采用 DDS 技术实现^[8]。现场可编程门阵列(Field programmable gate array, FPGA)技术极大提高了系统的灵活性,获得了越来越多的应用^[9]。离散傅里叶变换可以等效为窄带滤波器组,适合于处理多子带信号^[10]。OFDM 雷达信号模糊函数与调制信号之间存在对应关系,可以通过对调制序列的设计达到雷达波型设计的效果^[11]。OFDM 雷达信号回波包含目标速度信息,可以进行多普勒处理^[10,12]。

本文针对 OFDM 信号调制的特点,给出一种基于 FPGA 技术和快速傅里叶逆变换(Inversed fast fourier transform, IFFT)算法的 OFDM 雷达信号实时产生方案,使用数字技术实现正交多载波调制。由于采用了全数字技术,在简化系统设计的同时保证了可靠性。信号参数和调制方式具有可重配置的特点,可以适应不同场合的应用需求。

1 OFDM 基本原理

在 OFDM 系统中,信号频谱被分割成为若干等间隔的子频带,每个子频带分别对应一路子载波信号,调制信号分别对各路子载波进行调制。在数学上,OFDM 信号可以表示为多路已调信号的和式

$$s(t) = \frac{1}{P} \sum_{k=0}^{P-1} s_k(t), 0 \leq t \leq T \tag{1}$$

式中: P 为有效子载波数, T 为信号持续时间; $s_k(t)$ 为第 k 路子载波对应的已调信号,如式(2)所示。

$$s_k(t) = c_k e^{j2\pi f_k t} \tag{2}$$

其中: c_k 为复调制序列; f_k 为第 k 路子载波信号频率; j 为虚数单位。为了满足正交性要求,通常取 $f_k = f_c + k\Delta f$, f_c 为载波频率, Δf 为子载波间隔,且满足 $T\Delta f = 1$ 。信号带宽为 $B = P\Delta f$ 。

基带信号表达式如式(3,4)所示。

$$s(t) = \frac{1}{P} \sum_{k=0}^{P-1} s_k(t), 0 \leq t \leq T \tag{3}$$

$$s_k(t) = c_k e^{j2\pi k \Delta f t} \tag{4}$$

将式(4)代入式(3),以间隔 T/P 对 $s(t)$ 进行采样,并利用正交性条件进行化简,得到 OFDM 基带信号的离散表达式,如式(5)所示。

$$x(n) = \frac{1}{P} \sum_{k=0}^{P-1} c_k e^{j\frac{2\pi}{P}nk} \tag{5}$$

式(5)刚好是离散傅里叶逆变换(Inversed discrete fourier transform, IDFT)的表达式。OFDM 基带信号的离散采样序列为调制序列的离散傅里叶逆变换输出。利用 IFFT 算法对调制序列进行变换,可提高计算效率。离散时间信号经过脉冲成型得到连续时间信号,如式(6)所示。

$$\begin{aligned} \hat{s}(t) &= \sum_{n=0}^{P-1} x(n) p(t - n \frac{T}{P}) = \\ &= \sum_{n=0}^{P-1} \left(\frac{1}{P} \sum_{k=0}^{P-1} c_k e^{j\frac{2\pi}{P}nk} \right) p(t - n \frac{T}{P}) \end{aligned} \tag{6}$$

式中: $\hat{s}(t)$ 为脉冲成型滤波器的输出, $p(t)$ 为脉冲成型滤波器的冲激响应。选取适当 $p(t)$,可以得到原始连续时间信号 $s(t)$,证明如下。

令

$$\begin{aligned} p(t) &= e^{j\pi t} \frac{\sin \frac{\pi P}{T} t}{P \sin \frac{\pi}{T} t} = \\ &= \frac{1}{P} \sum_{l=0}^{P-1} e^{j2\pi \frac{l}{P} t} \end{aligned} \tag{7}$$

将式(7)代入式(6)并交换求和顺序

$$\begin{aligned} \hat{s}(t) &= \sum_{k=0}^{P-1} \left(c_k \frac{1}{P} \sum_{l=0}^{P-1} \left(e^{j2\pi \frac{kl}{P}} \frac{1}{P} \sum_{n=0}^{P-1} e^{j2\pi \frac{nl(k-l)}{P}} \right) \right) = \\ &= \frac{1}{P} \sum_{k=0}^{P-1} c_k e^{j2\pi \frac{k}{P} t} = s(t) \end{aligned} \tag{8}$$

证毕。在实际电路中,上述脉冲成型滤波器通常由低通滤波器近似实现。

由分析可知,采用 FFT 快速算法产生 OFDM 调制信号应包含几个基本组成单元,即调制序列发生器、串并转换器、IFFT 变换器、并串转换器、数模转换器以及脉冲成型滤波器等,其原理框图如图 1 所示。

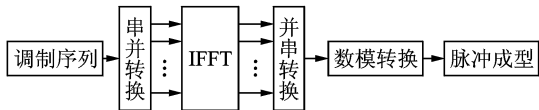


图 1 OFDM 信号产生原理

Fig. 1 OFDM signal generating principle

序列发生器产生调制序列并送入串并转换器。串并转换器将串行序列转换为并行的码字送给 IFFT 变换器。并行码字进入 IFFT 变换器后,经过计算得到数字基带信号样本。再经并串转换后送给数模转换器,得到模拟脉冲串。最后经过脉冲成型器,得到模拟基带信号。除了图 1 中所示的基本功能单元外,在实现 OFDM 雷达信号发射前还需要滤波、频谱搬移、功率放大等电路。在实际应用中,需要综合考虑系统指标要求、硬件水平及实现的成本。

2 OFDM 雷达信号源方案设计

本设计要求实现 OFDM 信号源的实时产生,对系统的实时性和吞吐率以及可编程提出了较高要求,同时应尽量减小输出延迟。当前数字信号处理主要采用数字信号处理器技术(Digital signal processor, DSP)和 FPGA 技术。DSP 采用基于程序存储执行机制超哈佛流水线结构,适合于包含较多条件判断和分支跳转的复杂算法的信号处理应用。而 FPGA 则基于数字逻辑电路的并行执行机构,适合算法结构简单、并行化程度高的信号处理应用场合。考虑到系统实时性要求以及 IFFT 算法的特点,本设计拟采用基于 FPGA 技术的方案,以充分利用 FPGA 内部丰富的逻辑资源和计算资源,并发挥其可编程的特点,将 OFDM 信号产生电路的数字信号处理部分完全在 FPGA 内部实现。外围辅以通信接口电路、时钟管理电路、数模转换电路以及信号调理电路等。本设计的系统框图如图 2 所示。

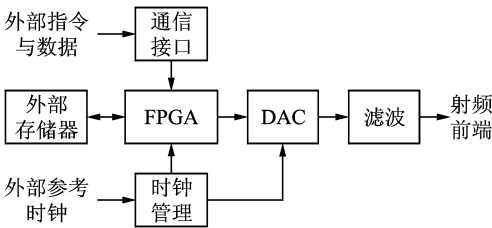


图 2 OFDM 雷达信号源系统

Fig. 2 OFDM radar signal generating system

通信接口单元负责接收来自外部控制端的指令和数据,包括信号源带宽时宽的设置等参数,并将系统的各种诊断和状态信息回传到外部控制端,实现系统的在线监测和管理。时钟管理单元以内部参考时钟或外部参考时钟为基准,提供系统各功能模块所需的不同频率时钟信号。

FPGA 是整个设计的核心,在完成数字信号样本产生的同时,还负责系统控制。产生的数字信号样本经数模转换单元得到模拟信号,送给信号调理单元进一步处理。信号调理单元的主要功能是滤波和放大,输出满足一定的频谱和功率电平要求的信号给射频前端。经射频前端进一步处理后,由发射天线辐射出去。

FPGA 数字信号处理的主要任务是产生 OFDM 雷达信号的数字样本,主要功能模块包括调制序列发生器、序列预处理、OFDM 调制器、波形预补偿和数字正交上变频。其原理框图如图 3 所示。

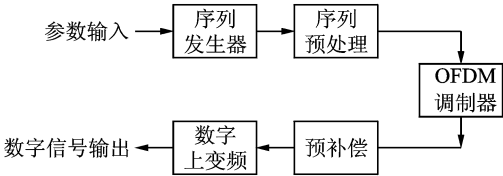


图 3 数字信号产生模块

Fig. 3 Digital signal generating module

序列发生器根据给定的参数产生调制序列,或者直接输出给定的调制序列,送给预处理单元。序列预处理主要完成对序列补零和占位等操作。OFDM 调制器实现正交多载波调制,包括串并转换、IFFT、并串转换以及可选的循环前缀等。预补偿也叫预失真,对信号经过后级电路时引起的失真进行预补偿。数字上变频负责将数字基带信号上变频得到数字中频信号。

下面对 OFDM 信号产生的关键步骤进行讨论。

2.1 调制序列产生

OFDM 调制器对序列的类型没有特殊要求,调制序列可以是任意实序列或者复序列。在雷达信号处理中常用的序列包括巴克码序列、以 M 序列为代表的伪随机序列、随机噪声序列以及多相码序列等,均可以作为调制序列产生相应的 OFDM 雷达信号。

目前已知的二相巴克码序列最大长度仅 13 位,只需将对应长度的巴克码序列依次保存在存储器中,需要时顺序输出即可。

M 序列发生器主要由线性反馈移位寄存器(Linear feedback shift register, LFSR)构成,电路比较简单且容易实现。移位寄存器阶数决定了序列的最大周期长度,反馈系数决定了序列的特性。需要指出的是,只有特定的反馈系数才能生成最大

长度序列,即 M 序列。

随机噪声序列的发生器电路稍微比较复杂,需要根据不同的概率密度函数设计发生器结构,但无论采用哪种结构,都离不开均匀分布的随机数的产生。

多相码序列主要有 Frank 码、P1/P2 码、Zad-off-Chu 码、P3/P4 码以及 Golomb 码等。多相码的主要特点是,其相位历程由特定的函数给出,且相位函数的结构比较简单,可以用基本的乘加电路实现。通过查表法或三角函数由相位值得到幅度值输出。

2.2 OFDM 调制器

OFDM 属于一种频分复用技术,是多载波调制的一种方式。OFDM 调制器主要包括串并转换、IFFT 变换及并串转换。由于调制序列是串行序列,而 FFT 变换则是基于蝶形流图的并行计算,因而变换开始前需要对码字进行串并转换。变换后的结果经过并串转换,作为数字信号送给下一级处理。串并转换与并串转换实现方法比较简单,把串行数据依次写入到指定存储单元,或者把存储器中的数据顺序读出。而 FFT 变换单元是实现的关键,可以按照时域抽取或频域抽取的结构,或者直接采用 IP 核实现。

2.3 脉冲成型技术

脉冲成型是指将脉冲串信号经过成型滤波器得到带限信号的过程。脉冲串信号的频谱表现为基带信号频谱的周期性延拓,延拓周期与脉冲串时间间隔成反比。通常采用低通滤波器滤除高次谐波,保留基带信号分量,达到脉冲成型的效果。理想低通滤波器幅频响应具有矩形截止特性,属于物理不可实现系统,设计时需要进行折衷考虑。在滤波器幅频特性的通带与阻带之间设置过渡带,该过渡带宽度与滤波器的阶数成反比关系。脉冲成型滤波器过渡带必需介于基带频谱宽度与脉冲串频率之间。

为了获得更好的信号质量,可以采用数字脉冲成型技术。在数字基带信号相邻样本点之间插入零值,送给数字脉冲成型滤波器,得到过采样后的数字基带信号。数字脉冲成型同样要考虑滤波器设计的问题,选择合适的过渡带宽度和滤波器阶数。对于 OFDM 信号,通常需要对 IFFT 变换前的码字补零,使其长度为 2 的整数次幂,利用快速算法进行计算。补零后码字与信号频谱对应关系与如图 4 所示。

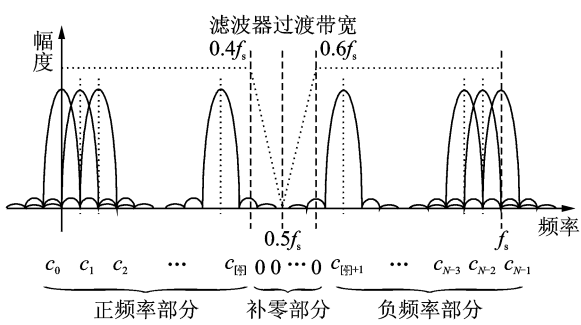


图 4 码字补零示意图

Fig. 4 Code zero-filling demonstration

通常取数模转换速率 f_s 的 0.4 倍作为模拟输出信号频率上限,剩余部分作为滤波器过渡带宽。考虑到频谱对称性,滤波器过渡带宽与输出信号带宽关系如图 4 所示。对应地,FFT 变换前的码字序列约有 20% 的码字为零,即补零长度至少为原码字序列长度的 1/4。调制序列长度为 P ,则 IFFT 变换长度 N 为

$$N = 2^{\lceil \log_2(P+P/4) \rceil} + 1 \tag{9}$$

式中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示取整操作。

信号带宽 B 与采样率 f_s 的关系为

$$B = f_s * P/N \tag{10}$$

对 OFDM 调制前的码字补零可以看作是脉冲成型的一种频域实现方式。

2.4 实时性分析

本设计采用 Xilinx 公司 Virtex-4 SX55 系列 FPGA,其内部有大量乘法器资源,每个乘法器都可以在单个周期内完成乘加操作,适合高速信号处理应用。当采用 LogiCORE™ IP 核实现 FFT/IFFT 运算时,其典型参数如表 1 所示。

表 1 典型参数

Table 1 Typical parameters

计算长度	1K	32K
实现结构	基 4 抽取	基 4 抽取
数据位宽	16	16
时钟频率	291 MHz	238 MHz
延迟周期	3 446	131 256

对于雷达信号,重要的信号参数包括带宽、时宽、脉冲重复频率以及时间带宽积等。对于 OFDM 雷达信号,信号时宽带宽积受限于 IFFT 变换长度,即 $P < N$;时钟频率决定了信号带宽的上限,即 $B < f_s$ 。数据位宽决定了杂散电平,延迟时钟周期影响系统输出延迟。

2.5 资源开销

FPGA 实现的 FFT 变换器,其资源开销与参

数密切相关。当采用表 1 所示的典型参数时,其对应的资源开销如表 2 所示。

表 2 FPGA 资源开销

Table 2 FPGA resource utilization		
计算长度	1k	32k
实现结构	基 4	基 4
数据位宽	16	16
查找表数	2 692	3 420
块存储器数	7	84
乘法器数	9	9

FPGA 内部资源主要包括查找表(Look-up table, LUT)、块存储器(Block RAM, BRAM)和乘法器等。在设计时有两个优化目标可供选择,即速度优化和资源优化。速度优化的目标是使运行时钟频率最高,可能消耗较多的资源。资源优化的目标是减小资源开销,其代价是时钟频率略有下降。

FFT 变换器的时钟频率决定了输入输出样本速率,也就决定输出信号的最大带宽。因此上述典型参数下,最大可以产生 291 MHz 的宽带信号。对于宽带 OFDM 信号的实时产生,一方面可以提高 FFT 变换器时钟频率,另一方面可以采用多 FFT 变换器并行处理,达到扩展带宽的目的。

3 实验结果分析

以一个具体的实施例说明 OFDM 信号源的参数设计过程。系统指标要求如表 3 所示,信号带宽为 14 MHz,脉冲宽度 36.5 μs,相应地时宽带宽积 511,无杂散动态范围(Spurious free dynamic range,SFDR)大于 55 dB。

表 3 系统指标要求

Table 3 System specifications	
信号参数	指标要求
信号带宽	14 MHz
中心频率	70 MHz
脉冲宽度	36.5 μs
时宽带宽积	511
杂散	< -55 dB

根据上一节的分析结果,考虑到保留一定的系统余量,满足表 3 要求的 FFT 变换器长度应为 1 024,时钟频率为 28 MHz。如式(11,12)所示

2⌈log2(511+511 * 1/4)⌉ + 1 = 1024 (11)

14 MHz * 1024/511 ≅ 28 MHz (12)

以 M 序列作为调制码字序列产生 14 MHz 带宽的 OFDM 信号为例,说明系统的工作过程及测试结果。调制序列发生器以 14 Ms/s 的速率送出长度为 511 的调制码字序列,经序列预处理后,得到补零后的码字序列,此时码长为 1024,码元速率约为

28 Ms/s。补零占位后的码字序列被送入 OFDM 调制器,进行串并转换和快速傅里叶逆变换。变换的结果经并串转换以 28 Ms/s 的速率送给数字上变频器(Digital up converter,DUC),将频谱搬移至中频。数字上变频器的结构框图如图 5 所示。

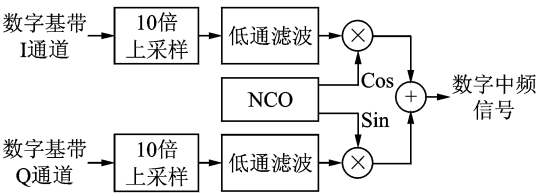


图 5 数字正交上变频器
Fig. 5 Digital up-converter

上采样器首先对数字基带信号进行 10 倍上采样,即在相邻样本点之间插入 9 个零值的新样本点,得到样本速率为 280 Ms/s 的数字基带信号。数字基带信号经插值后频谱会出现周期性重复,因此需要采用低通滤波器将高次谐波的频谱滤除。上采样和低通滤波共同实现数字脉冲成型。数控振荡器(Numerically controlled oscillator, NCO)输出 70 MHz 数字中频相参本振信号(Coherent oscillator, COHO)与低通滤波器输出的数字脉冲成型信号相乘,得到数字中频信号。数字基带信号包含 I/Q 两个通道,NCO 输出两路正交的 COHO 信号分别与 I/Q 通道的数字基带信号相乘,相乘后的结果再相加,得到数字中频信号。NCO 输出的数字 COHO 信号的采样率与数字中频信号的采样率相同,均为 280 Ms/s。

数字正交上变频得到的数字中频信号由 FPGA 输出给数模转换器,经数模转换输出模拟中频信号。模拟中频信号送给射频前端电路进行进一步的滤波、混频、功率放大等处理,最终从发射天线辐射出去。

本设计输出的中频 OFDM 信号的频谱如图 6 所示。

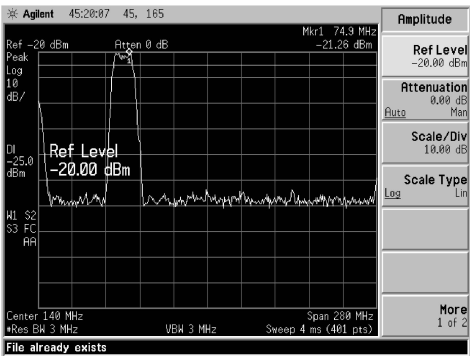


图 6 OFDM 信号频谱测试
Fig. 6 OFDM signal spectrum test

由于本设计中采用数字正交上变频技术,在数字域实现上变频变换,避免了模拟通道间的一致性校正等问题。因而 I/Q 通道间的一致性得到了很好的保证,省去了通道间一致性校正等繁琐的工作。将该 OFDM 信号源与毫米波雷达系统对接进行外场试验,可以实现目标检测和距离速度测量。

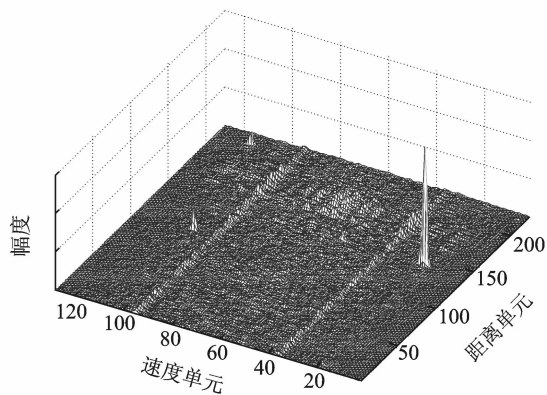


图7 毫米波 OFDM 雷达信号目标检测

Fig. 7 Millimeter OFDM radar signal target detection

4 结束语

本文基于快速傅里叶变换和现场可编程门阵列技术设计了一个实时 OFDM 雷达中频信号源。该设计结合了现场可编程门阵列和快速傅里叶变换的优点,克服了传统频率合成技术难以实现多载波调制的缺点,为 OFDM 雷达技术的实用奠定基础。本文研制的 OFDM 雷达信号源成功应用于某毫米波雷达中,达到了预期的效果。

参考文献:

- [1] Chang R W. Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission [J]. Bell System Technical Journal, 1966, 45: 1775-1796.
- [2] Weinstein S B, Ebert M P. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform [J]. Communication Technology, IEEE Transactions on, 1971, 19(5): 628-634.
- [3] Bingham J A C. Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come [J]. Communications Magazine, IEEE, 1990, 28(5): 5-14.
- [4] Jankiraman M, Wessels B J, Genderen P V. Pandora multifrequency FMCW/SFCW radar[C]// Alexandria, VA, USA: [s. n.], 2000.
- [5] 费元春. 宽带雷达信号产生技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

Fei Yuanchun. The generating technology of wide-band radar signals [M]. Beijing: National Defence

Industry Press, 2002.

- [6] Vankka J. Direct digital synthesizers: theory, design and applications [C]// Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Helsinki University of Technology, Helsinki: [s. n.], 2000: 193.
- [7] 陈萃. 宽带雷达信号产生技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- Chen Cui. Wideband radar signal generation technology research [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008.
- [8] 王永伦. 宽带雷达实时信号产生与处理技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- Wan Yonglun. Broadband radar real-time signal processing technology research [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006.
- [9] 高书亮, 黄智刚, 杨东凯. 基于 DDS 的 BOC(m, n) 信号发生器及其 FPGA 实现[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(2): 243-247.
- Gao Shuliang, Huang Zhigang, Yang Dongkai. BOC(m, n) signal generator based on DDS and its FPGA implementation [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2009, 24(2): 243-247.
- [10] 马令坤, 黄建国, 谢达. 基于 DFT 的信号子带分解与准确重构新方法[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(6): 807-812.
- Ma Lingkun, Huang Jianguo, Xie Da. New method for subband decomposition and perfect reconstruction based on DFT [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2009, 24(6): 807-812.
- [11] 孙斌, 邓斌, 魏玺章. 一种基于多载频相位编码信号的速度估计新方法[J]. 信号处理, 2010, 26(5): 753-758.
- Sun Bin, Deng Bin, Wei Xizhang. A new method for target velocity estimation of MCPC signal [J]. Signal Processing, 2010, 26(5): 753-758.
- [12] 张卫, 唐希源, 顾红, 等. OFDM 雷达信号模糊函数分析[J]. 南京理工大学学报, 2011, 35(4): 513-518.
- Zhang Wei, Tang Xiyuan, Gu Hong, et al. Ambiguity function analysis of OFDM radar signals [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(4): 513-518.
- [13] 霍凯, 李康乐, 姜卫东, 等. 微动目标 OFDM 雷达回波调制机理分析[J]. 电子学报, 2011, 39(3): 685-689.
- Huo Kai, Li Kangle, Jiang Weidong, et al. Analysis of the modulation effects on OFDM radar echoes from targets with micro-motions [J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 39(3): 685-689.

作者简介: 张卫(1983-), 男, 博士研究生, 研究方向: 雷达信号处理技术与 OFDM 信号新体制雷达, E-mail: zhangwei_njust@163.com; 薄超(1983-), 男, 博士研究生, 研究方向: 天波超视距雷达与 MIMO 新体制雷达; 顾红(1967-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 雷达信号处理、噪声雷达体制、稀疏阵列信号处理; 苏卫民(1959-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 阵列信号处理、雷达成像。