

引用格式:韩潇弘毅,刘平,姬伟杰,等. DS-OFDM 雷达通信一体化共享信号性能分析[J]. 电光与控制,2017,24(10):90-95,101. HAN X H Y, LIU P, JI W J, et al. Performance analysis of DS-OFDM based sharing signal for radar and communication integration[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(10):90-95, 101.

## DS-OFDM 雷达通信一体化共享信号性能分析

韩潇弘毅, 刘平, 姬伟杰, 吴君辉, 刘映希

(空军西安飞行学院,西安 710306)

**摘要:**为减小电子战武器平台的体积和电磁干扰,更大程度地实现雷达与通信系统的一体化,根据信号能量共享一体化的原则,针对直接信息调制 OFDM 雷达通信一体化共享信号存在自相关函数旁瓣较高不利于目标检测的问题,提出了一种基于直接扩频的正交频分复用(DS-OFDM)雷达通信共享信号形式。通过分析选取合适的伪随机扩频码对通信数据信息进行直接扩频,提高其自相关性,进而提高共享信号的自相关性能,从而增强目标检测能力。重点分析了共享信号的宽带模糊函数,理论分析表明,所设计的一体化共享信号具有频谱利用率高、低截获概率以及抗干扰性能强等优点。仿真验证的结果表明,选择合适码长的 Oppermann 序列的 DS-OFDM 雷达通信共享信号具有近似图钉形的模糊函数,可以达到雷达与通信一体化的要求。

**关键词:** 雷达通信一体化; 直接扩频正交频分复用; 宽带模糊函数

中图分类号: TN957 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2017.10.018

## Performance Analysis of DS-OFDM Based Sharing Signal for Radar and Communication Integration

HAN Xiao-hong-yi, LIU Ping, JI Wei-jie, WU Jun-hui, LIU Ying-xi

(Air Force Xi'an Flight Academy, Xi'an 710306, China)

**Abstract:** The sharing signal of radar-communication integration of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) with direct information modulation has high autocorrelation sidelobe and thus may degrade the target detection performance. To solve the problem, and to reduce the space and electromagnetic interference of weapon platform of electronic war, a signal sharing form of radar-communication integration based on the DS-OFDM modulation is proposed for implementing better integration of radar and communication. By selecting proper pseudo-random spreading code to spread the spectrum directly for communication data, and increase its autocorrelation, the autocorrelation of the sharing signal is increased, and thus can improve the target detection capability. The wideband ambiguity function of the sharing signal is analyzed emphatically. The theoretical analysis indicates that, the integrated signal has high spectrum efficiency, low probability of interception, and a strong anti-interference ability. The simulation results show that the integrated signal has an approximate thumbtack ambiguity function by selecting an appropriate symbol length, which makes it suitable for implementing the integration of radar and communication.

**Key words:** radar-communication integration; DS-OFDM; wideband ambiguity function

### 0 引言

为进一步减小电子战武器平台的体积和电磁干扰,现代战争对作战平台提出小型化和多功能化的要

求,而雷达和通信系统作为武器平台配备最为广泛的两种电子系统,二者的一体化具有重要意义。

传统的雷达通信一体化实现方式主要是共享孔径、共享射频前端等<sup>[1]</sup>。为更大程度地实现资源共享,文献[2]中提出了基于信号共享的雷达通信一体化概念,其最主要的挑战是能否设计出同时实现信息传递和目标探测的一体化波形。

随着正交频分复用(OFDM)技术和扩频技术的不断发展和成熟,其在雷达系统中应用得越来越广泛。

收稿日期:2016-06-01 修回日期:2016-11-20

基金项目:国家自然科学基金(61271454)

作者简介:韩潇弘毅(1990—),男,江西吉安人,硕士,助教,研究方向为现代通信技术及应用、雷达通信一体化、雷达信号处理。

文献[3-4]主要就基于 OFDM 的雷达通信一体化系统构建的基本性能进行讨论,论证了其可行性;但在共享波形的设计中,通常需要根据用户数据设计共享信号,而用户数据一般为随机数据,其相关性较差,因此在雷达目标检测中,难以满足雷达波形高主旁瓣比的要求。文献[5]对直接信息调制的 OFDM 雷达通信共享信号波形进行建模分析,研究了其宽带模糊函数,仿真发现,可通过增加子载波个数来提高距离分辨力和探测精度,但过多地增加子载波个数容易引起带宽的急剧增加,降低频谱利用率。

本文在文献[5]的基础上,提出了直扩式正交频分复用(DS-OFDM)雷达通信共享信号波形设计模型,通过选取特定的扩频伪随机码,对通信中的数字基带信号进行扩频,使其具有良好的自相关性,以满足雷达通信一体化共享信号的要求。

## 1 DS-OFDM 雷达通信共享信号设计

### 1.1 直接扩频序列的选择

对于雷达和通信系统,采用伪随机序列的具体要求不同。对于雷达的应用,所采用的序列必须具有良好的自相关特性,也就是说,序列的自相关函数必须有单一的峰值。对于通信应用,需要特定数量的可利用的正交序列组。如果不同的用户在时间上是不同步的,则对序列正交性的要求就更加苛刻,在这种条件下,序列组必须有理想的互相关特性,对于任意的时延,序列必须保持良好的正交性。因此,在一体化系统中,扩频伪随机序列必须具有良好的自相关特性和互相关特性。

在雷达系统中应用最为广泛的伪随机编码序列一般有 P1, P2, P3, P4, P<sub>x</sub> 序列以及 Frank-Zadoff-Chu 序列和 Oppermann 序列<sup>[6]</sup>,根据文献[7]分析可知,虽然在雷达信号处理中,P1, P2, P3, P4 和 P<sub>x</sub> 序列性能良好,但它们不适宜大规模地应用在通信上,因为对于同一长度扩频码序列,它们只能提供一个序列,而通信中则要求有多个甚至上百个序列码组。Frank-Zadoff-Chu 序列和 Oppermann 序列都能提供良好的自相关性能,编码长度允许波形设计者设计任意长度,且对于同一长度的扩频码序列都有多个序列码组,但是 Frank-Zadoff-Chu 序列同一码长的多个序列码组并不是都有很好的自相关幅度,所以不是所有的序列码组都满足雷达通信一体化的需求,而 Oppermann 序列同一码长的多个序列码组都具有相同的自相关幅度<sup>[7]</sup>,可以满足雷达通信一体化的要求,因此本文考虑采用 Oppermann 序列作为 DS-OFDM 雷达通信共享信号的扩频码,进行共享信号设计及仿真验证。

Oppermann 序列是一种多相编码序列。其码长为  $N$  的第  $k$  个 Oppermann 序列可以表示为  $U_k = [u_k(0), u_k(1), \dots, u_k(N-1)]$ ,其中

$$u_k(i) = (-1)^{k(i+1)} \exp\left\{\frac{j\pi[k^m(i+1)^p + (i+1)^n]}{N}\right\} \quad (1)$$

式中:  $1 \leq k \leq N-1, 0 \leq i \leq N-1, i$  与  $N$  互质,  $N$  为素数;  $m, p$  和  $n$  为实数。对于确定码长的 Oppermann 序列组,只要参数  $m, p$  和  $n$  确定,则所有编码序列具有相同的自相关函数。

### 1.2 共享信号波形设计

DS-OFDM 雷达通信共享信号,在发射端,首先是将用户通信数据信息流串并变换后成  $N$  路并行输出,每路数据采用相应的扩频序列进行扩展,然后对扩频后的  $N$  路数据进行 OFDM 调制,最后通过上变频调制发射出去,接收端经下变频后,利用子载波间的正交性将各路子载波分离开,通过相关检测的方法对扩频信号进行解扩,然后再对解扩后载有信息的信号分别解调,得到各个子载波上携带的数据信息,并从中提取回波目标的距离和速度信息,从而实现雷达和通信的功能。

研究表明<sup>[8]</sup>,在设计过程中,为进一步保证相邻子载波数据之间的正交性,本文相邻子载波采用的是码长一样且相互正交的扩频码组。

DS-OFDM 雷达通信共享信号发射端原理如图 1 所示。

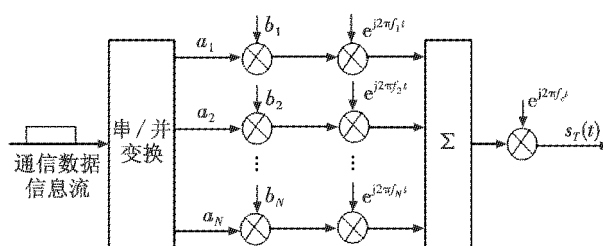


图 1 直接扩频 OFDM 雷达通信共享信号发射端原理图

Fig. 1 Transmitter schematic of radar and communication signal sharing based on DS-OFDM

DS-OFDM 雷达通信共享信号系统结构框图与直接信息调制 OFDM 雷达通信共享信号系统结构框图基本构成一致<sup>[5]</sup>,只是将每路数据进行了一次扩频。

根据相关理论可知,DS-OFDM 雷达通信共享信号的发射信号复包络为

$$\begin{aligned} \tilde{S}_T(t) &= \sum_{n=1}^N \omega_n c_n(t) \exp(j2\pi f_n t) \exp(j2\pi f_c t) = \\ &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \omega_n a_{n,m} b_{n,l} u(t - (l-1)t_c - mt_b) \cdot \\ &\quad \exp(j2\pi(n-1)\Delta f' t) \exp(j2\pi f_c t) \quad (2) \end{aligned}$$

式中:  $N$  为子载波数;  $M$  为 OFDM 码元个数;  $\omega_n$  为第  $n$

个子载波的频率加权,是一个窗函数; $c_n(t)$ 为扩频后第  $n$  个子载波的数据信息复包络; $f_n = (n-1)\Delta f'$  是第  $n$  个子载波信号与雷达中心载频的载频差,  $\Delta f' = \frac{1}{t_c}$  为子载波间隔,  $t_c = \frac{t_b}{I}$  为每个子载波上扩频序列的码片周期,  $I$  为扩频序列码长,  $t_b$  为一个 OFDM 码元宽度;  $f_c$  为雷达发射中心载频;  $a_{n,m}$  为第  $n$  个子载波上第  $m$  个码元的原始用户通信数据信息;  $b_{n,i}$  为第  $n$  个子载波上的扩频序列的第  $i$  位码元;  $u(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < t_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$ , 是矩形脉冲。

假设目标距离为  $R_0$ , 以相对雷达  $v$  的径向速度做匀速直线运动, 不存在转动运动。根据文献[9]可知, 目标回波信号的复包络为

$$y(t) = \sqrt{\gamma} x(\gamma(t-\tau)) \quad (3)$$

式中,  $\gamma = 1 + 2v/c$  为拉伸因子。

因此, 由式(2)和式(3)可得, DS-OFDM 雷达通信共享信号接收回波复包络为

$$\begin{aligned} \tilde{S}_R(t) &= \sqrt{\gamma} \tilde{S}_T(\gamma(t-\tau)) = \\ & \sqrt{\gamma} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \omega_n a_{n,m} b_{n,i} u(\gamma(t-\tau) - (i-1)t_c - \\ & mt_b) \exp(j2\pi f_n \gamma(t-\tau)) \exp(j2\pi f_c \gamma(t-\tau)) \end{aligned} \quad (4)$$

### 1.3 共享信号宽带模糊函数

由于 OFDM 信号及扩频信号的通信信息解调技术已成熟, 因此, 主要讨论 DS-OFDM 共享信号的回波目标检测性能。

模糊函数是通过一个函数表达式定量地描述一种发射信号波形在一个系统中对不同距离、不同速度目标的分辨能力。

由于 OFDM 信号距离分辨单元小, 是大时宽带宽积信号, 不满足  $BT \ll c/2v_0$  的条件, 因此常用的 Woodward 窄带模糊函数不能准确地反映雷达接收机输出信号特性。本文考虑引入另一种理论工具——宽带模糊函数。根据文献[10], 定义了一种宽带模糊函数表达式

$$\chi(\tau, f_d) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t) \tilde{y}^*(t) dt = \sqrt{\gamma} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t) \tilde{x}^*(t) (\gamma(t-\tau)) dt \quad (5)$$

式中:  $x(t)$  为发射信号;  $y(t)$  为接收回波信号;  $\tilde{x}(t)$  为  $x(t)$  的复解析信号;  $*$  表示复数共轭。由式(2)、式(4)、式(5)可知, DS-OFDM 雷达通信一体化共享信号的宽带模糊函数为

$$\chi(\tau, f_d) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}_T(t) \tilde{S}_R^*(t) dt = \sqrt{\gamma} \exp(j2\pi f_c \gamma \tau) \cdot$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N \omega_n \omega_k^* \exp(j2\pi f_k \gamma \tau) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^I \sum_{p=1}^I a_{n,m} b_{n,i} a_{k,l}^* b_{k,p}^* \cdot u(t - (i-1)t_c - mt_b) u(\gamma(t-\tau) - (p-1)t_c - lt_b) \exp(j2\pi(f_n - f_k \gamma - f_d)t) dt \quad (6)$$

根据文献[10]可知

$$\int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \exp(-j2\pi ft) dt = T_{\text{diff}} \text{sinc}(\pi f T_{\text{diff}}) \exp(-j2\pi f T_{\text{avg}}) \quad (7)$$

$$\text{式中: } T_{\text{diff}} = T_{\max} - T_{\min}; T_{\text{avg}} = \frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2} \text{。}$$

将式(7)代入式(6)可得

$$\begin{aligned} \chi(\tau, f_d) &= \sqrt{\gamma} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N \omega_n \omega_k^* \exp(j2\pi(f_k + f_c) \gamma \tau) \cdot \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^I \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^I a_{n,m} b_{n,i} a_{k,l}^* b_{k,p}^* \cdot \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \exp(j2\pi(f_n - f_k \gamma - \\ & f_d)t) dt = \sqrt{\gamma} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N \omega_n \omega_k^* \exp(j2\pi(f_k + f_c) \gamma \tau) \cdot \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^I \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^I a_{n,m} b_{n,i} a_{k,l}^* b_{k,p}^* \cdot \\ & \text{sinc}(\pi(f_k \gamma - f_n + f_d) T_{\text{diff}}) \exp(-j2\pi(f_k \gamma - f_n + f_d) T_{\text{avg}}) \end{aligned} \quad (8)$$

由式(7)两个与时间有关的矩形脉冲窗可知:  $T_{\max} = \max((mI+i)t_c, \frac{(I+P)t_c}{\gamma} + \tau)$ ;  $T_{\min} = \min((mI+i-1)t_c, \frac{(I+P-1)t_c}{\gamma} + \tau)$ 。

## 2 DS-OFDM 雷达通信共享信号性能仿真及分析

### 2.1 DS-OFDM 雷达通信共享信号模糊函数性能仿真

根据上述理论分析和公式推导, 本文选取 31 位的 Oppermann 序列作为扩频码进行雷达通信共享信号模糊函数仿真, 并与 OFDM 雷达信号和直接信息调制的 OFDM 雷达通信共享信号的宽带模糊函数进行对比分析。Oppermann 序列具体参数设置为  $p=1, m=2, n=2.007$ 。依据常规 OFDM 雷达信号参数要求<sup>[11]</sup>, 设置雷达发射载频为 3 GHz, 子载波数  $N=16$ , OFDM 码元符号数  $M=13$ , 一个 OFDM 码元宽度  $t_b=1 \mu\text{s}$ , 脉冲宽度  $T=13 \mu\text{s}$ , 子载波间隔  $\Delta f=1 \text{ MHz}$ 。子载波加权  $\omega_n$  采用广义余弦窗,  $\omega_n = \sqrt{0.54 - 0.46 \cos(\frac{1}{N} 2\pi(n-1))}$ 。模糊函数仿真结果分别如图 2 所示。在同样的信号参数下, 本文对采用 13 位 Barker 码序列的 OFDM 雷达信号和采用 13 位随机产生的二进制数据信息的直接信息调制的 OFDM 雷达通信共享信号进行了模糊函数仿

真<sup>[11]</sup>, 仿真结果如图 3、图 4 所示。

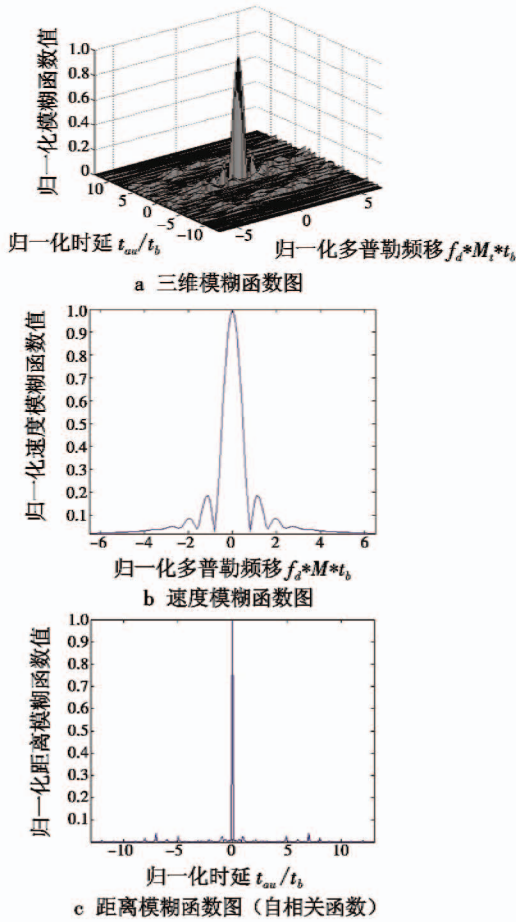


图 2 采用 Oppermann 序列 DS-OFDM 雷达通信共享信号模糊函数

Fig. 2 Ambiguity function of radar-communication integration signal based on the DS-OFDM with Oppermann codes

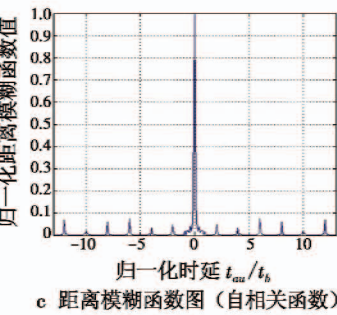
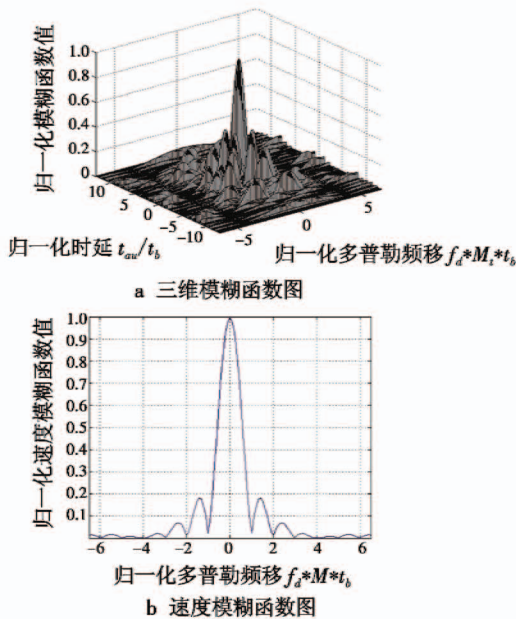


图 3 OFDM 雷达信号模糊函数图  
Fig. 3 Ambiguity function of OFDM radar signal

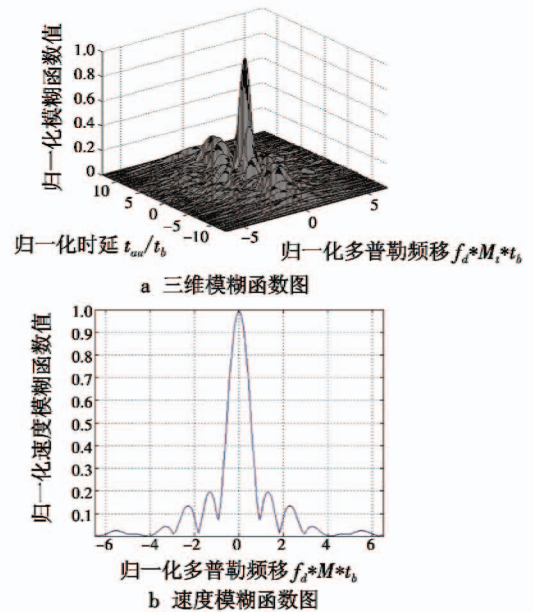


图 4 OFDM 雷达通信共享信号模糊函数图  
Fig. 4 Ambiguity function of radar-communication integration signal based on OFDM

通过对比观察图 2、图 3 和图 4 可以发现, 经过 DS-OFDM 的雷达通信一体化共享信号的自相关性能有了显著改善。

1) 由图 2a 可知, DS-OFDM 雷达通信一体化共享信号的模糊函数为图钉形, 说明本文设计的共享信号具有良好的目标检测和跟踪性能。

2) 对比图 2c、图 3c 和图 4c 可知, 采用 Oppermann 序列扩频调制的一体化共享信号, 其自相关函数

最大主旁瓣比为  $-27.96$  dB, 不仅低于直接信息调制的共享信号自相关函数最大主旁瓣比  $-7.33$  dB, 而且低于 Barker 调制的 OFDM 雷达信号自相关函数最大主旁瓣比  $-22.98$  dB。

3) 观察图 2b、图 3b 和 图 4b, 研究其速度模糊函数可以看出, 无论是直接信息调制 OFDM 雷达通信共享信号还是 DS-OFDM 雷达通信共享信号, 与 OFDM 雷达信号性能相当, 其都存在一定的多普勒敏感问题, 即随着多普勒频移的增加, 脉冲压缩后输出的主旁瓣比下降, 这是模糊函数呈图钉形的编码信号存在的普遍问题, 根据相关文献可知通过多普勒补偿可以有效地解决这个问题。

以长度为 31 的扩频码为例, Oppermann 序列可以产生 30 个相互正交的扩频码序列, 而  $m$  序列相互正交的扩频码序列非常有限, 仅有 3 个。由此可见, 对于雷达通信一体化系统, 采用 Oppermann 序列扩频可以满足多个用户同时共用系统的频谱资源, 进行信息传输, 进一步提高了系统的频谱利用率。

表 1 列出了设计的几种雷达通信共享信号和 OFDM 雷达信号的自相关函数最大主旁瓣比。

表 1 自相关函数最大主旁瓣比

Table 1 Maximum main to sidelobe ratio of auto-correlation function

信号形式(子载波数为 16, OFDM 码元个数为 13)	最大主旁瓣比/dB
基于 Barker 码调制的 OFDM 雷达信号	$-22.98$
直接信息调制的 OFDM 雷达通信共享信号	$-7.33$
采用 Oppermann 序列的 DS-OFDM 雷达通信共享信号	$-27.96$

## 2.2 不同参数下 DS-OFDM 雷达通信共享信号自相关性能仿真分析

为了进一步探究 DS-OFDM 波形参数设计对雷达通信一体化系统探测性能的影响, 本文通过选取不同码长的 Oppermann 序列和采用不同的子载波数, 对其自相关性能进行仿真分析, 并与 OFDM 雷达信号进行对比。

希望在达到与 OFDM 雷达信号相当的探测性能的同时, 使用带宽越小越好, 这样可以进一步节省频谱资源, 提高频谱利用率。又因为 DS-OFDM 的带宽为

$$B = N\Delta f = N \frac{1}{t_c} = N \frac{V}{t_b} \quad (9)$$

可知, 在 OFDM 码元宽度  $t_b$  一定的情况下, 应尽量使用少的子载波个数和短的扩频码组来减小带宽。

本文自相关函数性能参考对象选用子载波数为 16 的 Barker 码调制的 OFDM 雷达信号, OFDM 码元宽度  $t_b = 1 \mu\text{s}$ , 带宽为 16 MHz, 根据表 1 可知, 其自相关函数最大主旁瓣比为  $-22.98$  dB。本文假设 DS-OFDM 共享

信号的自相关函数最大主旁瓣比达到  $-20$  dB 以下, 就认为其具有 OFDM 雷达相当的自相关性能。下面分别选取码长为 11, 13 和 17 的 Oppermann 码作为扩频码组, 仿真不同子载波数下, DS-OFDM 雷达通信共享信号的自相关函数。

### 1) 码长为 11 的 Oppermann 序列。

扩频码长为 11 的 DS-OFDM 自相关函数见图 5。

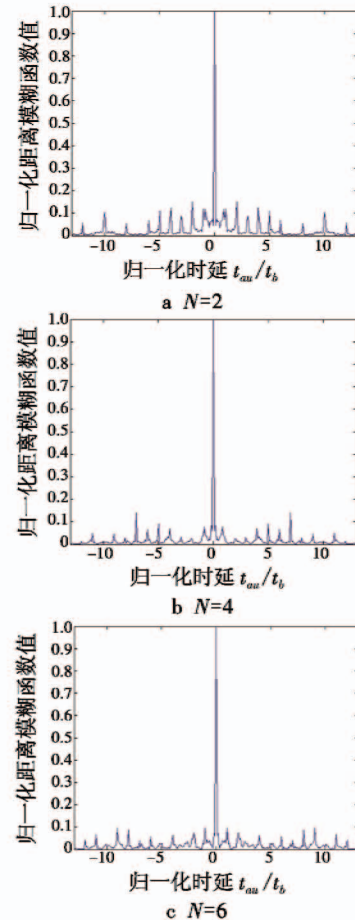


图 5 扩频码长为 11 的 DS-OFDM 自相关函数图

Fig. 5 Auto-correlation function of DS-OFDM signals when the length of spreading codes is 11

由图 5a 可以看出, 当子载波数为 2 时, DS-OFDM 雷达通信共享信号最大主旁瓣比为  $-16.48$  dB, 此时带宽为 22 MHz; 由图 5b 可知, 当子载波数为 4 时, 共享信号最大主旁瓣比为  $-17.72$  dB, 此时带宽为 44 MHz; 由图 5c 可知, 当子载波数为 6 时, 共享信号最大主旁瓣比为  $-20.54$  dB, 此时带宽为 66 MHz, 基本达到 Barker 码调制 OFDM 雷达信号自相关性能。

### 2) 码长为 13 的 Oppermann 序列。

扩频码长为 13 的 DS-OFDM 自相关函数见图 6。由图 6a 可以看出, 当子载波数为 2 时, DS-OFDM 雷达通信共享信号最大主旁瓣比为  $-18.06$  dB, 此时带宽为 26 MHz; 由图 6b 可知, 当子载波数为 4 时, 共享信号最大主

旁瓣比为 -21.11 dB,此时带宽为 52 MHz,基本达到 Barker 码调制 OFDM 雷达信号自相关性能。

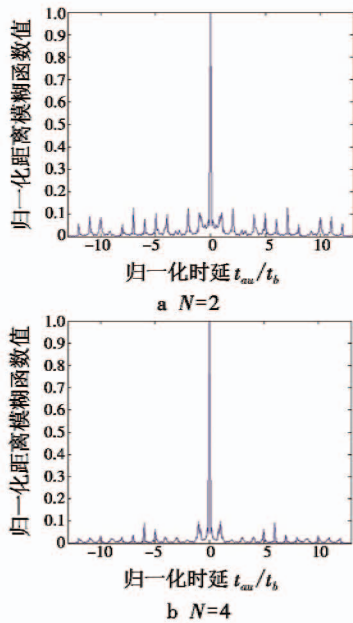


图 6 扩频码长为 13 的 DS-OFDM 自相关函数图  
Fig. 6 Auto-correlation function of DS-OFDM signals when the length of spreading codes is 13

3) 码长为 17 的 Oppermann 序列。

扩频码长的 17 的 DS-OFDM 自相关函数见图 7。

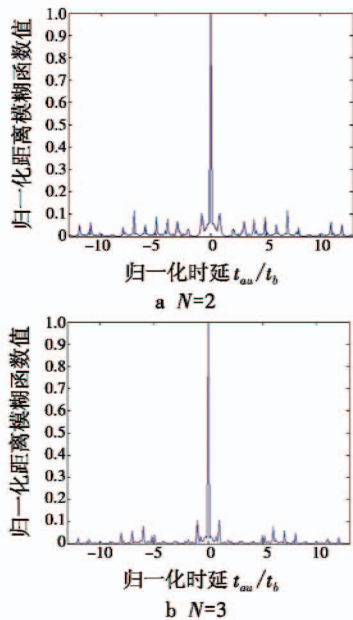


图 7 扩频码长为 17 的 DS-OFDM 自相关函数图  
Fig. 7 Auto-correlation function of DS-OFDM signals when the length of spreading codes is 17

由图 7a 可以看出,当子载波数为 2 时,DS-OFDM 雷达通信共享信号最大主旁瓣比为 -18.71 dB,此时带宽为 34 MHz;由图 7b 可知,当子载波数为 3 时,共享信号最大主旁瓣比为 -21.54 dB,此时带宽为 51

MHz,基本达到 Barker 码调制 OFDM 雷达信号自相关性能。

在达到与 OFDM 雷达信号自相关性能相当的条件下,DS-OFDM 雷达通信共享信号的部分参数指标如表 2 所示。

表 2 自相关函数最大主旁瓣比相当条件下 DS-OFDM 雷达通信共享信号的部分参数指标

Table 2 Parameter index of DS-OFDM radar-communication integration signals

信号形式	最大主旁瓣比/dB	Oppermann 序列长度	子载波数	带宽/MHz
Barker 码调制的 OFDM 雷达信号	-22.98	无	16	16
DS-OFDM 雷达通信共享信号	-20.54	11	6	66
	-21.11	13	4	52
	-21.54	17	3	51

从表 2 可以看出,在达到 Barker 码调制的 OFDM 雷达信号自相关检测性能相当的前提下,采用 Oppermann 序列的 DS-OFDM 雷达通信共享信号带宽均有所展宽,但可以使用较少的子载波数,而且选用的扩频码序列长度越长,使用的子载波数可以越少。

综上所述,采用合适码长的 Oppermann 序列的 DS-OFDM 雷达通信共享信号可以进一步提高频谱利用率,降低被截获概率,同时具有良好的目标探测性能,满足雷达通信一体化共享信号的要求。

### 3 结束语

本文针对直接信息调制 OFDM 雷达通信一体化共享信号存在自相关函数旁瓣较高不利于目标检测的问题,提出一种基于直接扩频的 OFDM 雷达通信共享信号设计方法,通过对通信数据信息直接扩频,提高其自相关性,再作为雷达通信共享信号进行发射,从而增强目标检测能力。本文从扩频码的选取、一体化共享信号的波形设计出发,重点分析了一体化共享信号的宽带模糊函数,并就采用 Oppermann 序列的 DS-OFDM 雷达通信共享信号的宽带模糊函数进行了仿真,结果表明,选择合适码长的 Oppermann 序列的 DS-OFDM 雷达通信共享信号能够较好地同时完成雷达目标探测和数据通信传输的要求,可用于实现雷达和通信的一体化。

### 参考文献

[1] TAVIK G C, HILTERBRICK C L, EVINS J B. The advanced multifunction RF concept[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53 (3): 1009-1020.  
[2] XU C C, CHAN T Q. Conception of "signal sharing" in integrated radar and jammer system and the integrated

(下转第 101 页)

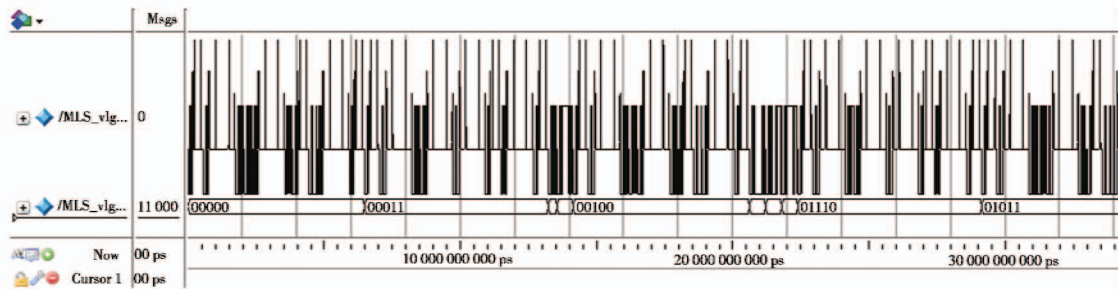


图 9 MLS 全周期信号 Modelsim 仿真波形

Fig. 9 Complete period signal waveform simulated by Modelsim

## 5 结束语

本文采用软件无线电的思想,以 FPGA 为核心,配合高性能 ADC 和宽带变频芯片,设计了一种通用性的无线电导航系统信号模拟器硬件平台。详细研究了 MLS 数字基带信号的 FPGA 实现方法和其中的关键技术,这些方法和技术很好地解决了 MLS 信号生成中的问题。最后,利用 Modelsim 10.1a 对设计进行了验证,证明设计的正确性。

### 参考文献

- [1] 周其焕,魏雄志. 微波着陆系统[M]. 北京:国防工业出版社,1989.
- [2] 吴德伟. 航空无线电导航系统[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [3] Aeroflex, Inc. MLS-800 microprocessor controlled ground station simulator[EB/OL]. [2016-08-10]. <http://www.aeroflex.cn>.
- [4] 王伟,张斌. 微波着陆系统信号模拟器设计[J]. 电讯技术,2011,51(7):118-121.
- [5] 宋彦博. 微波着陆系统视频信号研究与工程实现[J]. 现代导航,2014(1):21-25.
- [6] 陈斌. 微波着陆系统数据信号的实现与应用[J]. 现代导航,2014(2):121-126.
- [7] ICAO. Annex 10 to the convention on international civil aviation[S]. 6th ed. Montreal:ICAO, 2006.
- [8] 戴传金,吴德伟,赵修斌,等. 微波着陆系统扫描波束主瓣替代的误差分析法[J]. 北京邮电大学学报,2012,35(2):28-31.
- [9] 黎琼伟,李效辉,安邵龙,等. 飞机微波着陆模拟器自动计量系统研制[J]. 宇航计测技术,2015,35(5):6-10.
- [10] JAMIL M, ZEPERNICK H J, PETERSSON M I. Cross-ambiguity function of weighted pulse trains with Oppermann sequences[C]//Wireless Communication Systems, Tuscany, 2009:239-243.
- [11] 邓斌. 多载频相位编码雷达信号设计与处理技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2011.
- [12] XU S J, CHEN Y, ZHANG P. Integrated radar and communication based on DS-UWB[C]//The 3rd International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, Sevastopol, 2006:142-144.
- [13] SEN S, NEHORAI A. Adaptive design of OFDM radar signal with improved wideband ambiguity function[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010,58(2):928-933.
- [14] 施祥同,王虎,陈建军,等. OFDM 雷达信号的宽带模糊函数性能分析[J]. 雷达科学与技术,2010,8(6):554-558.

(上接第 95 页)

signal design [C]//IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions, Chengdu, China, 2002:502-505.

- [3] DONNET B J, LONGSTAFF I D. Combining MIMO radar with OFDM communications[C]//Proceedings of the 3rd European Radar Conference, 2006:37-40.
- [4] GARMATYUK A, SCHUERGER J, MORTON Y T. Feasibility study of a multi-carrier dual-use imaging radar and communication system[C]//European Radar Conference, 2007:1473-1476.
- [5] 韩满弘毅,鲍蕾蕾,杨瑞娟,等. 基于 OFDM 雷达通信共享信号性能分析[J]. 空军预警学院学报,2013,27(4):270-274.
- [6] JAMIL M, ZEPERNICK H J, PETERSSON M I. On integrated radar and communication systems using Oppermann sequences[C]//Military Communications Conferences, San Diego, CA, 2008:1-6.