

激光与光电子学进展

一种复合调制雷达信号设计及性能分析

肖跃, 高振斌*, 赵子杭

河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401

摘要 针对低截获概率雷达信号设计中的复杂度问题, 提出了一种新型复合调制信号, 即脉间 Costas 频率编码、脉内混沌二相码 (CTPC) 的 Costas/CTPC 复合信号。混沌二相码的引入, 增加了信号相位的随机性。然后理论上分析了该复合调制信号的组成。最后通过仿真, 对参数优化过后 Costas/CTPC 信号的自相关函数、互相关函数、功率谱密度和模糊函数进行了分析。仿真结果表明: 该信号相比 Costas 信号、Costas/Bark 信号、LFM/Bark 信号及 Costas/LFM 信号具有更好的自相关性能, 同时还具有良好的抗干扰性能和极低的截获性能, 十分适合应用于低截获概率雷达系统中。

关键词 傅里叶光学; 低截获概率雷达; 复合调制; 自相关函数; 互相关函数; 功率谱密度; 模糊函数

中图分类号 TN958 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/LOP202259.1107002

Design and Performance Analysis of a Compound Modulated Radar Signal

Xiao Yue, Gao Zhenbin*, Zhao Zihang

School of Electronics and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

Abstract To solve the complexity problem in the design of radar signals with low probability of interception, this paper proposes a novel compound modulation signal, namely the Costas/CTPC compound signal of inter-pulse Costas frequency coding and intra-pulse chaotic two-phase code (CTPC). The introduction of CTPC increases the randomness of the signal phase. The composition of the composite modulation signal is analyzed theoretically. After parameter optimization, the autocorrelation function, cross-correlation function, power spectral density, and ambiguity function of Costas/CTPC signal are analyzed through simulation. The simulation results show that this signal has better autocorrelation performance than Costas, Costas/Bark, LFM/Bark, and Costas/LFM signals. It also has good anti-jamming and low-interception performances. Therefore, it is very suitable for radar systems with low-interception probability.

Key words Fourier optics; low-interception probability radar; composite modulation; autocorrelation function; cross-correlation function; power spectral density; fuzzy function

1 引言

随着电子技术的飞速发展, 雷达的生存环境受到严重威胁^[1]。为了增强自身的生存能力, 雷达需

要通过各种方法来减小其被电子侦察系统截获的概率, 获得优良的低截获性能, 这种技术称为低截获概率 (LPI) 技术^[2]。而雷达波形设计是一种提高雷达低截获性能的重要方法。

收稿日期: 2021-04-30; 修回日期: 2021-06-18; 录用日期: 2021-07-20

基金项目: 河北省自然科学基金 (F2019506037)

通信作者: *gaozhenbin@hebut.edu.cn

Costas 频率编码信号没有距离速度耦合,具有良好的距离和速度分辨力,被广泛应用于低截获概率雷达系统中。但是,单一调制的 Costas 频率编码信号的各方面性能都不够优秀,比如调制方式不够复杂、峰值旁瓣电平和峰值功率都不够低等。因此,基于 Costas 频率编码的复合调制信号逐渐成为了众多学者的研究对象^[3-8]。Costas/相移键控 (PSK) 信号,降低了峰值功率,减小了功率波动范围,但其峰值功率依然不够低^[3]。Costas/线性调频 (LFM) 信号,调制方式较为复杂,但峰值旁瓣电平不够低^[5-6]。非线性调频 (NLFM)-Costas 信号,有较低的峰值旁瓣电平,但是其中的 NLFM 信号设计起来较为复杂^[7]。脉间 Costas 跳频脉内多载波混沌相位编码信号^[8],调制非常复杂,参数众多,增大了被敌方破解的难度,但是其峰值旁瓣电平仅为 20 dB,并且多载波会导致峰均比的提高,因此还需要抑制峰均比,增加了设计的难度^[8]。

混沌信号就是用混沌序列去调制信号,可以分为混沌调频、混沌调相和混沌调频调相信号^[9-11]。它是一种超宽带信号,不同的初值对其波形和性能影响很大,具有类噪声特性和较强的随机性,敌方很难获取其参数,很大程度上减小了被截获的概率,同时还具有极好的电磁兼容能力、良好的抗干扰性能,易于产生、控制和处理等优点^[11]。本文在 Costas 频率编码信号的子脉冲内部引入了混沌二相码,得到了一种调制方式更为复杂的新型雷达信号,即 Costas/混沌二相码 (CTPC) 复合信号。然后分析了其自相关函数、互相关函数、功率频谱密度和模糊函数。结果表明,本文所设计的信号具有更低的峰值旁瓣电平和峰值功率,模糊函数为理想的图钉型,综合性能良好。

2 Costas 频率编码信号

Costas 频率编码信号有多个按照 Costas 序列跳变的频率,每个频率只出现一次,且持续的时间都相同。其中, Costas 序列的长度众多,本文中的 Costas 序列长度均为 16,此时的 Costas 序列为 {1, 10, 15, 14, 4, 6, 9, 5, 16, 7, 2, 3, 13, 11, 8, 12}。而时间和频率之间的关系可以用 M 阶置换矩阵 $\mathbf{A}_{M \times M} = \{a_{ij}\} (a_{ij} = 0 \text{ 或 } 1)$ 来表达。

Costas 信号的复包络为

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{Mt_b}} \sum_{m=1}^M u_m [t - (m-1)t_b] \exp(j2\pi f_m t), \quad (1)$$

式中: M 为 Costas 序列的长度; f_m 为经 Costas 序列 C_m 调制后的频率, $f_m = C_m \cdot \Delta f$, Δf 为频率间隔; t_b 为子脉冲持续时间。 $u_m(t)$ 为子脉冲,其计算公式为

$$u_m(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq t_b \\ 0, & \text{else} \end{cases}. \quad (2)$$

由置换矩阵得到的 Costas 信号的自相关函数为 $R(r, s) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_{ij} a_{(i+r)(j+s)}$, 并且具有以下特点:

$$\begin{cases} R(r, s) = M, & (r, s) = (0, 0) \\ 0 \leq R(r, s) < M, & (r, s) \neq (0, 0) \\ R(r, s)_{\max} = 1, & (r, s) \neq (0, 0) \end{cases}. \quad (3)$$

设置 Costas 信号的主要仿真参数: 每个频率持续时间为 $1 \mu\text{s}$, 频率间隔为 1 MHz , 带宽为 16 MHz , 采样速率设置为 200 MHz , 对其自相关函数和功率谱密度分别进行了仿真, 仿真结果如图 1 和 2 所示。

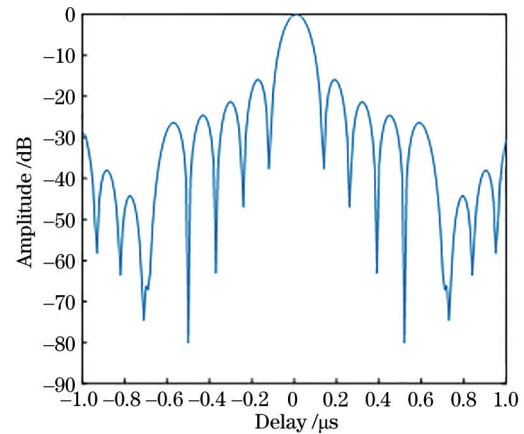


图 1 Costas 信号的自相关函数

Fig. 1 Autocorrelation function of Costas signal

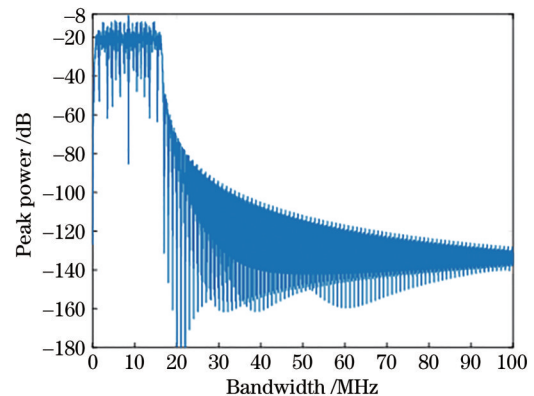


图 2 Costas 信号的功率谱密度 ($\Delta f=1 \text{ MHz}$)

Fig. 2 Power spectral density of Costas signal ($\Delta f=1 \text{ MHz}$)

由式(3)可知, Costas 信号的自相关函数副瓣的最大值为 1, 自相关属性较为理想。但由图 1 可知,

Costas 信号的旁瓣还是不够低,仅为 -13.7 dB。

信号的功率谱密度表示单位频带上信号功率的分布情况,雷达信号的功率谱密度峰值越小,辐射强度就越小,低截获性能越好;功率谱密度峰值越大,辐射强度也就越大,低截获性能越差^[12]。Costas 信号的功率谱密度如图 2 所示。

由图 2 可知, Costas 信号的功率谱密度峰值约为 -8 dB。这可能是带宽小导致的。将带宽设为 96 MHz, $\Delta f=16$ MHz, 得到的结果如图 3 所示。

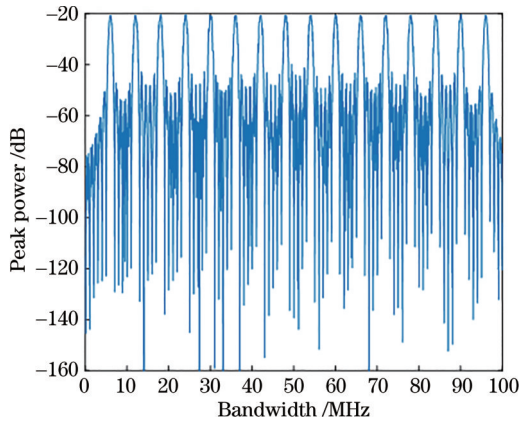


图 3 Costas 信号的功率谱密度 ($\Delta f=16$ MHz)

Fig. 3 Power spectral density of Costas signal ($\Delta f=16$ MHz)

由图 3 可以看出, 16 位的 Costas 信号的功率谱密度中有 16 个峰, 且峰值几乎相等, 约为 -20 dB, 相比于带宽为 16 MHz 时的 Costas 信号, 峰值功率下降了 12 dB。为了进一步探讨 Costas 信号的带宽对其峰值功率的影响, 将 Costas 信号的带宽设为 $16\sim 320$ MHz, 步长为 16 MHz, 分别通过仿真实验求其功率谱峰值的大小。得到的仿真结果如图 4 所示。

由图 4 可知, Costas 信号的功率谱密度峰值随

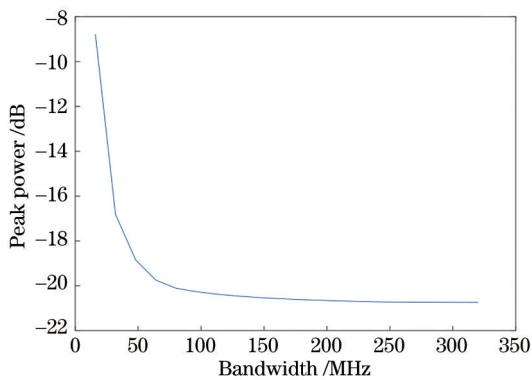


图 4 Costas 信号的带宽对峰值功率的影响

Fig. 4 Influence of bandwidth of Costas signal on peak power

着带宽的增加而减小, 当带宽小于 50 MHz 时, 功率谱密度峰值随着带宽的增加减小得比较快; 当带宽大于 50 MHz 时, 功率谱密度峰值随着带宽的增加而减小得非常缓慢。因此, Costas 信号虽然可以通过改变参数获得较大的带宽, 但是带宽的增加对其功率峰值的改善效果具有一定的局限性, 最低只能达到大约 -20 dB。

3 Costas/CTPC 信号

为了得到性能更为良好的信号, 本文在 Costas 信号的基础上加入相位编码, 即脉冲间 Costas 频率编码, 脉内混沌二相码, 增强其相位的随机性, 改善 Costas 信号的低截获性能。混沌序列则选取了比较常见的 Bernulli 序列。

Bernulli 映射的表达式为

$$x_{n+1} = \begin{cases} Dx_n + 1/2, & x_n \leq 0 \\ Dx_n - 1/2, & x_n > 0 \end{cases} \quad (4)$$

初始值 x_0 的取值范围是 $[-1/2, 1/2]$, 参数 $D=1.99$ 。

将式 (4) 产生的混沌序列 $\{x_i\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 进行了量化, 使之转换成一个二值序列。二值化的处理过程为

$$E = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_n, \quad (5)$$

$$c_n = \begin{cases} 1, & x_n > E \\ -1, & x_n \leq E \end{cases}, \quad (6)$$

式中: E 为阈值; c_n 为得到的混沌二相码。再将 Costas 频率编码的每个子脉冲内部均采用混沌二相码, 就形成了 Costas/CTPC 复合信号。图 5 为 Costas/CTPC 复合信号示意图。

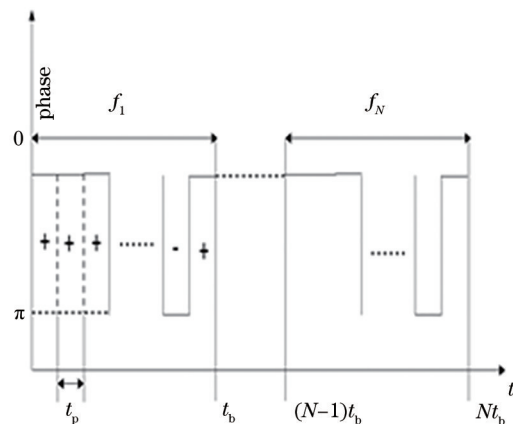


图 5 Costas/CTPC 复合信号构成示意图

Fig. 5 Construction of Costas/CTPC composite signal

Costas/CTPC 复合信号的表达式为

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{Mt_b}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c_m u_m [t - (m-1)t_b - (n-1)t_p] \exp(j2\pi f_m t), \quad (7)$$

式中: t_p 为码元宽度; n 为每个子脉冲内部的码元个数。

Costas/CTPC 信号的带宽为

$$B = (M-1)\Delta f + B_{\text{BPSK}}, \quad (8)$$

式中: $B_{\text{BPSK}} = \frac{1}{t_p}$ 。

4 Costas/CTPC 信号的性能仿真分析

4.1 自相关函数

为了使 Costas/CTPC 信号具有最好的自相关性能, 本文对影响性能较大的参数, 进行了仿真实验。设置仿真参数如下: Costas 信号的序列与前文相同, 混沌序列的初始值为 $-1/2 \sim 1/2$, 步长为 0.01, 迭代次数为 200。Costas 频率编码信号的频率间隔为 0.1~6.5 MHz, 每隔 0.1 MHz 取一个值。得到的仿真结果如图 6 所示。

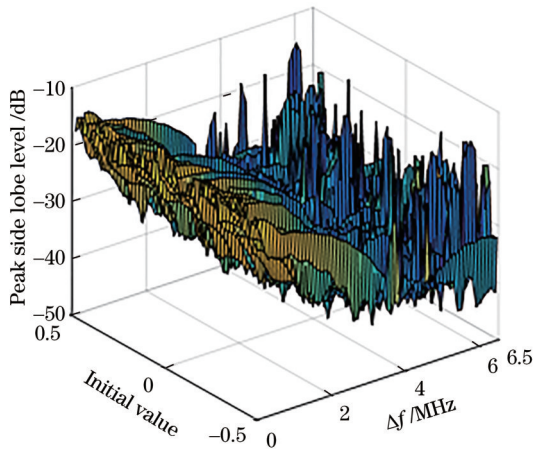


图 6 初始值和频率间隔对 Costas/CTPC 信号峰值旁瓣电平的影响

Fig. 6 Influence of initial value and frequency interval on peak side lobe level of COSTAS/CTPC signal

由图 6 可知, 图像关于 $x=0$ 的切面对称, 不同的参数对应着不同的旁瓣电平, 差距较大。旁瓣电平最小可达 -44.1386 dB, 此时的初始值为 0.48 或 -0.48 , 频率间隔为 6.1 MHz, 积分旁瓣电平为 -33.216 dB。旁瓣电平最高为 -12.6784 dB, 与最低值相差了约 31 dB。因此通过对参数进行合理的

选择, 可以获得低旁瓣的信号。而极低的峰值旁瓣可以避免后续加窗处理带来的信噪比损失^[13], 较低的积分旁瓣使其能量大多集中在了主瓣, 旁瓣携带能量较少, 敌方不容易从副瓣中获取有用的信息。图 7 为 Costas/CTPC 信号的自相关函数图, 可以看出, 此时的自相关函数类似于冲击函数, 主瓣很窄, 距离分辨力很高。

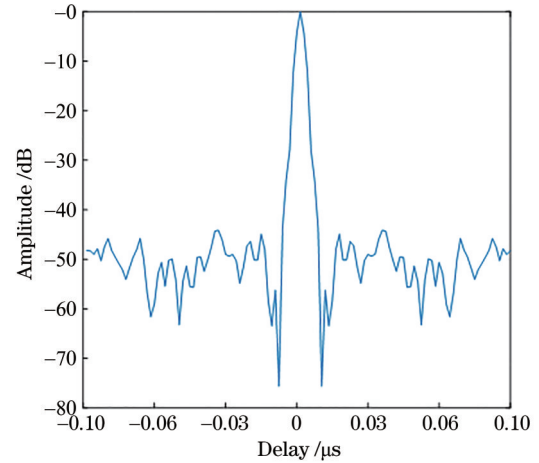


图 7 Costas/CTPC 信号的自相关函数

Fig. 7 Autocorrelation function of Costas/CTPC signal

然后将本文设计的 Costas/CTPC 信号与常见的复合调制雷达信号 Costas/Bark、LFM/Bark 和 Costas/LFM 做自相关性能的对比分析。各信号的带宽均为 290 MHz。时宽为 $16 \mu\text{s}$ 。信号幅度为 1。由于在雷达仅波形不同时, 截获因子与时宽带宽积成反比^[14]。故此时这四种信号的截获因子相同。

其他仿真参数如下: 1) Costas/CTPC 信号。Costas 序列与本文相同, 频率间隔为 6 MHz, 初始值为 0.48, 混沌序列的长度为 200。2) Costas/Bark 信号。Bark 码序列为 $[1\ 1\ 1\ 1\ 1\ -1\ -1\ 1\ 1\ 1\ -1\ 1\ 1]$, Costas 序列与本文相同, 频率间隔为 18.125 MHz。3) LFM/Bark 信号。调频斜率为 $290\ \text{MHz}/\mu\text{s}$, Bark 码序列为 $[1\ 1\ 1\ 1\ 1\ -1\ -1\ 1\ 1\ 1\ -1\ 1\ 1]$ 。4) Costas/LFM 信号。Costas 序列与本文相同, 频率间隔为 18.12 MHz, 调频斜率为 $18.12\ \text{MHz}/\mu\text{s}$ 。

仿真后得到的各项自相关函数指标如表 1 所示。

由表 1 可知, 在截获因子相同的条件下, 四种信号中自相关峰值旁瓣电平 (PSL) 和积分旁瓣 (ISL) 电平最低的是本文设计的 Costas/CTPC 信号, 自相关峰值旁瓣电平最多下降了 30.4 dB。最少下降了 29.1 dB, 相比于其他三种复合调制信号, 其自相关

表 1 四种信号的自相关函数对比

Table 1 Comparison of autocorrelation functions of four signals

Signal	PSL /dB	ISL /dB
Costas/CTPC	-43.47	-33.21
Costas/Bark	-13.06	-8.20
LFM/Bark	-14.3	-10.67
Costas/LFM	-14.2	-10.12

性能十分突出。

4.2 互相关函数

图 8 为互相关函数,可以看出, Costas/CTPC 信号的互相关函数峰值较低,约为 -20 dB,抗干扰性能良好。

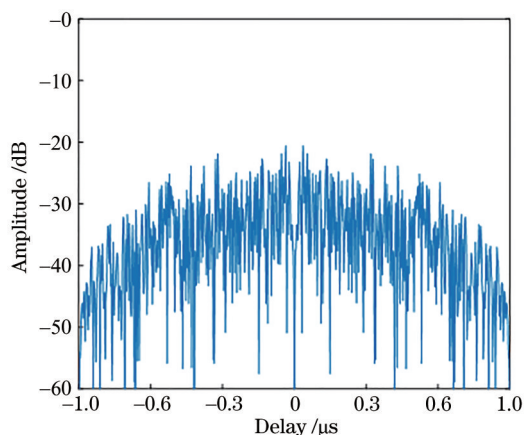


图 8 Costas/CTPC 信号的互相关函数

Fig. 8 Cross-correlation function of Costas/CTPC signal

4.3 功率谱密度

图 9 为 Costas/CTPC 信号的功率谱密度,可以看出, Costas/CTPC 信号的功率谱密度峰值约为

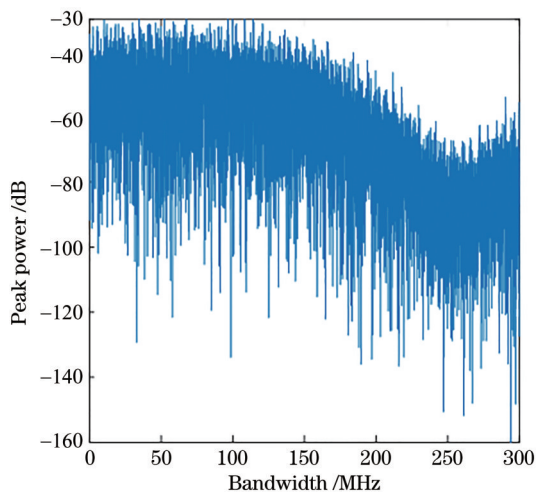


图 9 Costas/CTPC 信号的功率谱密度

Fig. 9 Power spectrum of Costas/CTPC signal

-30 dB,而由前面分析可知,同样带宽的 Costas 信号的功率峰值约为 -20 dB,降低了 10 dB。相比于单一调制的 Costas 信号,低截获性能得到了明显的改善。

4.4 模糊函数

模糊函数是雷达信号设计中常用的工具,它与雷达信号的距离分辨率和速度分析有很大的联系。

模糊函数的表达式^[15]为

$$\lambda(\tau_d, f_d) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} u(t)u^*(t + \tau_d) \exp(j2\pi f_d t) dt \right|, \quad (9)$$

式中: $u(t)$ 为待研究信号的复包络; τ_d 为时延; f_d 为多普勒频移。

将式(2)代入式(9)中,进行仿真,得到的结果如图 10 所示。

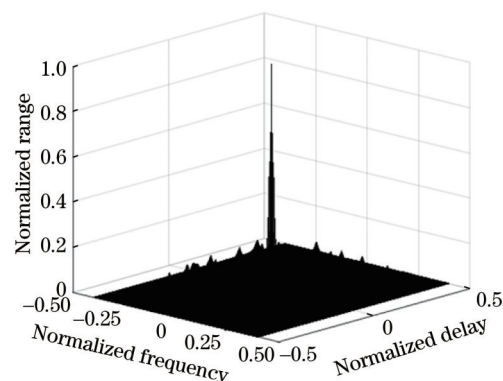


图 10 Costas/CTPC 信号的模糊函数

Fig. 10 Ambiguity function of Costas/CTPC signal

由图 10 可知, Costas/CTPC 信号的模糊函数为尖锐的图钉型,距离和速度分辨力十分优秀。

5 结 论

为了获得性能良好的雷达信号,本文深入分析了 Costas 信号的性能,在此基础上,提出了一种新型的调制方式,即 Costas/CTPC,仿真了它的信号模型。通过仿真得到了其自相关函数、互相关函数、功率谱密度和模糊函数。仿真结果表明, Costas/CTPC 信号具有较低的旁瓣电平和峰值功率、类似图钉型的模糊函数,是一种综合性能良好的低截获概率雷达波形。考虑到该信号子脉冲非线性分布且非正交,信号的匹配接收处理过程比 Costas 信号复杂,需要高效的脉冲压缩处,这将是进一步研究讨论的内容。

参 考 文 献

[1] 范爱锋, 史鲜瑞, 杨永林. 现代雷达面临的威胁及对

- 抗措施[J]. 现代军事, 2003(8): 45-46.
- Fan A F, Shi X R, Yang Y L. Threats faced by modern radar and countermeasures[J]. Modern military, 2003(8): 45-46.
- [2] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- Sang J H. Low-observable technologies of aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013.
- [3] Yang H B, Chen J. Design of Costas/PSK continuous wave LPI radar signal[J]. International Journal of Electronics, 2017, 104(3): 404-415.
- [4] Touati N, Tatkeu C, Chonavel T, et al. Phase coded Costas signals for ambiguity function improvement and grating lobes suppression[C]//2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference, September 2-5, 2013, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2013: 14023936.
- [5] Liu F, Mu S X, Lü W H, et al. MIMO SAR waveform separation based on Costas-LFM signal and co-arrays for maritime surveillance[J]. Chinese Journal of Electronics, 2017, 26(1): 211-217.
- [6] 罗美方, 郝志梅, 王强. LFM-频率编码复合低截获波形信号处理方法[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(2): 335-339.
- Luo M F, Hao Z M, Wang Q. Signal processing technique for LFM/FSK hybrid LPI waveform[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(2): 335-339.
- [7] 付银娟, 李勇, 徐丽琴, 等. NLFM-Costas 射频隐身雷达信号设计及分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(3): 994-999.
- Fu Y J, Li Y, Xu L Q, et al. Design and analysis of NLFM-Costas RF stealth radar signal[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(3): 994-999.
- [8] 黄琼丹, 李勇, 卢光跃. 脉间 Costas 跳频脉内多载波混沌相位编码雷达信号设计与分析[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6): 1483-1489.
- Huang Q D, Li Y, Lu G Y. Design and analysis of inter-pulse Costas frequency hopping and intra-pulse multi-carrier chaotic phase coded radar signal[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(6): 1483-1489.
- [9] 雷超. 基于混沌的雷达波形设计研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- Lei C. Research on radar waveform design based on chaos[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [10] 申东, 张林让, 刘昕, 等. 用混沌序列降低 MIMO 雷达波形自相关旁瓣和互相关[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(5): 42-46, 60.
- Shen D, Zhang L R, Liu X, et al. Reducing the waveform auto-correlation sidelobes and cross-correlation of MIMO radar by using chaotic sequences [J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(5): 42-46, 60.
- [11] 蒋留兵, 车俐. 混沌超宽带雷达信号的应用研究[J]. 现代雷达, 2009, 31(10): 38-41.
- Jiang L B, Che L. A study on application of chaos UWB radar signal[J]. Modern Radar, 2009, 31(10): 38-41.
- [12] 汪飞, 李海林, 夏伟杰. 低截获概率机载雷达信号处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- Wang F, Li H L, Xia W J. Low interception probability airborne radar signal processing technology [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [13] 段星辰. 连续波雷达波形设计及低旁瓣研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- Duan X C. Waveform design for continuous wave radar and research on low sidelobe[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [14] 彭智慧. 低截获概率雷达的波形研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2014.
- Peng Z H. Research on the signal waveform of low probability of interception radar[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2014.
- [15] Richards M A. Fundamentals of radar signal processing [M]. New York: McGraw-Hill, 2005.