

基于 KL 散度的雷达信号波形抗截获性能评估

王旭东 陆威* 闫贺

(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 211106)

摘要: 该文给出了一种对 13 类常用雷达信号波形的抗截获性能进行评价的新方法, 可为雷达波形的设计者提供评价波形抗截获性能的一般性准则。该准则假定白噪声信号具有最好的抗截获性能, 通过将不同雷达信号波形和白噪声信号进行比较, 得出雷达信号和白噪声的相似程度。首先, 利用 Wigner 半圆法推出白噪声和雷达信号的特征分布函数, 然后用 KL 散度来表示雷达信号和白噪声之间的相似性, 较小的 KL 散度值, 意味着较强的抗截获性能, 反之亦然。理论推导和仿真验证表明这种评价准则可对不同雷达信号波形的抗截获性能进行有效评价。

关键词: 雷达信号波形; 抗截获性能; 评价准则; KL 散度; Wigner 半圆法

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)08-1894-05

DOI: 10.11999/JEIT161124

Anti-interception Performance Evaluation of Radar Signal Waveform Based on KL Divergence

WANG Xudong LU Wei YAN He

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: This paper presents a new method for evaluating the anti-interception performance of thirteen kinds of radar signals, which can be used to guide radar waveform designing. The method assumes that white noise signal has the best anti-interception performance, by comparing different radar signals with it, the similarity degree of radar signal and white noise signal can be obtained. First, the characteristics distribution function of white noise and radar signal distribution function are introduced using Wigner semicircle law. Second, KL divergence is used to represent the similarity between radar signal and white noise. Small value of KL divergence means better anti interception performance, and vice versa. Theoretical derivation and simulation results show that this method can evaluate the anti interception performance of different radar signals effectively.

Key words: Radar signal waveform; Anti-interception performance; Evaluation criterion; KL divergence; Wigner semicircle law

1 引言

随着电子侦察能力的增强, 常规体制的雷达面临着严重的生存威胁, 雷达波形易于被敌方截获、干扰, 从而使雷达的有效探测能力大打折扣, 使雷达很难正确地发现并跟踪目标, 并且易于被反辐射导弹(ARM)摧毁。为提升雷达的抗截获能力, 各种新颖的低截获概率雷达波形被设计出来。然而这些波形的抗截获性能好坏, 多依靠工程师的经验判断,

往往缺乏理论依据。雷达信号的抗截获性能和信号的不确定性有着密切联系, 有的学者提出用信息熵来评价雷达信号的不确定性, 因此相应地提出了信号类型熵、密度熵、时频分布熵、安全信息因子等概念^[1,2]。还有的学者提出将时间带宽积, 峰均功率比, 参数捷变特性等准则作为雷达信号的抗截获性能的评价准则^[3]。一般意义上, 白噪声具有最大的信息不确定度, 因此具有最好的抗截获性能, 如果一种雷达信号具有接近白噪声的信息不确定度, 即可认为该信号具有较强的抗截获性能。另一方面, 在信息论中, 信息散度通常用来度量两个概率分布之间有多大的不同^[4,5]。将白噪声信号和雷达信号分作两个不同的信号集合, 可采用信息散度对两个集合的相似程度进行评价, 通过选取当下常用的 13 类典型雷达信号波形作为测试对象, 得出了在典型参数选取情况下不同雷达信号的抗截获性能差异程度。

收稿日期: 2016-10-21; 改回日期: 2017-03-17; 网络出版: 2017-04-25

*通信作者: 陆威 834185768@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金 (61201208), 中国博士后科学基金 (2014M561643), 中央高校基本科研业务费专项资金(NJ20150018)
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61201208), China Postdoctoral Science Foundation (2014M561643), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (NJ20150018)

2 算法原理

设白噪声信号采样值作为集合 Y ，雷达信号的采样值作为集合 X 。 $y(1), y(2), \dots, y(N)$ 是从集合 Y 中取出的样本， $x(1), x(2), \dots, x(N)$ 是从集合 X 中取出的样本。

集合 Y 和集合 X 之间的距离可以表示为

$$d(Y, X) = L(f(y(1), y(2), \dots, y(N)), g(x(1), x(2), \dots, x(N))) \quad (1)$$

其中， $L(\cdot)$ 为集合 Y 和集合 X 之间的距离函数， $f(\cdot)$ 为离散白噪声信号的特征值概率分布函数， $g(\cdot)$ 为雷达信号的特征值概率分布函数，下面推导 $L(\cdot), f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 的具体表达形式。

2.1 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 函数的构造

假设 $\mathbf{h} = \{h(1), h(2), \dots, h(N)\}$ 为一个长度为 N 的信号序列，各个元素之间独立同分布。

为了简化分析，对信号序列做标准化处理，首先对信号序列的方差和均值进行估计，采用极大似然估计方法。信号序列的估计均值和估计方差可以表示为

$$\hat{\mu}_h = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N h(n) \quad (2)$$

$$\sigma_h^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (h(n) - \hat{\mu}_h)^2 \quad (3)$$

标准化的信号序列 $\bar{\mathbf{h}}$ 可以表示为

$$\bar{\mathbf{h}} = \frac{\mathbf{h} - \hat{\mu}_h}{\hat{\sigma}_h} \quad (4)$$

假设 $\mathbf{h}_k (k = 1, 2, \dots, K)$ 为一个维度为 M 的向量， \mathbf{h}_k 的元素从标准化后的信号序列 $\bar{\mathbf{h}}$ 取出。

\mathbf{h}_k 的基本形式为： $\mathbf{h}_k = (\bar{h}(k), \bar{h}(k+1), \dots, \bar{h}(k+M-1))^T (N = K + M - 1)$ ， \mathbf{h}_k 生成采取循环移位的方式。 \mathbf{h}_k 的归一化协方差矩阵可以定义为

$$\mathbf{H} = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_k^* \mathbf{h}_k^H \quad (5)$$

并且 \mathbf{H} 为对称矩阵，对其进行 Wigner 标准化后可得^[6-8]

$$\mathbf{H}_M = \frac{\sqrt{K}}{\sqrt{M}} (\mathbf{H} - \mathbf{I}_{M \times M}) \quad (6)$$

其中 $\mathbf{I}_{M \times M}$ 为 $M \times M$ 的单位矩阵。

由 Wigner 半圆法可以推出 \mathbf{H}_M 的渐进谱分布函数为

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{dn_{H_M}(x)}{dx} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{4-x^2} \quad (7)$$

进而可得

$$\lim_{M \rightarrow \infty} dn_{H_M}(x) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{4-x^2} dx \quad (8)$$

假设 \mathbf{H}_M 的特征值为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$ ，特征值的概率分布函数为 $N_{H_M}(x)$ ，并且满足：

$$N_{H_M}(x) = \lim_{M \rightarrow \infty} n_{H_M}(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{2\pi} \sqrt{4-x^2} dx \quad (9)$$

可以推出 $N_{H_M}(x)$ 的具体表达形式为

$$N_{H_M}(x) = \begin{cases} 0, & x < -2 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} B\left(\frac{x^2}{4}; \frac{1}{2}, \frac{3}{2}\right), & -2 \leq x < 0 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} B\left(\frac{x^2}{4}; \frac{1}{2}, \frac{3}{2}\right), & 0 \leq x < 2 \\ 1, & x \geq 2 \end{cases} \quad (10)$$

其中， $B(x; a, b) = \int_0^x t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt$ 为不完全贝塔函数。

本文利用雷达发射信号采样值构造信号 Wigner 矩阵，将其特征值的概率分布函数作为公式 (1) 中的 $g(\cdot)$ ；相应地，由噪声采样值构造噪声 Wigner 矩阵，再将其特征值的概率分布函数作为式 (1) 中的 $f(\cdot)$ 。

2.2 $L(\cdot)$ 函数的构造

假设 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 为两个基于同一符号集的两个概率分布，那么 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 的 KL 散度可以定义为^[9,10]

$$D_{KL}(f \| g) = \int f(x) \lg \frac{f(x)}{g(x)} dx \quad (11)$$

并且 $D_{KL}(f \| g) \geq 0$ 恒成立。

将式(11)展开为

$$D_{KL}(f \| g) = \int f(x) \lg(f(x)) dx - \int f(x) \lg(g(x)) dx \quad (12)$$

可见，若已知分布函数，则能计算出它们的 KL 散度值。本文将式(12)作为白噪声信号集合 Y 和雷达信号集合 X 之间的距离函数，即式(1)中的 $L(\cdot)$ 。

2.3 评价指标函数 $d(\mathbf{Y}, \mathbf{X})$ 的建立

假设随机变量 $X = \{x(1), x(2), \dots, x(M)\}$ 服从 $X \sim F_X(x)$ 分布，下面对随机变量 X 做概率积分变换。

定义： $Y = F_X(x) (Y \in [0, 1])$ ，并且随机变量 Y 的概率分布为均匀分布。

可以将 Y 表示为： $Y \sim U[0, 1]$ ，通过概率积分变换将 X 的分布转换为 Y 在 $[0, 1]$ 上的均匀分布，用来简化计算 KL 散度的复杂度。

对式(12)的变量 x 做概率积分变换可以推出：

$$D_{KL}(f \| g) \approx - \sum_{m=1}^M (y_m - y_{m-1}) \lg \left(\frac{G(y_m) - G(y_{m-1})}{y_m - y_{m-1}} \right) \quad (13)$$

Y 的经验分布函数为

$$G_M(y) = \frac{1}{M} \text{count} \{ \{y(1), y(2), \dots, y(M)\} \leq y \} \quad (14)$$

其中, $\text{count} \{ \{y(1), y(2), \dots, y(M)\} \leq y \}$ 表示 $\{y(1), y(2), \dots, y(M)\}$ 中小于或等于 y 的元素个数, 其中 $\{y(1), y(2), \dots, y(M)\}$ 为 Y 的观测值。

对于任意一个 y 和任意一个 $\varepsilon > 0$, 有如式(15)的定理:

$$\lim_{M \rightarrow \infty} P \{ |G_M(y) - G(y)| \geq \varepsilon \} = 0 \quad (15)$$

当 $M \rightarrow \infty$ 时, 可以用经验分布函数 $G_M(y)$ 代替样本的总体分布函数 $G(y)$ 。

所以可以将式(13)表示为

$$D_{KL}(f \| g) \approx - \sum_{m=1}^M (y_m - y_{m-1}) \lg \left(\frac{G_M(y_m) - G_M(y_{m-1})}{y_m - y_{m-1}} \right) \quad (16)$$

其中, $y_m - y_{m-1} = \frac{1}{M}$, $y_0 = 0$, $y_M = 1$ 。

令 $y(m) = N_{H_M}(\lambda_m)$, $N_{H_M}(\cdot)$ 为上文求出的 Wigner 矩阵的特征值分布函数, λ_m 为雷达信号 Wigner 矩阵的特征值。

将式(14)代入到式(16)可以得到:

$$D_{KL}(f \| g) = - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \lg \{ \text{count}(y_m, y_{m-1}) \} \quad (17)$$

其中,

$$\text{count}(y_m, y_{m-1}) = \text{count} \{ \{N_{H_M}(\lambda_{x_1}), \dots, N_{H_M}(\lambda_{x_M})\} \leq y_m \} - \text{count} \{ \{N_{H_M}(\lambda_{x_1}), \dots, N_{H_M}(\lambda_{x_M})\} \leq y_{m-1} \}$$

将式(17)代入到式(1)中可以得到

$$d(Y, X) = - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \log \{ \text{count}(y_m, y_{m-1}) \} \quad (18)$$

算法中作为参照标准的白噪声信号为理想白噪声信号, 即信号的带宽无限, 功率谱在整个频域范围内均匀分布, 信号自相关函数为一个冲激函数。采用理想白噪声信号作为参照的主要原因是: 理想白噪声信号的信号特性有利于式(12)的简化, 有利于降低算法的复杂度, 简化后的 KLD 的值仅与测试信号自身的特性有关, 与白噪声信号参数特性无关, 所以在比对的过程中没有考虑噪声的带宽影响。

3 仿真实验

这里选用工程中常用的 13 类雷达信号波形进行抗截获性能分析, 即: 常规信号(NS)、线性调频信号(LFM)、多项式调频信号(PPS)、双线性调频信号(DLFM)、分段线性调频信号(MLFM)、非线性调频信号(NLFM)、二相编码信号(BPSK)、四相编码信号(QPSK)、多相编码信号(MPSK)、频移键控信号(FSK)、线性调频-二相编码复合调制信号

(LFM/BPSK)、频移键控-相位编码复合调制信号(FSK/BPSK)和噪声调频信号^[11,12]。并简要通过仿真验证了频率捷变和脉冲重复频率(PRF)对雷达信号抗截获性能的影响。3.1 节分析了一定参数选取情况下前 12 类信号的抗截获性能, 3.2 节分析了相同带宽时不同信号的抗截获性能, 3.3 节分析了噪声调频雷达信号的抗截获性能, 3.4 节和 3.5 节分别分析了频率捷变和 PRF 对抗截获性能的影响。

3.1 前 12 类信号的抗截获性能

仿真参数设置如下:

信号公共参数: 总长度为 2000 采样点, 采样频率为 100 MHz。其他参数如下:

(1) NS: 载频 30 MHz;

(2) LFM: 载频 5 MHz, 调频系数为 3×10^{12} Hz/s;

(3) PPS: 载频 10 MHz, 多项式系数 1 为 10^{11} Hz/s, 系数 2 为 15×10^{16} Hz/s;

(4) DLFM: 载频 10 MHz, 上升段调频系数为 4×10^{12} Hz/s, 下降段调频系数为 -4×10^{12} Hz/s;

(5) MLFM: 信号分两段, 载频均为 10 MHz, 调频系数均为 3×10^{12} Hz/s;

(6) NLFM: 采用 S 型函数进行构造, 载频为 10 MHz, 调制带宽为 10 MHz;

(7) BPSK: 采用的 PN 码为 [1 1 1 1 1 0 0 1 1 0 1 0 1], 码元个数为 13, 码元宽度为 154 采样点, 载频为 30 MHz;

(8) QPSK: 采用的 PN 码为 [0 1 2 3 1 3 1 3 1 3 2 1 0], 码元个数为 13, 码元宽度为 154 采样点, 载频为 30 MHz;

(9) MPSK: 采用 16 位 Frank, P1, P2, P3 和 P4 码, 码元宽度为 125 采样点, 载频为 30 MHz;

(10) FSK: 采用的调频序列为 [15 20 5 10 30 25 10 15 25 30] MHz, 每个频点持续时间为 200 采样点;

(11) LFM/BPSK: 采用的 PN 码为 [1 1 1 1 1 0 0 1 1 0 1 0 1], 码元个数为 13, 码元宽度为 154 采样点, 载频为 30 MHz, 调频系数为 2×10^{12} Hz/s;

(12) FSK/BPSK: 调频序列为 [20 10 30 20] MHz, 每跳中的 PN 码为 [0 1 1 0], 码元宽度为 125 采样点;

仿真结果如图 1 所示。

从仿真结果可以看出, 在上述参数选择条件下, 线性调频信号有着较好的抗截获性能, 而常规信号抗截获性能最差。多相编码信号抗截获性能相近。采用频率调制类的信号抗截获性能比采用相位调制类的信号抗截获性能更好。

3.2 相同带宽情况下信号的抗截获性能

信号的发射带宽对信号的抗截获性能有着较大

的影响, 相同的发射信号类型在不同的带宽的情况下, 抗截获性能往往不同, 下面着重分析在相同带宽情况下各个信号的抗截获性能。信号的带宽设置为 0.4 MHz, 仿真结果如图 2 所示。

由于常规雷达信号在脉冲内部为点频信号, 所以图 2 不包含。从图 2 的仿真结果可以看出, 在相同带宽的情况下, 调频类雷达信号有着几乎相同的抗截获性能, 调相类雷达信号的抗截获性能优于调频类信号, 复合调制信号则有着最优的抗截获性能。

3.3 噪声调频信号的抗截获性能

噪声调频雷达的发射信号为^[13,14]:

$$s(t) = E \cos[\omega_0 t + \theta(t)] \quad (19)$$

其中, E 为发射信号的幅度; $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 为发射信号的载频; $\theta(t) = D_0 \int_0^t \xi(\tau) d\tau$ 为瞬时相位, D_0 为调制信号每伏特发射信号角频率相位变化的大小; $\xi(t)$ 为一个分布是高斯分布的平稳随机过程。

仿真参数^[15,16]:

(1) 信号总长度为 1200 采样点, 采样频率为 2 GHz, 载频 f_0 为 100 MHz, 带宽为 100 MHz。

(2) 信号总长度为 1200 采样点, 采样频率为 2 GHz, 载频 f_0 为 100 MHz, 带宽为 400 MHz。

分别对上述两种参数的噪声调频信号进行蒙特卡洛仿真, 仿真次数为 1000 次。仿真参数(1)和(2)情况下, 计算所得 KLD 值分别为 0.9125 和 0.7537。

仿真结果表明带宽为 400 MHz 的噪声调频信号抗截获性能要优于带宽为 100 MHz 的信号。

3.4 载频捷变对信号抗截获性能的影响

雷达载频捷变是一种常见的脉间抗截获技术, 有脉间捷变、脉组捷变等。捷变方式可以按一定的规律变化, 也可以随机跃变, 还可以有针对性地在干扰频带的空隙或弱区进行自适应频率捷变。这里采用调频连续波雷达信号作为测试信号, 时域表达式为

$$s(t) = E \exp\left[j \cdot 2\pi \left(f_0 t + K_{FM} \int_0^t \tau d\tau\right)\right] \quad (20)$$

其中, E 为发射信号的幅度, f_0 为载频, K_{FM} 为调

频斜率。仿真信号长度为 12000 采样点, 采样率为 3 GHz, 平均分成 4 段, 每段长度为 3000 点即 1 μ s, 调频斜率均 300×10^{12} Hz/s, 载频按如下 4 种方式捷变: (1)[350 350 350 350] MHz, (2)[350 350 300 300] MHz, (3) [350 300 200 230] MHz, (4) [350 300 200 630] MHz。4 种捷变方式情况下, 计算所得 KLD 值分别为: 0.8906, 0.8750, 0.7031 和 0.5234。

仿真结果表明载频捷变比载频恒定有着更好的抗截获性能, 而且载频变化的越频繁、越剧烈, 抗截获的性能越好。

3.5 脉冲重复频率对信号抗截获性能的影响

脉冲重复间隔(Pulse Repetition Interval, PRI)即雷达相邻发射脉冲前沿的时间间隔, 其倒数被称为脉间重复频率(PRF), 简称重频。这里着重分析重频参差对信号抗截获性能的影响, 重频参差雷达采用两个或两个以上的脉冲重复频率, 通过顺序、循环利用脉冲重复序列集合中的 PRI 值产生脉冲序列。

重频参差雷达发射信号时域表达式为

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sin(2\pi f_c t) \cdot \text{rect}(t - nT_r) \quad (21)$$

仿真参数: 信号总长度为 8000 采样点, 采样率为 100 MHz, 共 10 个脉冲, 脉冲宽度均为 100 点, 载频均为 5 MHz。脉冲重复频率设置为: (1)PRF 固定, 为 800 点; (2) PRF 三重参差, 分别为: 200 点、500 点、800 点。

PRF 参数(1)和(2)情况下, 计算所得 KLD 值分别为: 0.8672 和 0.7578。

比较两种 PRF 参数选取情况下的仿真结果可以发现, 采用重频参差技术可以有效改善雷达信号的抗截获性能。

4 结束语

本文针对雷达信号波形抗截获性能评价问题, 以高斯白噪声信号为基准, 将不同雷达信号波形与高斯白噪声信号的信息散度作为抗截获性能指标,

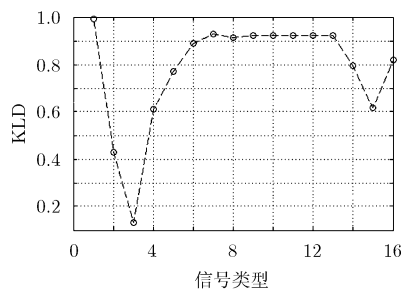


图1 前12类雷达信号的抗截获性能

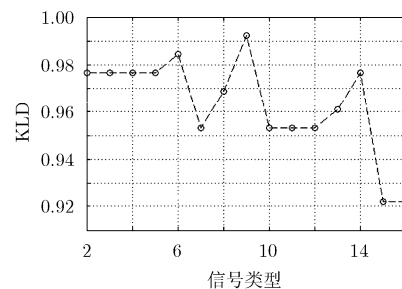


图2 带宽相同时各信号抗截获性能

为雷达信号波形抗截获性能评价建立了一种可量化的度量方法。理论分析和仿真结果表明,信息散度越小,雷达信号功率谱分布越接近于白噪声的功率谱分布,信号能量在频带范围内的分布也就越均匀,在同等发射能量和带宽情况下,该信号波形与白噪声的相似性越大,其抗截获性能也就越好。论文最后应用 MATLAB 仿真,针对 13 类常用雷达信号波形,验证了所提算法的有效性,为工程中设计、评价雷达信号的抗截获性能提供了一定参考。

参考文献

- [1] 陈利虎. 跳频信号的侦察技术研究[D]. [博士学位文], 国防科学技术大学, 2009.
- [2] WANG F, SELLATHURAIM, LIU W, *et al.* Security information factor based airborne radar RF stealth[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2015, 26(2): 258-266. doi: 10.1109/JSEE.2015.00031.
- [3] FANCEYC and ALABASTER M. The metrication of low probability of intercept waveforms[C]. IEEE International Conference on Waveform Diversity and Design, Falls Niagara, Canada, 2010: 58-62. doi: 10.1109/WDD.2010.5592358.
- [4] TUMMINELLO M, LILLO F, and MANTEGNA R N. Shrinkage and spectral filtering of correlation matrices: a comparison via the Kullback-Leibler distance[J]. *Acta Physica Polonica B*, 2007, 38: 4079-4088.
- [5] CONTERAS-REYES J E. Asymptotic form of the Kullback-Leibler divergence for multivariate asymmetric heavy-tailed distributions[J]. *Physical A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2014, 395(4): 200-208.
- [6] ERD OS L, KNOWLES A, YAU H T, *et al.* The local semicircle law for a general class of random matrices[J]. *Electronic Journal of Probability*, 2013, 18(12): 2140-2154. doi: 10.1214/EJP.v18-2473.
- [7] BAI Z D, MIAO B, and TSAY J. Convergence rates of the spectral distributions of large Wigner Matrices[J]. *International Journal of Computer Mathematics*, 2002, 1(1): 65-90.
- [8] GÓTZE F, NAUMOV A, TIKHOMIROV A N, *et al.* Local semicircle law under weak moment conditions[J]. *Doklady Mathematics*, 2016, 93(3): 248-250. doi: 10.1134/S1064562416030029.
- [9] BIROLI G, BOUCHAUD J P, and POTTERS M. The student ensemble of correlation matrices: eigenvalue spectrum and Kullback-Leibler entropy[J]. *Acta Physica Polonica B*, 2007, 38: 4009-4026.
- [10] BU Y, ZOU S, LIANG Y, *et al.* Estimation of KL divergence between large-alphabet distributions[C]. IEEE International Symposium on Information Theory. Barcelona, Spain, 2016: 1118-1122.
- [11] JIANG L, LI L, and ZHAO G Q. Polyphase coded low probability of intercept signals detection and estimation using time-frequency rate distribution[J]. *IET Signal Processing*, 2016, 10(1): 46-54. doi: 10.1049/iet-spr.2014.0020
- [12] 李秀友, 董云龙, 张林, 等. 一种新的低旁瓣 LFM 噪声雷达波形设计方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(6): 1452-1459. doi: 10.11999/JEIT151070.
- LI Xiuyou, DONG Yunlong, ZHANG Lin, *et al.* A new design method of low side lobe level LFM noise radar waveform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(6): 1452-1459. doi: 10.11999/JEIT151070.
- [13] 倪浩杰. 基于 FPGA 的噪声调频雷达信号处理系统的设计与实现[D]. [硕士学位论文], 南京理工大学, 2008.
- [14] 王钊, 顾红, 苏卫民, 等. 基于共轭噪声组的宽带噪声雷达机动目标参数估计[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(5): 1071-1077. doi: 10.11999/JEIT140737.
- WANG Zhao, GU Hong, SU Weimin, *et al.* Parameter estimation of maneuvering targets in wideband noise radar based on conjugate noise group[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(5): 1071-1077. doi: 10.11999/JEIT140737.
- [15] 郑慧芳, 邓云凯. 随机噪声调频信号带宽分析[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(15): 4351-4357. doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2009.15.018.
- ZHENG Huifang and DENG Yunkai. Analysis of random noise frequency modulation signal's bandwidth[J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(15): 4351-4357. doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2009.15.018.
- [16] HEUSCHEL E R. Time-frequency, bi-frequency detection analysis of noise technology radar[D]. [Ph.D. dissertation], Monterey California Naval Postgraduate School, 2006.
- 王旭东: 男, 1978年生, 博士, 副教授, 研究方向为信号检测、参数估计、FPGA设计应用.
- 陆威: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号检测与估计.
- 闫贺: 男, 1985年生, 博士, 讲师, 研究方向为广域运动目标监视.