

7-2-2020

Design and Realization of Radar Warning Receiver Modeling System

Limin Liu

Department of Electronical and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

Cheng Cheng

Department of Electronical and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

Zhuangzhi Han

Department of Electronical and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Design and Realization of Radar Warning Receiver Modeling System

Abstract

Abstract: *According to the structure of the mainstream modern airborne radar warning receiver, a modeling method of radar warning receiver simulation system was proposed, and it realized by SystemVue. The system consists of radar signal interception, parameter estimation and signal sorting, and pulse description words can be obtained at last.* The application of sorting method based on detection of single source point in the system improves the robustness. Simulation results verify the scheme feasibility.

Keywords

radar warning receiver, direction of arrival, time-frequency single source point, cyclic correlation, simulation

Recommended Citation

Liu Limin, Cheng Cheng, Han Zhuangzhi. Design and Realization of Radar Warning Receiver Modeling System[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(4): 859-866.

雷达告警接收机模拟系统设计与实现

刘利民, 程呈, 韩壮志

(军械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要: 根据现代主流机载雷达告警接收机结构, 提出一种建立雷达告警模拟系统的思路, 并在 SystemVue 环境下建立了模拟系统。该系统主要由前段截获、参数估计以及信号分选三大部分组成, 系统模拟了雷达信号截获、信号分选的过程, 最终得到各雷达信号的脉冲描述字。将时频单源点检测的信号分选算法应用于模拟系统中, 提高了整个系统的鲁棒性。仿真结果表明了模拟系统设计体制的可行性。

关键词: 雷达告警接收机; 波达方向; 时频单源点; 循环相关; 仿真

中图分类号: TP 391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 04-0859-08

Design and Realization of Radar Warning Receiver Modeling System

Liu Limin, Cheng Cheng, Han Zhuangzhi

(Department of Electronical and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: According to the structure of the mainstream modern airborne radar warning receiver, a modeling method of radar warning receiver simulation system was proposed, and it realized by SystemVue. The system consists of radar signal interception, parameter estimation and signal sorting, and pulse description words can be obtained at last. The application of sorting method based on detection of single source point in the system improves the robustness. Simulation results verify the scheme feasibility.

Keywords: radar warning receiver; direction of arrival; time-frequency single source point; cyclic correlation; simulation

引言

机载雷达告警接收机(Radar Warning Receiver)是用于截获、分析、识别地面雷达信号以判断威胁程度并实时告警的雷达对抗设备。通过被动测量和分析照射到载机的雷达波, 向飞行员提示威胁的方位、类型和工作状态等信息。在现代战争条件下, 作战飞机面临大量以雷达为主要火控手段的防空、制空武器的威胁, 如果对战术态势没有全面的把

握, 不能及时发现自身遭到攻击, 就无法采取相应保护措施, 在现代战争中也就不法生存。机载雷达告警接收机已成为现代作战飞机最基本的电子战装备, 所以研究机载雷达告警接收机是必要的。

目前, 国内对于雷达告警接收机模拟系统的研究甚少, 对于模拟系统的设计主要还是遵循传统的雷达告警接收机结构体制, 包括接收天线、DOA 测量、TOA 测量、信号分选、威胁识别、环境分类等部分, 系统设计繁琐, 并且对于角度以及时间的测量完全依赖硬件实现功能, 对于硬件的精度要求很高。这种传统的设计方案, 虽然能达到雷达告警接收机的基本要求, 但将其应用于模拟仿真时, 会带来一系列的问题, 如模拟仿真进行大量实



收稿日期: 2014-11-13 修回日期: 2014-12-26;
基金项目: 国家自然科学基金(61101074);
作者简介: 刘利民(1971-), 男, 河北冀州, 副教授, 博士, 研究方向为网络计算机、计算机应用; 程呈(1991-), 男, 山西运城, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理、盲源分离。

<http://www.china-simulation.com>

验,对于硬件的承受能力是一大考验;而且一次实验成本高,不满足模拟仿真的需求;系统设计繁琐、模块众多,在实验中也会带来更多的干扰因素,不利于仿真实验的进行以及结果分析。

本文在 SystemVue 环境下结合瑞典 BOW 雷达告警接收机结构,提出一种建立模拟雷达告警接收机的设计方案。首次在该环境下实现了雷达告警接收机模拟系统。系统仅包含信号生成、前段截获以及信号分选三大部分,简化了系统设计,但实现了雷达告警接收机的全部功能,并在 SystemVue 环境下进行了纯软件实现。SystemVue 软件也可将该软件系统与硬件相连接,实现半实物仿真,有利于系统的扩展,使系统具有良好的实际应用价值。算法方面,摒弃了传统信号分选方法,将基于时频单源点检测的盲信号分选算法应用于雷达告警接收机的模拟系统的信号分选部分,该方法不需要逐一对

每个信号的脉冲描述字进行测量,通过对目标信号时域波形的准确估计得到每一信号的脉冲描述字。最后利用建立的模拟雷达告警接收机将本文提出的信号分选算法与其他信号分选算法进行对比实验,实验结果验证了本文提出的基于时频单源点检测的信号分选算法的有效性与优越性。

1 雷达告警接收机结构

雷达告警接收机截获空域混合信号,对信号进行处理,得到目标信号的脉冲描述字;再将脉冲描述字提供给后续威胁判断以及辐射源定位模块,最终将威胁程度以及辐射源位置告知给操作员,供操作员决策。根据雷达告警的任务及功能,结合当前主流雷达告警接收机结构,提出一种雷达告警接收机设计结构,如图 1 所示。

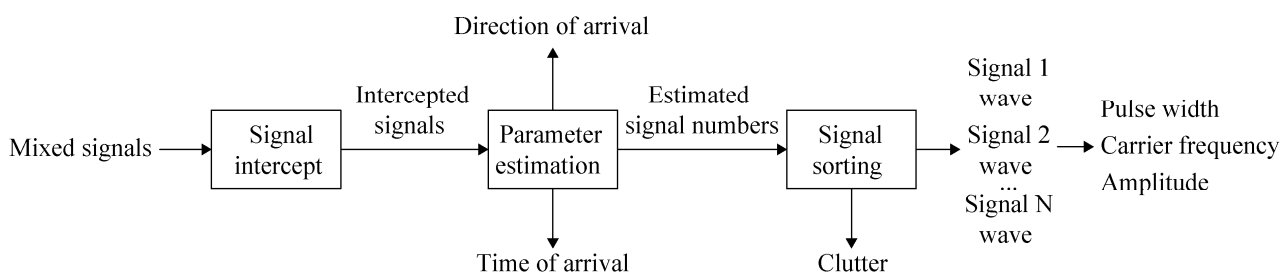


图 1 雷达告警模拟系统设计图

由图 1 可知,为完成对雷达信号的侦察任务,设计以上模块,主要包括前端截获以及后端信号处理两大部分。整个系统输入为空域混合信号,由多个雷达信号以及噪声信号、干扰进行随机线性混合;输出为脉冲描述字,本文利用 5 个脉冲描述字对每个分选出来的雷达信号进行描述,包括信号到达角(DOA)信息、脉宽(PW)、射频(RF)、幅度(PA)和到达时间(TOA);中间的信号分选部分应用盲信号分离技术,提出一种基于时频单源点检测的新信号分选方法,不再利用传统的将截获的信号脉冲与信号数据库中已有的信号进行对比、聚类得到信号类型的方法,提高信号分选速度与精度。

1.1 信号截获及 TOA 测量模块

信号截获模块在模拟中主要是判断接收机的频域截获范围、功率大小、能量大小、作用距离以及截获能力。若空域信号达到接收机截获功率的最小值,能量足够大,且信号频率、距离均在在截获频率范围之内,则认为,该信号能够被截获,若不满足其中一项,信号不被截获。具体的信号截获判断流程图如图 2 所示。

经过判断后的截获信号作为空域混合信号进行分析。对于信号到达时间,本次模拟利用文献[5]中,作者提出的倒序相关累加的方法盲估计出脉冲的到达时间,具体流程不再赘述。

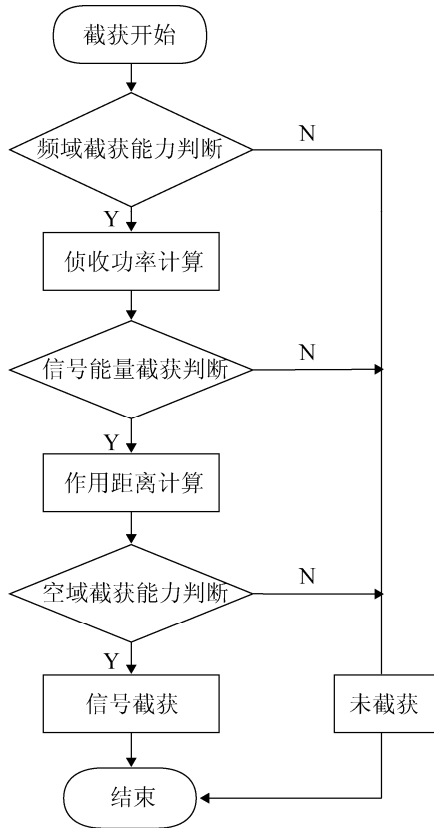


图 2 截获判断流程

1.2 信号个数、到达角联合估计模块

该模块的输入为截获的混合信号, 输出为信号的 DOA 信息以及估计的源信号数目, 运用循环相关算法进行联合估计。

设观测信号为 M 个目标信号混合而成, 则观测信号为:

$$x(t) = As(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 为观测信号; $s(t)$ 为雷达发射信号; $n(t)$ 为噪声信号; A 为混合矩阵。设雷达的发射信号为线性调频信号, 则 $s(t)$ 可以表示为:

$$s(t) = e^{j(\omega_0 t + \omega_1 t^2 + \theta_0)} \quad (2)$$

式中: ω_0 为信号载频; ω_1 为信号的调制率; θ_0 为信号初相。为简化公式推导, 本文中初相为 0, 且 $s(t)$ 与 $n(t)$ 相互统计独立。下面对观测信号进行循环相关变换。

令观测信号 $x(t)$ 为零均值非平稳信号, 则其时变相关函数记为:

$$R_x(t, \tau) = E\{x(t)x^*(t + \tau)\} \quad (3)$$

显然时变相关函数 $R_x(t, \tau)$ 具有周期性, 那么可以利用时间平均求取函数的均值, 即时变相关函数变为:

$$R_x(t, \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N + 1} \sum_{n=-N}^N x(t + nT_0)x^*(t + nT_0 + \tau) \quad (4)$$

将式(4)进行 Fourier 级数展开得:

$$R_x^\alpha(\tau) = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{+T_0/2} R_x(t, \tau) e^{-j2\pi\alpha t} dt \quad (5)$$

则定义观测信号的循环相关函数为:

$$R_x^\alpha(\tau) = \langle x(t)x^*(t + \tau) e^{-j2\pi\alpha t} \rangle_t \quad (6)$$

式中: $\langle \cdot \rangle_t$ 为求时间平均。在不存在多径效应情况下, 对于信号循环相关函数的求解一般采用式(7):

$$R_x^\alpha(l) = \frac{1}{N-1} \sum_{h=1}^{N-l} x(h)x^*(h+l) e^{-j2\pi\alpha h} \quad (7)$$

式中: l 为延迟, 单径时为 $0.5 N$ 。将(1)、(2)式带入(6)式中, 得到观测信号的循环相关函数为:

$$R_x^\alpha(\tau) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=m}^M f_1(\tau) \delta[2\pi\alpha + 2\omega_1\tau] + \sum_{m=1}^M \sum_{n \neq m}^M f_2(\tau) \delta[2\pi\alpha + 2\omega_1(\tau + \tau_m - \tau_n)] + f_n(\tau) \delta(\alpha) \quad (8)$$

式中: $f(\tau)$ 表示关于 τ 的函数, 由于关注的只是信号能量的集中位置, 即 δ 函数, 所以对于 τ 的函数在此简记。所以由式(8)可知, 信号能量集中在 $\alpha = -\omega_1(\tau + \tau_m - \tau_n) / \pi$ 处, 噪声的能量集中在零循环频率处。则混合信号循环相关变换谱中最大峰的个数即为混合信号中源信号的个数; 而最大峰对应的循环相关频率为:

$$\alpha_m = \arg \max |R_x^\alpha(l)| \quad (9)$$

由于循环相关频率对应的角度信息即为源信号的 DOA 估计。

1.3 时频单源点检测模块

该模块的输入为观测信号以及辐射源个数估计信息, 输出为每一雷达源信号的时域波形。运用时频单源点检测的方法, 不仅可以准确的估计出信号的时域波形, 并且, 该方法对于实际侦察任务中出现的信噪比小、快拍数少的问题也有很好的适应能力, 具有实际应用价值。

对式(1)两边进行短时傅里叶变换, 得:

$$x(t, f) = As(t, f) + n(t, f) \quad (10)$$

式中: t, f 张成的平面即为整个时频平面; $x(t, f)$, $s(t, f)$, $n(t, f)$ 分别是观测矩阵、信号矩阵以及噪声矩阵的短时傅里叶变换的结果。若在整个时频平面中, 任意一点 (t, f) 上有 $s_i(t, f) \gg s_k(t, f) i \neq k$ 时, 则认为在点 (t, f) 上只存在信号 $s_i(t, f)$, 则定义点 (t, f) 为信号 $s_i(t, f)$ 的时频单源点。

为简化计算, 忽略天线噪声存在, 即:

$$x(t, f) = a_k s_k(t, f) \quad (11)$$

各观测信道的观测信号与第 m 个信道的观测信号的时频比, 得:

$$\omega = \left[\frac{x_1(t, f)}{x_m(t, f)}, \dots, 1, \frac{x_{m+1}(t, f)}{x_m(t, f)}, \dots, \frac{x_M(t, f)}{x_m(t, f)} \right] \quad (12)$$

则当观测信号处于单源点时, 根据式(11)可知, 其信号的时频比为常数。则信号 $s_k(t)$ 对应的混合矢量进行估计为:

$$\hat{a}_k = \left[\frac{1}{L_k} \sum_{i=1}^{L_k} \frac{x_1(t_{k_i}, f_{k_i})}{x_m(t_{k_i}, f_{k_i})}, \dots, \frac{1}{L_k} \sum_{i=1}^{L_k} \frac{x_M(t_{k_i}, f_{k_i})}{x_m(t_{k_i}, f_{k_i})} \right] \quad (13)$$

式中: L_k 为信号单源点的个数。对于存在天线噪声的情况, 通常时频比不是常数, 但由于混合信号有明显的聚类特性, 利用其特性, 统计检测单源点。令 $m=1$ 时, 对应的时频比矩阵为:

$$\tilde{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \frac{x_2(\tilde{t}_1, \tilde{f}_1)}{x_1(\tilde{t}_1, \tilde{f}_1)} & \frac{x_2(\tilde{t}_2, \tilde{f}_2)}{x_1(\tilde{t}_2, \tilde{f}_2)} & \dots & \frac{x_2(\tilde{t}_{N_i}, \tilde{f}_{N_i})}{x_1(\tilde{t}_{N_i}, \tilde{f}_{N_i})} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{x_M(\tilde{t}_1, \tilde{f}_1)}{x_1(\tilde{t}_1, \tilde{f}_1)} & \frac{x_M(\tilde{t}_2, \tilde{f}_2)}{x_1(\tilde{t}_2, \tilde{f}_2)} & \dots & \frac{x_M(\tilde{t}_{N_i}, \tilde{f}_{N_i})}{x_1(\tilde{t}_{N_i}, \tilde{f}_{N_i})} \end{bmatrix} \quad (14)$$

则对于式(13)中的混合矢量的估计可表示为:

$$\hat{e}_k = \left[\frac{1}{L_k} \sum_{i=1}^{L_k} \tilde{\omega}_i(1, t), \dots, \frac{1}{L_k} \sum_{i=1}^{L_k} \tilde{\omega}_i(M, t) \right] \quad (15)$$

将观测信号的自相关矩阵特征值分解得:

$$R = USU^H \quad (16)$$

根据单源点定义, 在单源点处只存在一个源信号, 又根据奇异值分解特性, 当只存在一个信号时, 奇异值矩阵 S 中最大的奇异值对应的奇异

值向量就是对混合矢量的估计。则奇异值矩阵 S 中最大值对应酉矩阵 $U = [u_1, u_2, \dots, u_M]$ 中的奇异值向量, 即:

$$\hat{e}_k = u_{S_{\max}} \quad (17)$$

式中: $u_{S_{\max}}$ 表示 S 中最大值对应的奇异值向量。上述只是当 $m=1$ 时的情况, 改变 m 的取值, 重复上述过程, 即可求出所有混合矢量估计。对于混合矢量估计其实就是混合矩阵中各分量的估计。由于遍历 m 的值, 对每一 m 值下的混合矢量进行估计, 对于混合矩阵 A 而言, 其实就是对 A 中各分量进行多次估计。因此只需要对各分量估计 \hat{e}_k 进行聚类分析, 就可得到混合矩阵估计。又由于在信号个数、到达角联合估计模块中已经对源信号个数进行了准确估计, 在信号分选模块中作为先验知识, 所以, 利用 k 均值聚类方法对多次估计的混合矢量进行聚类, 得到最终混合矩阵估计。通过混合矩阵以及观测矩阵就可以求出各雷达源信号以及噪声的时域波形。

2 SystemVue 软件实现

SystemVue 软件是安捷伦公司开发研制的, 内部搭载了详细的雷达、电子战模块, 在其公司对软件的测试报告^[6-8]中显示, 该软件可形成纯软件的完整的雷达对抗系统。也可通过接口连接相应硬件设备, 实现半实物系统。并且该软件可调用 Matlab 程序以及 C++ 程序, 形成程序包, 也可直接利用相关语言进行直接编程, 应用于系统的模块中。利用该软件即可实现纯软件的改进型电子侦察系统, 也可实现半实物系统。

2.1 混合信号的产生

利用该软件里“RADAR Parts”中的线性调频信号产生模块模拟雷达信号, 如图 3。

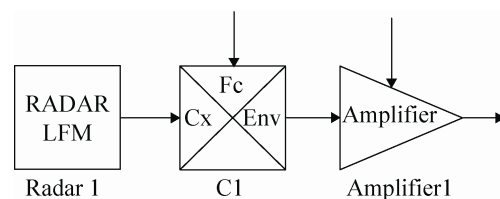


图 3 线性调频信号产生

一部雷达的发射信号由“RADAR_LFM”模块、“CxToEnv”模块以及放大器模块组成。利用放大器来体现混合矩阵。设放大器的放大倍数为 A_m , 则 M 个观测信号第 k 个接收信道接收时对应的放大倍数为:

$$A_k = [A_{k1}, A_{k2}, \dots, A_{kM}] \quad (18)$$

所以, 对于 M 个观测信号被 K 个信道截获时, 矩阵 A 可以表示为:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1M} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{K1} & A_{K2} & \dots & A_{KM} \end{bmatrix} \quad (19)$$

利用放大器的放大倍数组成混合矩阵, 产生了混合信号。任意接收信道所接收的混合信号如图 4 所示。

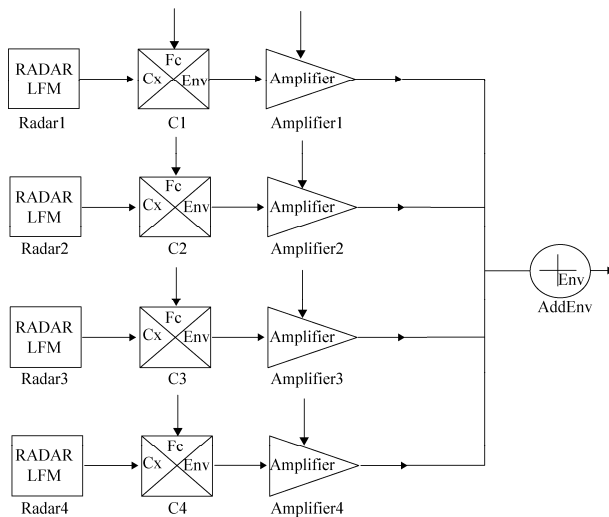


图 4 任一信道接收混合信号

2.2 仿真实验

本次仿真的软件版本为: SystemVue2013.08 和 MATLAB R2011b; 电脑配置为: Inter (R) Core (TM) i3-4150, 3.50 GHz, 4 GB 内存, Windows 7 操作系统。

雷达告警接收机模拟系统的搭建时, 信号产生部分由软件本身存在的“RADAR_Parts”实现, 其他模块都是利用“Mathlang”模块调用 Matlab 语句来实现功能的。

从图 5 可以看出, 经混合后的信号经过 3 个信道分别输入至雷达接收机前端的信号截获模块, 模块的输出为观测信号。该模块主要对输入信号矩阵化, 得到观测信号矩阵, 供进一步信号处理。

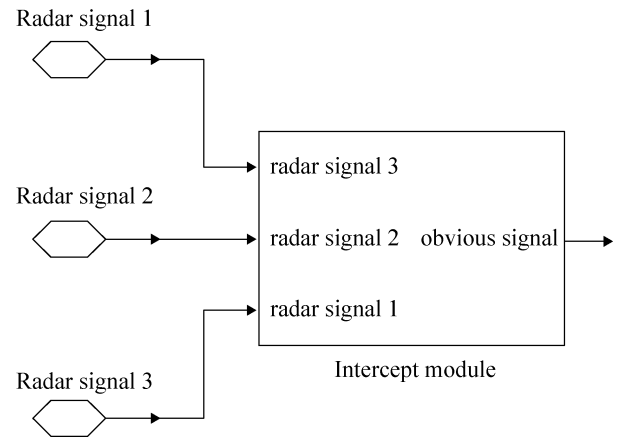


图 5 信号截获仿真

图 6 显示了信号主处理中的参数估计以及信号分选模块。信号到达时间以文档形式输出, 由“Sink”生成文档; 到达角估计以信号空间谱形式输出, 由模拟频谱仪显示。信号分选模块将雷达信号逐一分选出, 得到每一个目标信号的时域波形, 利用波形得到剩余脉冲描述字, 完成全部雷达告警接收机任务。

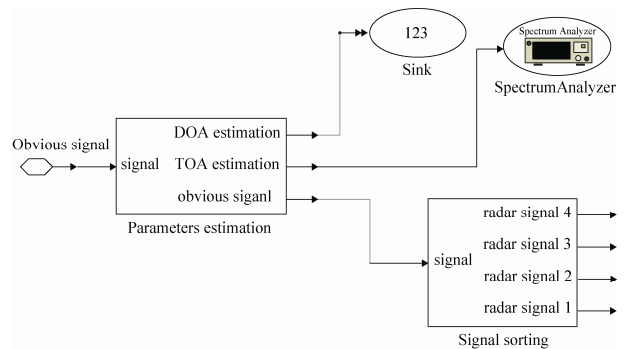


图 6 参数估计及信号分选

需要注意的是, 利用“Mathlang”对于剩余模块进行建模时, 输入输出个数以及名称需要对应, 否则建立系统后, 运行时会出现错误。各模块的输入输出如表 1 所示。

表 1 各模块输入、输出情况

模块名称	输入	输出
混合信号		Mixed_signal
信号截获	Mixed_signal	Obvious_signal
TOA 测量	Obvious_signal	TOA
辐射源个数、 DOA 联合估计	Obvious_signal	Source_number DOA
单源点检测	Obvious_signal Source_number	Signal_wave

2.2.1 信号产生及截获

设混合信号中含有 4 个雷达信号, 其参数由表 2 表示出来; 3 个观测信道。

表 2 雷达信号参数设置

Radar_signal	Name	Value	Units
1	Sample_frequency	5	KHz
	Pulse_width	0.2	μ s
	Starting_frequency	100	Hz
	Modulation_rate	20	()
	DOA	-42	$^{\circ}$
	Carry_frequency	1	KHz
2	Sample_frequency	5	KHz
	Pulse_width	0.4	μ s
	Starting_frequency	200	Hz
	Modulation_rate	30	()
	DOA	-12	$^{\circ}$
	Carry_frequency	1.2	KHz
3	Sample_frequency	5	KHz
	Pulse_width	0.6	μ s
	Starting_frequency	300	Hz
	Modulation_rate	40	()
	DOA	21	$^{\circ}$
	Carry_frequency	1.5	KHz
4	Sample_frequency	5	KHz
	Pulse_width	0.8	μ s
	Starting_frequency	400	Hz
	Modulation_rate	50	()
	DOA	50	$^{\circ}$
	Carry_frequency	2	KHz

实验开始后, 信号产生模块首先形成仿真雷达射频信号, 将角度信息同时赋予仿真信号。产生的雷达信号的时域波形如图 7 所示。

将信号数据输入至混合模块, 混合矩阵 A 设置为:

$$A = \begin{bmatrix} 0.5774 & 0.5774 & 0.5774 & 1.0000 \\ 0.2618 & -0.5270 & 0.3260 & -0.9570 \\ -0.3400 & 0.3846 & -0.2092 & 0.8317 \end{bmatrix}$$

则混合后的雷达信号即作为被截获的目标信号进入雷达告警接收机的观测信道中, 其信道中的截获信号如图 8 所示。

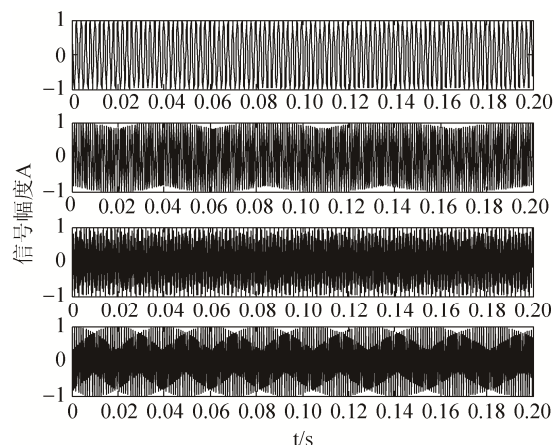


图 7 信号时域波形

2.2.2 参数估计及信号分选仿真

将产生的混合信号进行采样, 形成矩阵形式输入至参数估计模块进行参数估计。利用循环相关的方法将辐射源个数、DOA 联合估计出来, 参数估计模块得到的结果如图 8 所示。

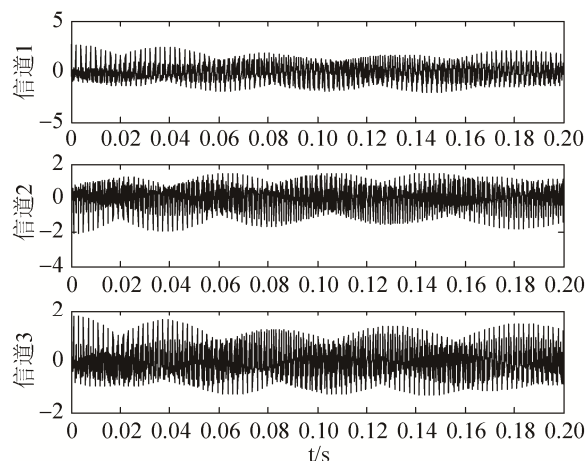


图 8 截获信号波形

图 9 中为由 4 阶 MUSIC 算法估计出的空间谱与本文提出的算法所估计出的空间谱的对比。由图 9 可以看出, 信号空间谱中存在 4 个峰值, 则可以

判断混合信号中存在 4 个目标信号, 遍历搜索整个空间谱, 找到峰值对应的横坐标, 即可得到信号的 DOA 估计。

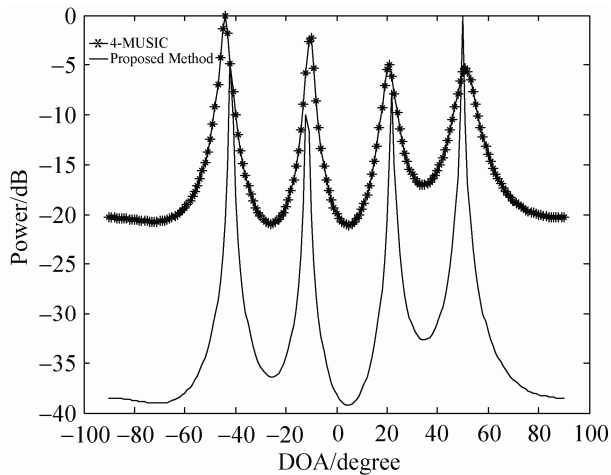


图 9 信号空间谱

由信号分选模块检测得到混合矩阵 $\hat{\mathbf{A}}$ 为:

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0.5795 & 0.5784 & 0.5804 & 0.5774 \\ 0.2574 & 0.3265 & -0.5513 & -0.5271 \\ -0.3396 & -0.2078 & 0.4782 & 0.3847 \end{bmatrix}$$

对比设置的混合矩阵 \mathbf{A} , 估计矩阵只是在顺序以及符号上略有不同。顺序的差异是由于盲信号分离技术产生的, 通过时间的排序就可解决这一问题; 而符号上的差异体现在信号波形的上下对称上, 对于脉冲描述字的提取不产生影响。基于单源点检测的信号分选算法能够有效分离出混合信号中的源信号时域波形, 通过波形, 即可得到源信号参数, 即感兴趣的目标信号信息。最终通过多次实验, 该系统得到的目标雷达信号的脉冲描述字 (PDW) 由信号频率、到达角、幅度以及脉宽组成, 得到的脉冲描述字见表 3。

由表 3 可知, 随着信噪比的提高, 对比源信号的基本参数, 整个系统得到的最终脉冲描述字的精度越来越高。每一目标信号的脉冲描述字, 对比雷达源信号的基本参数, 系统得到的脉冲描述字能够准确表示每一目标信号的信息, 完成雷达告警接收机的任务。

表 3 PDW 结果

SNR	序号	频率/KHz	幅度	脉宽/ μ s	到达角/ $^{\circ}$
-20dB	1	1.724	0.373	-43.325	0.632
	2	0.478	0.510	-16.601	1.534
	3	1.056	0.529	16.862	1.664
	4	0.113	0.762	46.420	1.827
-8dB	1	1.032	1.208	0.201	-41.325
	2	1.210	0.763	0.397	-12.601
	3	1.498	1.486	0.610	21.862
	4	1.989	1.310	0.803	49.420
5dB		1.010	1.208	0.200	-42.310
		1.200	0.763	0.401	-12.001
		1.502	1.486	0.613	21.041
		2.011	1.310	0.812	50.120

3 结论

本文在 SystemVue 软件的环境下实现了对机载雷达告警接收机的模拟仿真。首先提出了雷达告警接收机的结构; 然后结合结构中每一模块的实现方法进行了论述, 在整个系统中, 结合信号盲分离技术, 提出了基于循环相关的信号 DOA、个数联合估计算法以及基于单源点检测的信号分选算法; 最后进行了仿真实验, 证明了该系统设计方案的可行性, 同时也验证了算法的有效性。

该系统的优势主要体现在: (1) 仿真结构简单, 在完成雷达告警接收机任务的同时, 减少了系统模块, 使系统误差减小; (2) 将盲信号处理技术运用到告警接收机的信号参数估计模块, 提出时频单源点检测信号分选算法; (3) SystemVue 软件不仅能够进行纯软件系统仿真, 而且因其强大的软硬件结合、扩展能力, 使得能够借助实物进行半实物仿真, 增强系统的实际应用能力。该仿真系统的建立可以为下一步建立半实物仿真提供实验数据, 或是将该系统作为子系统, 应用到更大、更复杂的系统中去。仿真实验中也体现出系统在低信噪比的情况下, 表现出来的估计结果误差较大, 稳定性不强。下一步的主要在低信噪比条件下的系统稳定性及估计精度方面进行研究, 增强其适应能力, 提高实际应用价值。

参考文献:

- [1] 林波, 张增辉, 朱炬波. 基于压缩感知的 DOA 估计稀疏化模型与性能分析 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(3): 589-594. (Lin Bo, Zhang Zenghui, Zhu Jubo. Sparsity Model and Performance Analysis of DOA Estimation with Compressive Sensing [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(3): 589-594.)
- [2] 王珽, 张剑云. 色高斯噪声背景下相干信源DOA估计[J]. 航天电子对抗, 2012, 28(4): 32-35, 58. (Wang Ting, Zhang Jian-yun. DOA Estimation of Coherent Signals in Color Gaussian Noise [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2012, 28(4): 32-35, 58.)
- [3] 韩韬, 周一宇. 雷达信号的扩散特征及其在特定辐射源识别中的应用 [J]. 电子学报, 2013, 41(3): 502-507. (Han Tao, Zhou Yiyu. Diffusion features in radar specific emitter identification [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(3): 502-507.)
- [4] 张国柱, 黄可生, 姜文利, 等. 基于信号包络的辐射源细微特征提取方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(6): 741-742. (Zhang Guozhu, Huang Kesheng, Jiang Wenli, Zhou Yiyu. Emitter feature extract method based on signal envelope [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(6): 741-742.)
- [5] 胡国兵, 刘渝. 基于倒序相关累加的信号到达时间盲估计 [J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(3): 391-396. (Hu Guobin, Liu Yu. Blind Arrival Time Estimation of Signals Based on Correlation and Reversed Accumulation [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(3): 391-396.)
- [6] David Leiss, Anurag Bhargava. Radar System Design and Interference Analysis Using Agilent SystemVue [Z]// Agilent Technologies Application Note. 2010
- [7] David Leiss. Using Agilent SystemVue to Create Realistic Scenarios for Radar and EW Applications [Z]// Agilent Technologies Application Note, 2012.
- [8] David Leiss. Using SystemVue's Radar Library to Generate Signals for Radar Design and Verification [Z]// Agilent Technologies Application Note, 2011.
- [9] 孙洪, 安黄彬. 一种基于盲源分离的雷达信号分选方法 [J]. 现代雷达, 2006, 23(3): 47-50. (Sun Hong, An Huangbin. A Method to Select Radar Signal Based on Blind Source Separation [J]. Modern Radar, 2006, 23(3): 47-50.)
- [10] Klaus N, Esa O, Hannu O. On the Performance Indices of ICA and Blind Source Separation [C]// 2011 IEEE 12th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. USA: IEEE, 2011: 461-465.
- [11] 齐崇英, 陈志杰, 张永顺, 等. 基于投影预变换的快速 DOA 估计算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(4): 525-528. (Qi Chongying, Chen Zhijie, Zhang Yong-shun, et al. Rapid DOA Estimation Algorithms Based on Projection Pretransformation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(4): 525-528.)
- [12] Kim J, Yang H J, Jung B W, et al. Blind Calibration for a Linear Array with Gain and Phase Error Using Independent Component Analysis [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters (S1536-1225), 2010, 9: 1259-1262.
- [11] 金光虎, 高勋章, 黎湘, 等. 基于Chirplet的逆合成孔径雷达回波高速运动补偿算法 [J]. 宇航学报, 2010, 31(7): 1844-1849.
- [12] 刘锋, 徐会法, 陶然, 等. 分数阶Fourier域多分量LFM信号间的分辨研究 [J]. 中国科学: 信息科学, 2012, 42(2): 136-148.
- [13] 付耀文, 胡杰民, 黎湘. 基于调频傅里叶变换的匀加速转动目标ISAR成像 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(12): 2608-2612.
- [14] 王盛利, 李士国, 倪晋麟. 一种新的变换-匹配傅里叶变换 [J]. 电子学报, 2001, 29(3): 403-405.

(上接第 858 页)

- [8] 战立晓, 汤子跃, 朱振波. 基于分数阶傅里叶变换的加速微弱目标检测与估计 [J]. 电波科学学报, 2013, 28(2): 296-304.
- [9] Yin Zhiping, Fu Zhen, Wang Dongjin, et al. ISAR imaging of fast-moving target based on FRFT range compression [C]// 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. USA: IEEE, 2007: 306-309.
- [10] Chen Jie, Xiao Huaitie, Song Zhiyong, et al. Imaging targets moving in formation using parametric compensation [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing (S1687-6180), 2014, 8(1): 1-9.