

# 雷达-通信一体化系统设计

邹广超<sup>1</sup>, 刘以安<sup>1</sup>, 吴少鹏<sup>2</sup>, 唐霜天<sup>2</sup>

(1. 江南大学信息工程学院, 江苏 无锡 214122;

2. 船舶重工集团公司724所, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 针对日益复杂的电磁环境和目标威胁, 作战平台一体化是军事对抗领域的强烈需求。研究在保持或很少影响雷达系统性能的前提下, 利用软件无线电技术将通信功能加载到现有的雷达系统中, 实现雷达与通信的综合一体化设计。首先将通信信号调制到雷达信号上, 形成一体化信号进行发射; 在接收端使接收信号先通过信号分离器, 采用同态滤波和修正的盲信号分离算法把雷达信号和通信信号进行分离, 然后分别送通信信号处理单元和雷达信号处理单元进行处理, 最后得到雷达信号和通信序列。仿真结果表明, 雷达与通信设备进行综合一体化设计是可行、有效的。

**关键词:** 雷达-通信一体化; 乘性信号分离; 信号分离器; 同态滤波; 盲信号分离

中图分类号: TN955 文献标识码: A

## Design of Radar - Communications Integrated System

ZOU Guang - chao<sup>1</sup>, LIU Yi - an<sup>1</sup>, WU Shao - peng<sup>2</sup>, TANG Shuang - tian<sup>2</sup>

(1. School of Information Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China;

2. Inst. 724 of China Shipbuilding Industry Corporation, Nanjing Jiangsu 210003, China)

**ABSTRACT:** Aiming at the increasingly complex electromagnetic environment and target threat, the integrated battle platform is one of strong demands of Military confrontation field. Under the premise of maintaining or little impact radar system performance, communication is loaded to the existing radar system using software radio technology, and radar and communication integration system is designed. Firstly, communication signal is modulated to radar signals, and integrated signal is formed and transmitted; then integrated signal is received through signal splitter, and the radar signal and communication signal are separated by homomorphism filtering and blind signal separation and then sent to communication signal processing unit and radar signal processing unit. At last, the radar signals and communication signals are processed. The simulated results indicate that the comprehensive integrated design of radar and communications equipment is feasible and efficient.

**KEYWORDS:** Integration of radar - communication; Multiplicative signal separation; Signal splitter; Homomorphism filter; Blind signal separation

## 1 引言

长期以来, 雷达领域和通信领域由于受各自研究对象的不同而被严格地区分, 结果造成目前在电子对抗领域中形成了两个主流方向的划分: 雷达对抗和通信对抗。事实上, 雷达和通信作为信息获取、处理、传输和交换的典型方式, 虽然在硬件设备和软件架构上有明显不同的区别, 但从它们的工作原理、系统结构、工作频段等方面来看, 两者又具有许多相

似之处。

所以, 对雷达和通信实施一体化设计, 不仅条件已具备, 而且硬件资源共享也是可行的。对雷达系统和通信系统进行有机结合和资源共享, 不仅是未来作战平台电子综合一体化系统的主要发展方向, 而且将雷达和通信实现多功能一体化设计, 可极大地提高系统的作战能力, 以及克服传统的情报传递速度慢、保密性差和误报率高等方面的不足。

本系统在原有雷达系统的基础上加入通信调制/解调设备, 在发射端把通信信号调制到雷达信号上, 产生雷达通信混合一体化信号, 并在接收端添加信号分离器分离还原两种信号, 分别对雷达信号和通信信号进行匹配滤波和解调, 使系统实现进行探测和通信的多功能化。

基金项目: 国防预研应用基础研究项目基金课题(A1420061266); 中船重工集团公司724研究所资助项目

收稿日期: 2010-05-31 修回日期: 2010-07-24

## 2 雷达-通信一体化设计方案

### 2.1 雷达-通信一体化系统设计

雷达系统和通信系统在原理上都是电磁波的发射和接收过程;在系统的结构上表现为两者子系统有相当大的重叠<sup>[1]</sup>。例如:天线、发射机、接收机、信号处理器等;在频率范围上,通信系统已经在以前只属于雷达范畴的频率上工作,而远程雷达也在 VHF 中原属于通信范畴的频率段上工作;在信号特征上也不再明显(如低功率连续波信号),目前使用的频率复用技术也使现代雷达和通信信号相似等<sup>[2]</sup>。

从上述分析可以看出,尽管雷达和通信之间存在许多差异,但它们在原理和系统结构上仍具有许多相似性,所以,可在雷达系统基础上,把通信功能加载到雷达系统上,用雷达天线、发射机和接收机完成所有收/发功能,用软件无线电技术,合成和分离雷达与通信信号,以实现雷达通信系统的多功能和一体化。雷达-通信一体化系统设计框图如图 1 所示。

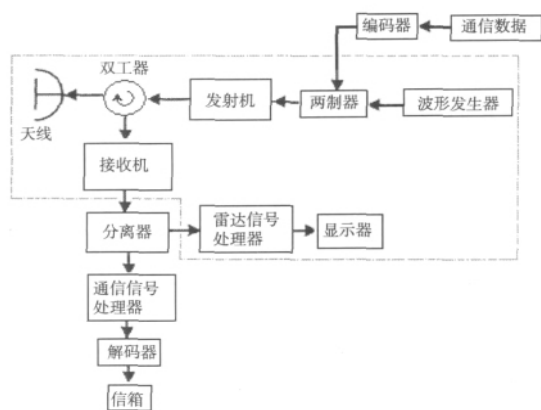


图 1 雷达-通信一体化系统框图

图 1 中,虚线框内的部分为雷达系统的硬件资源,虚线外的部分是为增加通信功能所需要增加的部分。由图 1 可知,雷达系统的发射机可兼作通信发射机,雷达天线同时兼作通信发射和接收天线,雷达接收机具有接收一体化信号的能力。增加的“信号分离器”是将雷达目标回波信号和通信信号分离,然后送往各自的信号处理器进行信号处理。这里,雷达的发射机、天线和接收机与通信硬件共享,发射的信号为雷达-通信一体化信号,其既有探测目标功能又同时具有通信功能。对我方通信接收设备而言,只需要在接收机前端增加软件无线电技术,将通信信号分离出来进行解码和恢复即可获得通信信息;而对于雷达方,可在接收机后通过“信号分离器”将目标回波信号分离出来,送雷达信号处理器和数据处理单元,进行相应处理提取目标有用信息并显示。

### 2.2 雷达-通信一体化信号调制方式

为了将通信信息加载到雷达信号中,随雷达信号向空中

传播,使雷达具有通信功能,需将通信信号调制到雷达信号中,形成一体化信号。

假设雷达发射的信号形式为:

$$c(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta(t)) = c_1(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

其中  $A$  为载波的幅度;  $f_c$  为载波频率;  $\theta(t)$  为相位调制函数;  $c_1(t) = A e^{j\theta(t)}$  为雷达基带信号。则对于通信信号  $x(t)$ , 对应的已调信号为:

$$s(t) = c(t) x(t) = c_1(t) x(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (2)$$

其对应的功率谱为:

$$S_s(f) = \frac{A^2}{4} [S_{xx}(f - f_c) + S_{xx}(f + f_c)] \quad (3)$$

本系统中,雷达信号采用线性调频(LFM)信号,通信信号调制方式采用 BPSK 调制方式。

## 3 雷达-通信一体化系统中的关键问题

本系统的关键问题在于信号分离器的设计。由 2.2 节可知,本文研究的雷达通信一体化系统,其一体化信号的表示是雷达载波信号与通信信号的乘积,所以,信号分离属于乘法性信号分离问题,所以对乘法性信号分离问题的探索和研究,是解决雷达通信一体化研究的关键技术之一。本文采用同态滤波思想,先将一体化信号转换为加法性信号,然后用修正的盲信号分离方法实现雷达信号与通信信号的分离。

### 3.1 同态滤波

根据文献<sup>[6]</sup>所述:虽然对数运算是非线性变换。但是,当研究对数函数  $y = \ln x$  时,可以发现:当参数  $x$  很小的时候,它的斜率变化是非常剧烈的,具有明显的非线性;然而随着参数  $x$  的逐渐增大,它的斜率变化也趋于平缓,当参数  $x$  很大的时候,它的斜率变化非常不明显,可近似看为线性。所以,当一个信号它有很大的直流分量时,它取对数变换可以近似看为线性变换。所以,可以在雷达信号和通信信号混合之前分别加上大直流分量  $C_1$ 、 $C_2$ ,然后再进行乘性混合,其形式为:

$$s = (x + C_1)(c + C_2) \quad (4)$$

于是

$$\begin{aligned} \ln s &= \ln s = \ln [(x + C_1)(c + C_2)] \\ &= \ln(x + C_1) + \ln(c + C_2) \approx k_1 x + k_2 c \end{aligned} \quad (5)$$

### 3.2 修正的盲源分离算法

盲源分离通常处理的模型为  $x = As$ , 通过寻求线性变换  $W$ , 使得估计分量  $y = Wx$  尽可能统计独立。这里  $x$  为已知的  $m$  维观测向量,  $s$  为未知的  $N$  维源向量,且其各分量统计独立;  $A$  为一个未知的  $M \times N$  线性混合矩阵。

盲源分离算法是针对阵列信号的,而对单一信号不适用。而本系统中接收机采用单天线接收,因此,要对盲源信号进行修正,使其符合阵列信号的要求。以雷达信号作为参考信号,使接收信号经同态滤波后的信号和雷达信号组合成为一阵列信号。即:

$$\begin{bmatrix} ls \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 x + k_2 c \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ c \end{bmatrix} \quad (6)$$

这样,就相当于采用了阵列天线,可以直接采用 FastICA<sup>[8]</sup>算法了。

又由于混合信号中已加入了雷达和通信信号的直流分量,其均值已不再为0,雷达参考信号和混合信号组成的阵列信号也不一定是两两相互独立的,这不满足进行盲信号分离的条件,所以,应进行信号的预处理。预处理的方法可参考文献[8]中的方法来实现。

#### 4 系统性能分析

为验证系统模型的正确性,采用 matlab 对系统进行仿真,得到以下结果。

##### 4.1 发射信号性能分析

系统中,雷达信号采用 LFM 信号,通信信号采用 BPSK 调制方式,组成混合信号。

通信码元采用双极性码,“0”,“1”分别用“-1”,“1”表

示,为增强抗噪声能力,通信信号采用了扩频码进行了直接扩频处理,其扩频码为: [1, -1, 1, -1]。

为了消除码间干扰,通信信号采用升余弦脉冲成型滤波器产生,滤波器的冲激响应为:

$$H(f) = \begin{cases} 1, & 0 \leq |f| \leq \frac{1-\alpha}{2T_s} \\ \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{\pi(2T_s|f| - 1 + \alpha)}{2\alpha} \right] \right\}, & \frac{1-\alpha}{2T_s} \leq |f| \leq \frac{1+\alpha}{2T_s} \\ 0, & |f| > \frac{1+\alpha}{2T_s} \end{cases} \quad (7)$$

$\alpha$  为滚降系数,在此系统中  $\alpha$  取 0.5。试验中,线性调频带宽  $B = 1\text{MHz}$ ,通信信号码元速率  $F_c = 1\text{MHz}$ ,滚降系数  $\alpha = 0.5$ ,采样频率  $F_s = 4\text{MHz}$ ,码片长度  $s = 1000$ 。仿真结果如图 2 所示。

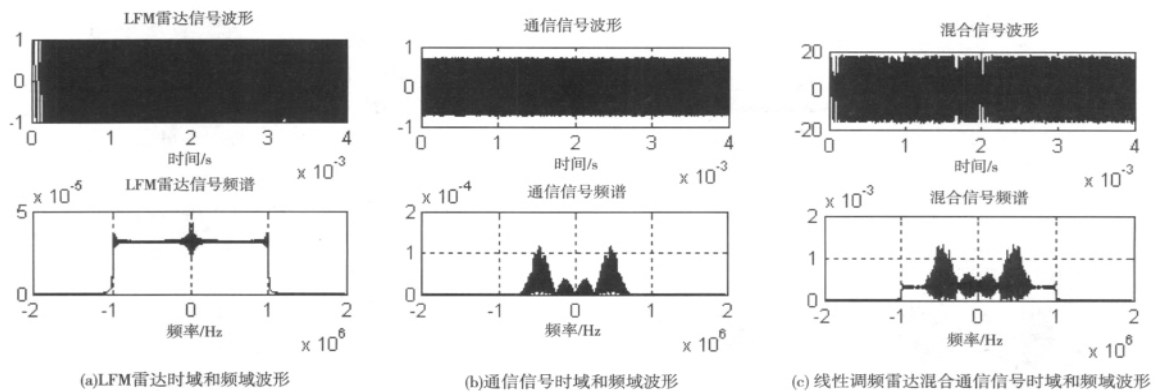


图2 一体化信号波形及频谱

根据其波形及其信号模型,仿真其模糊函数,如图 3 所示。

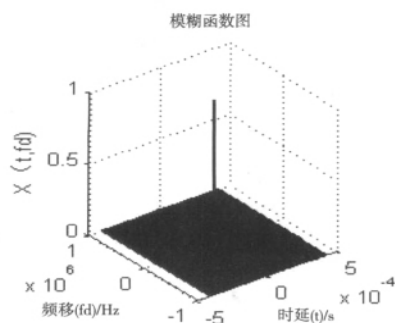


图3 混合信号模糊函数

由此模糊函数的分析可知,通信信号调制到 LFM 雷达信号上后,模糊函数呈图钉状,对雷达的探测性能几乎不影响,说明了雷达与通信可以进行一体化信号设计。

##### 4.2 接收信号性能分析

回波信号经接收机接收后,要先通过“信号分离器”,接收信号经过信号分离器后的波形如图 4、图 5 所示。

由图 4 和图 5 可以看出,雷达信号和通信信号已经基本上被分离出来,接下来可以把雷达信号和通信信号分别送往各自的信号处理单元进行处理,即雷达信号进行匹配滤波,通信信号进行相关处理。得到的图形如图 6、图 7 所示。

##### 4.3 雷达性能与通信性能之间的相互影响分析

雷达与通信进行一体化将会对原来的雷达系统和通信系统产生影响,本系统分析了雷达与通信之间的相互关系。得出以下结论:

- 1) 通信传输速率  $F_c$  同雷达信号带宽  $B$  的关系

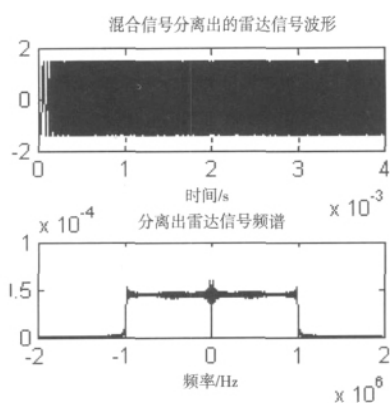


图4 分离出来的 LFM 信号

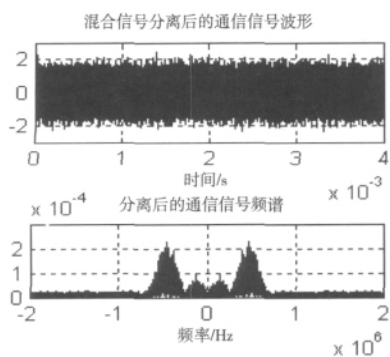


图5 分离后通信信号复包络

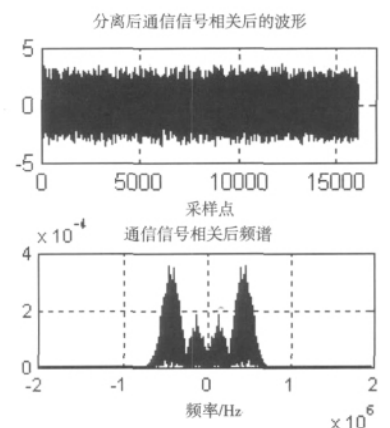


图6 经过相关后的波形

在通信传输速率同雷达信号带宽具有以下关系:

$$0.1B \leq F_c < B \quad (10)$$

时,分离算法比较稳定。“信号分离器”能较好分离出雷达信号和通信信号。

## 2) 多普勒频率对系统性能的影响分析

本系统不能含有多普勒频移,否则效果会很差。但在多普勒频移控制在 50Hz 内的时候,通过增加信噪比还可以使通信信号受影响较小。仿真结果如表 1 所示。这里仿真所用参数和前面章节相同。

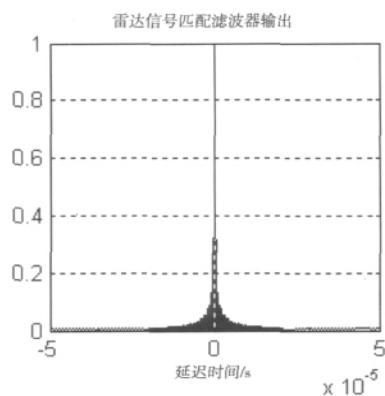


图7 雷达信号匹配滤波器输出

表1 不同多普勒频移下通信信号误码率

多普勒频移( Hz)	误码率
50	1e-3
70	0.113
80	0.25

这是由于采用盲源分离思想进行信号分离时,把发射的雷达信号作为参考信号,所以分离出的雷达信号已经滤掉了运动目标多普勒频移的影响,分离信号送入雷达处理单元后,对运动目标不能分辨。并且在有多普勒频移的情况下,还会影响通信信号的解码质量。

## 3) 噪声对通信误码率的影响

在有噪声情况下接收的信号可表示为:

$$s = cx + n \quad (8)$$

取对数之后

$$\ln s = \ln c + \ln x + \ln \left( 1 + \frac{n}{cx} \right) \quad (9)$$

根据式(9)可知,混合信号经“信号分离器”之后,可把  $\ln x$  分离出来,剩余  $\ln c$  和噪声。噪声完全被分在通信信号中,雷达信号不受噪声影响。

对信噪比对通信误码率的影响做统计仿真,结果如表 2 所示。

表2 信噪比对相似系数的影响

信噪比( dB)	通信误码率
8	4e-3
9	1e-3
10	5e-4
12	2e-5
14	1e-6
15	2e-7

由表 2 结果可知,

(下转第 32 页)

该方法的有效性与可靠性。

表4 雷达辐射源识别正确率

信噪比	正确识别率	错误识别率
15dB	95%	5%
10dB	87.5%	12.5%

雷达辐射源信号在经过发射、传输、接收等过程中会受到各种因素的影响,各特征参数会呈现统计特性,所以对于不同信噪比下的雷达辐射源识别正确率进行测试是有必要的。如表4所示,该识别方法在高信噪比下识别正确率较高。随着信噪比的下降,正确识别率下降较快,因为测粗糙集对于噪声的影响非常敏感,经离散化处理后,噪声的影响较明显,影响分类结果和识别正确率。

## 5 结论

本文提出了一种基于粗糙集的决策树雷达辐射源识别算法。当前端检测到雷达辐射源信号,并以脉冲描述字表征雷达信号后,本算法根据粗糙集理论对脉冲描述字进行处理,根据各属性的属性重要度进行特征选择,删除冗余属性,简化了决策树结构;并根据属性重要度确定各属性信息量的相对大小,改进了ID3算法,减小了识别算法的计算量,使得决策树算法的产生规则更容易理解,并且决策树模型的建立

(上接第4页)

在信噪比达到14dB以上时,通信序列误码率可达到 $10^{-6}$ ,可满足通信要求。

## 5 结束语

借助雷达系统现有的硬件资源,利用软件无线电设计技术把通信功能加载到雷达系统中,可实现雷达-通信的一体化设计。实现雷达-通信一体化之后可提高资源利用率,增强抗干扰能力,有利地提高了作战平台的综合作战能力。但雷达-通信综合一体化工程在国内才刚刚起步,还有非常多的关键技术需要解决。如:通信加密、软件结构、网络结构等需要做大量的研究工作。

### 参考文献:

- [1] 李廷军,等. 雷达-通信一体化研究[J]. 现代雷达, 2001, 23(2): 1-2.
- [2] 李朝伟,周希元,刘福来. 雷达/通信信号侦察一体化技术[J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(2): 5-11.
- [3] 周希元,陈卫东,毕见鑫译. 通信系统仿真——建模、方法和技术(第二版)[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [4] 陈树新,邓妍,姚如贵. 现代通信系统建模与仿真[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2007.
- [5] C C Xu, T Q Chen. Conception of "signal sharing" in integrated radar and jammer system and the integrated signal design [C]. Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions

过程也很直观,进而克服了传统方法需要先验知识的不足以及主观性影响大的缺点。仿真结果表明,本算法不需要大量冗余的特征分类信息,决策树结构简单,识别率性能理想,是合理可行的雷达辐射源识别算法。

### 参考文献:

- [1] 张超政,关欣,何友. 粗糙集在雷达辐射源识别中的应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 44(4): 412-416.
- [2] 史忠植. 高级人工智能[M]. 北京:科学出版社, 1998: 24-27.
- [3] B Walczak, D L Massart. Rough sets theory[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1999, 47(1): 1-16.
- [4] 周平,等. 基于相似粗糙集的案例特征权值确定新方法[J]. 信息与控制, 2006, 35(3): 329-334.
- [5] 陈世福,陈兆乾. 人工智能与知识工程[M]. 南京:南京大学出版社, 1997: 21-44.

### [作者简介]



胡可(1990-),男(满族),北京人,本科生,兴趣领域为电子信息与计算机应用。  
王宏远(1948-),男(汉族),河南郑州人,教授,博导,主要研究领域为数字信号处理。

IEEE 2002 International Conference, 2002, 502-505.

- [6] 图布信. 偏时域相干算法在同态滤波中的应用[D]. 内蒙古工业大学, 2005.
- [7] 焦卫东,杨世锡,钱苏翔,严拱标. 乘性噪声消除的同态变换盲源分离算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(4): 581-584.
- [8] 史习智,等. 盲信号处理——理论与实践[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2008.
- [9] 牛奕龙,王毅. 基于广义高斯分布模型的盲源分离算法[J]. 计算机仿真, 2006, 23(10): 84-88, 123.

### [作者简介]



邹广超(1985-),男(汉族),河南叶县人,硕士研究生,主要研究方向为雷达对抗、模式识别与智能系统。

刘以安(1963-),男(汉族),江苏人,博士,教授,硕士生导师,主要研究领域为数据融合、雷达对抗、

模式识别与智能系统。

吴少鹏(1960-),男(汉族),江苏南京人,研究员,主要研究领域为雷达总体及信号处理。

唐霜天(1968-),男(汉族),江苏南京人,研究员,主要研究领域为雷达总体仿真与总体设计。