直扩系统复合干扰抑制不确定性解决方案*

孙志国，李立金，郭黎利
（哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院，哈尔滨 150001）

摘　要： 为了解决 FICA 用于抑制直扩系统复合干扰时出现的输出排列无序性、符号不确定性问题，引入带宽识别和帧头识别技术，提出基于 FICA 的直扩系统复合干扰抑制改进方案。该方案利用 FICA 的信号分选能力和带宽识别技术实现干扰的抑制，采用帧头识别技术确保解调输出数据符号的准确性。理论分析和实验结果表明，在 $E_b/N_o=4$ dB 时，该方案的复合干扰分离精度大于 99%，带宽识别和帧头识别方法对直扩信号的识别率大于 99.4%，能够准确分离干扰和信号并剔除干扰。

关键词： 直扩系统；复合干扰抑制；快速独立成分分析（FICA）；排列无序性；符号不确定性
中图分类号： TP393.04　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1001-3695(2012)07-2603-04
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.055

Solution of uncertainties in mixed interference suppression for DSSS

SUN Zhi-guo, LI Li-jin, GUO Li-li
(*College of Information & Communication Engineering*, *Harbin Engineering University*, *Harbin* 150001, *China*)

Abstract: This paper proposed two algorithms: bandwidth and frame recognition, for solving the disorder arrangement and uncertain symbols caused by suppressing the multiple interferences using FICA in direct sequence spread spectrum (DSSS) systems. The bandwidth recognition realized interference suppression by using the signal sorting ability of FICA, and to ensure the accuracy of the demodulated data . The theoretical analysis and simulation results verify the effectiveness of the algorithms. When $E_b/N_o=4$dB, the rate of signal separation is above 99% and the rate of signal recognition is above 99.4%.

Key words: DSSS; mixed interference suppression; FICA (fast independent component analysis); disorder arrangement; uncertain symbols

0　引言

直扩系统的干扰抑制大致可分为窄带干扰抑制和宽带干扰抑制[1]两类。窄带干扰抑制技术主要有时域预测技术、变换域技术、码辅助技术等。宽带干扰抑制技术主要有宽带噪声干扰抑制技术、宽带线性调频干扰抑制技术、脉冲干扰抑制技术等。由于电磁环境的复杂性，直扩系统将受到复合干扰的影响，即信道中存在通信中常见单一类型干扰（宽带噪声、宽带线性调频、单音或多音干扰、AR 随机过程、数字窄带干扰等）的任意线性组合。目前，直扩系统的干扰抑制技术都针对于某种特定类型或属性的干扰，不适于抑制复合干扰。

Belouchrani 等人[2,3]将盲源分离（blind source separation, BSS）用于直扩系统的干扰抑制，利用基于二阶统计量的 BSS 分离传感器接收的混合信号，进而达到干扰抑制的目的。Ristaniemi 等人[4,5]将独立成分分析（independent component analysis, ICA）技术用于直扩系统的干扰抑制。针对干扰较小或者不存在时利用 ICA 处理技术对有用信号损伤的问题，Ristaniemi 等人[6]提出了预开关和后开关结构，接收机通过 RAKE 和 RAKE-ICA 接收机间进行切换，以降低 ICA 引起有用信道的失真。由于快速独立成分分析（fast ICA, FICA）算法收敛速度快，计算精度高，作为 ICA 的一种快速实现形式被广为应用。金凤等人[7]提出将其应用于 STBC-DS-CDMA 系统以解决扩频系统多用户盲检测问题。吴昊等人[8]将其用于卫星频谱检测以解决复合干扰自动识别问题。

本文以基于 FICA 的直扩系统复合干扰抑制方法为研究对象，引入带宽识别和帧头识别的方法，以解决 FICA 抑制复合干扰时出现的排列无序性和符号不确定性的问题。

1　快速独立成分分析

独立成分分析是近年来刚刚发展起来的一种数据和信号分析的方法。该方法含义为：多路观测信号按统计独立的原则通过优化算法分解成若干个独立成分，而这些独立成分恰好是源信号的近似。FICA 算法是基于极大化非高斯性的不动点算法，是一种 ICA 技术的快速而有效的实现算法[9]。

假定观测信号（混合信号）为源信号（原始信号）的线性组合，FICA 算法的数学模型可以表示为

$$x = As \tag{1}$$

其中：源信号 $s=(s_1,s_2,\cdots,s_n)^{\mathrm{T}}$ 和混合矩阵 $A=(a_{ij})_{m\times n}(m\geqslant n)$ 都为未知矩阵，不能被直接观测，必须找到某种目标函数和优化算法利用观测信号 $x=(x_1,x_2,\cdots,x_i\cdots,x_m)^{\mathrm{T}}$ 的统计独立性，求出 s 和 A 的近似值 y 和 W，即

收稿日期： 2011-10-13；**修回日期：** 2011-11-24　　**基金项目：** 国家自然科学基金资助项目（61101141）；国防“863”创新基金资助项目（2010AAJ303）；黑龙江省自然科学基金资助项目（F201040）

作者简介： 孙志国（1977-），副教授，博士，主要研究方向为高效安全舰船通信理论与技术（sunzhiguo@hrbeu.edu.cn）；李立金（1985-），硕士研究生，主要研究方向为扩频通信干扰识别与抑制技术；郭黎利（1955-），教授，博士，主要研究方向为现代通信系统理论与技术、通信信号处理技术.

$$y = Wx \tag{2}$$

当分离矩阵 $w = A^{-1}$, $y = Wx = WAs$, $y = A^{-1}As = s$,输出数据 y 即为源信号 s 的准确估计。衡量解混算法性能的一个性能指标为相似系数:

$$\zeta_{ij} = \zeta(y_j, s_j) = \frac{\left|\sum_{i=1}^{m} y_i(t) s_j(t)\right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} y_i^2(t) \sum_{j=1}^{m} s_j^2(t)}} \tag{3}$$

当 $y_i = cs_j$(为常数)时,$\zeta_{ij} = 1$(允许分离结果在幅度上存在差异);当 y_i 与 s_j 相互独立时,$\zeta_{ij} = 0$。即若由相似系数为元素构成的相似系数矩阵每行每列都有且仅有一个元素接近于1,其他元素都接近于0,即可认为该算法分离效果理想。

FICA 算法只需信号与干扰之间是相互独立的,或近似看做是相互独立的,且信号和干扰服从高斯分布的不多于一个,这种情况在实际中很容易满足,因此可以通过 FICA 算法将干扰与信号分离开来,同时也将各种干扰成分分离出来,以便之后对其进行分析、综合,确定压制或摧毁干扰机的手段。

2　基于 FICA 的直扩系统复合干扰抑制的改进方案

2.1　系统模型

图 1 为添加复合干扰抑制模块的扩频通信系统模型,虚框部分为添加的复合干扰抑制过程。该模型的工作流程为:首先在待发送数据前加入帧头,经常规的扩频、调制后进入信道。当信号中存在复合干扰时,接收到的数据将包括多种干扰、噪声及扩频信号,利用 FICA 算法对接收的混合信号进行分离,经处理后由于无法确定哪一路信号为扩频信号,因此首先对所有数据进行解扩,根据解扩后各路数据频谱宽窄的差异判断扩频信号所处的路数,从而提取出有用信息,经解调后获得相应数据流。但此时该数据流与原始数据比较符号可能是相同的也可能是相反的,因此可以利用本地帧头与接收到的帧头做相关运算,根据相关性大小判断是否对数据流的符号进行翻转。经以上处理后,准确的有用信息即可被提取出来,同时将其他各路干扰剔除,就可以达到抗复合干扰的目的。

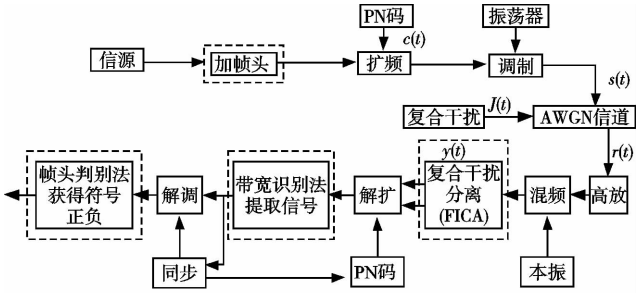


图1　扩频通信系统干扰抑制模型

信道中同时存在窄带干扰、宽带线性调频干扰及噪声的接收信号,数学模型为

$$R(t) = As(t) \tag{4}$$

式中:$s(t) = [s(t) + n(t), J_1(t), J_2(t), J_3(t), J_4(t)]^{\mathrm{T}}$;$A$ 为系数矩阵;$J_i(t)$ 为不同类型的干扰;$n(t)$ 为高斯白噪声。$s(t)$ 为直扩信号,可表示为

$$s(t) = \sqrt{P} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \alpha b(n) p(t - nT_b) \cos(2\pi f_0 t) \tag{5}$$

式中:P 表示用户能量,α 为信道增益,$b(n)$ 为信号数据流,T_b 为码元周期,$p(t) = \frac{1}{N^{1/2}} \sum_{i=0}^{N-1} c_i \varphi(t - iT_e)$ 为用户使用的特征波形。

经 FICA 算法迭代计算获得解混矩阵 W,可得输出数据为

$$Y(t) = WAS(t) \tag{6}$$

最后输出数据为源信号及各类干扰的近似形式,即

$$Y(t) = [y_1(t), y_2(t), y_3(t), y_4(t), y_5(t)]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

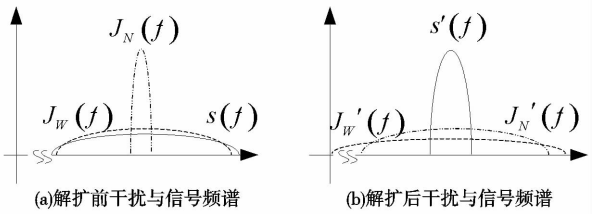
此时,$Y(t)$ 与信号 $s(t)$ 及干扰 $J(t)$ 的对应关系无法确定。

针对 FICA 分离后的数据具有排列无序性和符号不确定性的特点[9],无法确定哪一路数据为扩频信号,也无法确定符号正负性,而这两种不确定性将严重影响扩频系统的性能。因此本文提出使用带宽识别法和帧头识别法解决这两个问题。

2.2　基于带宽识别的排列无序性解决方法

为了解决 FICA 算法分离后扩频信号及各种干扰信号输出无序性问题,本文提出一种带宽识别方法,作为扩频信号的检测方法。

由于扩频系统接收到的混合信号中扩频信号为宽带的,而干扰包括宽带和窄带,如图 2(a)所示,通过接收端的解扩过程可以将信道中的窄带干扰带宽展宽,宽带干扰带宽展开得更宽,如图 2(b)所示。



(a)解扩前干扰与信号频谱　　(b)解扩后干扰与信号频谱

图2　扩频系统频谱

带宽识别方法的基本思想是:无论敌方干扰为宽带还是窄带,经过解扩过程后带宽总会是宽带的,而扩频信号利用收发端伪码序列的相关性经解扩后为窄带信号,因此可以利用归一化频谱的 3 dB 带宽加以区分,具有有限带宽的那一路信号即为扩频信号。归一化频谱 3 dB 带宽定义为

$$Y(f) = |\mathrm{FFT}(\mathrm{y}(\mathrm{t}))| \tag{8}$$

$$Y_u(f) = \frac{Y(f)}{\max(Y(f))} \tag{9}$$

$$B_{3\mathrm{dB}} = \frac{m_R - m_L + 1}{N} \tag{10}$$

其中:$y(t)$ 为源信号的近似估计,$m_R = \max_{Y_u(f) > T_{th}}(f)$, $m_L = \min_{Y_u(f) > T_{th}}(f)$, N 为数据长度,T_{th} 取 0.707。

通过带宽识别法可以提取出扩频信号,但并不能直接对其进行解调等处理,这是因为获得的解扩信号符号可能是正的,也可能是负的,如果出现负的情况,解调后输出的数据将全部出错。

2.3　基于帧头识别的符号不确定性解决方案

为了解决提取出的扩频信号符号不确定性问题,本文提出利用帧头识别法确定扩频信号的符号。

在数据发送前加入 16 bit 的帧头,即 $B = [b_1\ b_2 \cdots\ b_{16}]$。接收机必须知道帧头的形式,并且在数据流中搜索帧头,可以用匹配相关器完成搜索。性能好的帧头需要相关旁瓣的绝对值很小。

相关旁瓣是指码字与自身时移后的码字的相关值。这样具有 k 个码元移位的 N bit 码字的相关旁瓣为

$$C_k = \sum_{j=1}^{N-k} b_j b_{j-k} \tag{11}$$

例如最为常用的帧头形式为 EB90,其相关旁瓣为主瓣的 1/4,即

$$\mathrm{EB90} = [1110 \quad 1011 \quad 1001 \quad 0000] \tag{12}$$

接收端检测帧头位置,并与本地帧头做相关运算,本地帧头形式为 EB90 和 146F,即

$$\begin{aligned}\mathrm{EB90} &= [1110 \quad 1011 \quad 1001 \quad 0000]\\ \mathrm{146F} &= [0001 \quad 0100 \quad 0110 \quad 1111]\end{aligned} \tag{13}$$

通常需要设置容错位数,由于本文假设该系统完全同步,因此将容错位数设置为零(也可以设置为较小的门限),即当搜索到的帧头与本地帧头 EB90 全部相同时,符号为正;当搜索到的帧头与本地帧头 146F 全部相同时,符号为负。最后输出的数据即为扩频信号的准确估计。

3　算法仿真与性能分析

实验建模的直扩系统数据率 $R_b = 1$ kbps,伪码速率 $R_c = 10$ kcps,采样速率为 $f_s = 40$ kHz,采用 BPSK 调制,载波频率 $f_c = 10$ kHz。

假设信道中存在的干扰类型为窄带干扰(多音干扰、AR 随机过程干扰、数字窄带干扰),宽带干扰(线性调频干扰),源信号包括扩频信号(含噪声)等几种干扰,如图 3 所示。

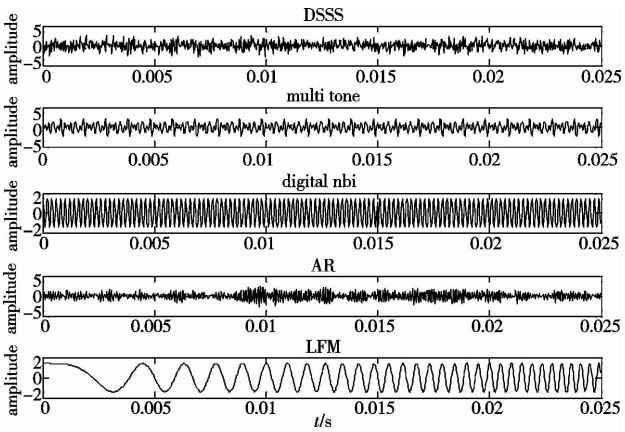


图3　源信号

由于扩频信号具有类噪声形式,因此若在 FICA 处理前将混合信号中的噪声去除,将会影响到扩频信号的精度,所以在建模中将扩频信号和噪声看做一个源信号,噪声将通过解扩、滤波处理去除。假设混合矩阵 A 为随机方阵,则接收端的多路观测信号是源信号的随机线性组合,如图 4 所示;混合信号频谱如图 5 所示。

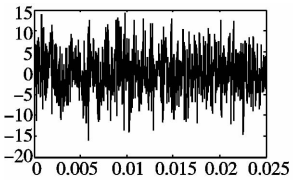


图4 瞬时混合信号时域形式

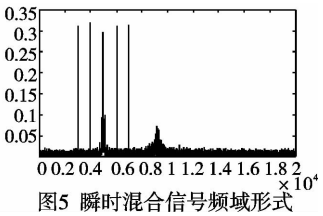


图5 瞬时混合信号频域形式

对混合信号进行去均值和白化,经过目标函数的优化运算,获得分离矩阵 W,由分离矩阵获得源信号的近似 y,如图 6 所示。

3.1　FICA 算法的分离精度和收敛速度分析

对比图 3 和 6 可以看出,尽管各路分离后信号的顺序不同,有的信号符号恰好相反,但从时域的波形来看,除了由于噪声造成的信号波形不平滑之外,分离后的波形形式与源信号类似,可以定性地看出 FICA 算法的分离精度是很高的。另外,从定量角度分析,当 $E_b/N_o = 4$ dB 时,通过仿真计算相似系数,可以得出

$$\zeta = \begin{bmatrix} 0.0019 & 0.0114 & 0.0018 & 0.0009 & 0.9999\\ 0.0068 & 0.0091 & 0.9999 & 0.0013 & 0.0003\\ 0.9997 & 0.0152 & 0.0001 & 0.0072 & 0.0031\\ 0.0153 & 0.9992 & 0.0001 & 0.0340 & 0.0006\\ 0.0345 & 0.0061 & 0.0020 & 0.9993 & 0.0007 \end{bmatrix}$$

观察相似系数的大小可以看出,FICA 算法对多音干扰、AR 随机过程干扰、数字窄带干扰、LFM 干扰及扩频信号分离精度均可以达到 99% 以上,这些数据表明 FICA 算法对以上各种干扰和扩频信号的分离是可靠的,能够保证足够的分离精度。

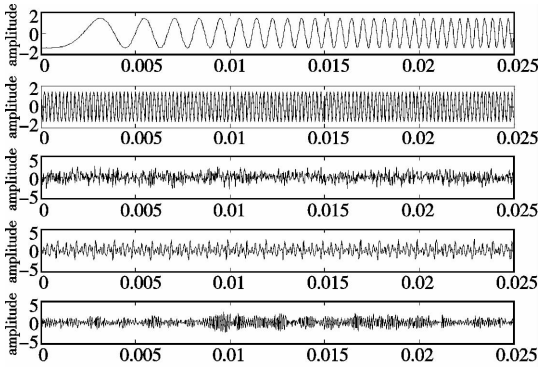


图6　FICA算法分离后信号

另外当 $E_b/N_o = 4$ dB,SJR = −30 dB 时,各个分离矩阵的迭代次数分别为 6、6、7、4、2 次,收敛速度很快,说明 FICA 算法对于各种干扰及扩频信号的分离是有效的。

3.2　带宽识别法准确度分析

图 7 给出了经过预先解扩处理后的各路输出信号频谱图,可以看出,除了第 e 路信号频谱为窄带外,其他各路信号频谱均为宽带,根据解扩原理可知,第 e 路信号为 DSSS 信号,其他各路均为干扰,利用带宽识别法即可确定 DSSS 信号的路数。经过 500 次仿真实验计算得出,带宽识别法在 $E_b/N_o = 4$ dB,SJR = −30 dB 时,识别率为 99.4%,具有很高的准确度,可以看出该方法具有很好的识别能力。但是这种方法对于信道中的相关干扰是失效的,如果载波频率和 PN 码均与信号一致,则解扩后带宽也为窄带,将使有用信号与干扰发生混淆。

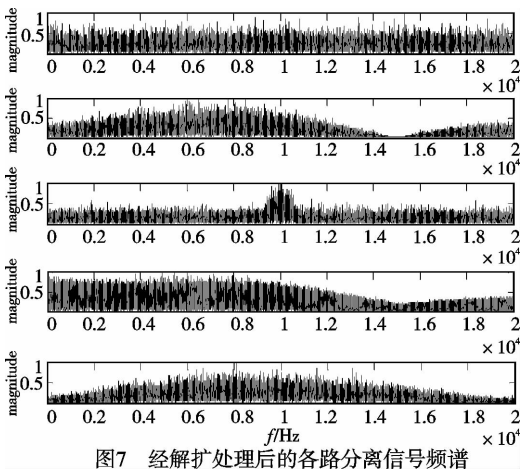


图7　经解扩处理后的各路分离信号频谱

3.3　复合干扰抑制性能分析

实验中以不含干扰抑制模块的直扩系统为参照,考察加入

干扰抑制模块后系统性能的改善情况。经 500 次的重复仿真实验,得到 $E_b/N_o=4$ dB 时,P_b 与 SJR 的对应关系如图 8 所示;P_b 与 E_b/N_o 关系如图 9 所示。

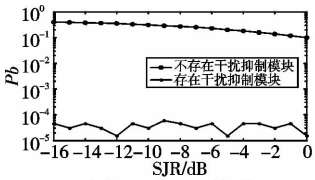


图8 P_b与SJR关系

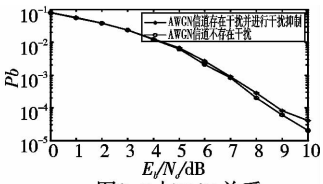


图9 P_b与E_b/N_o关系

由图 8 可以看出,未应用干扰抑制模块时,复合干扰对直扩系统影响非常大,得到的误比特率很高,扩频接收机将无法工作。但应用干扰抑制模块后,性能有很大的改善,并且 SJR 对复合干扰及扩频信号的分离影响不大。由图 9 可以看出,应用干扰抑制模块后,误比特率曲线与信道中仅存在 AWGN 的信道的系统性能接近。由此可以得出,该方法对复合干扰的抑制非常有效,几乎可以将复杂的干扰成分的影响完全去除掉。同时得出该方法对 AWGN 的抑制能力并不强,主要依靠扩频系统本身的处理增益来去除,受 AWGN 影响较大。本节的仿真及分析证明,采用先分离混合信号再对扩频信号进行检测的方法大大提高了直扩系统抑制复合干扰的能力。

4 结束语

为了解决 FICA 抑制直扩系统中复合干扰时出现的排列无序性和符号不确定性的问题,提出利用带宽识别法和帧头识别法对直扩信号进行识别,并确定直扩信号符号,从而获得准确的解调输出数据。通过理论分析和算法仿真得出,在 $E_b/N_o=4$ dB 时,该方案的复合干扰分离精度大于 99%,带宽识别和帧头识别方法对直扩信号的识别率大于 99.4%,能够准确分离干扰和信号并剔除干扰。通过实验证明了该算法的有效性。

参考文献:

[1] 殷复莲,卢满宏,郭黎利. 测控通信干扰抑制技术综述[J]. 宇航学报,2009,30(5):1757-1758.

[2] BELOUCHRANI A, AMIN M. Jammer mitigation in spread spectrum communications using blind source separation [J]. Signal Processing, 2000, 80: 723-729.

[3] BELOUCHRANI A, AMIN M. A two-sensor array blind beamformer for direct sequence spread spectrum communications [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1999, 47(8): 2191-2199.

[4] RISTANIEMI T, JOUTSENSALO J. Advanced ICA-based receivers for DS-CDMA systems [C]//Proc of IEEE Interational Conference on Personal, Mobile, and Radio Communications. 2000: 276-281.

[5] RISTANIEMI T, JOUTSENSALO J. Advanced ICA-based receivers for block fading DS-CDMA channels [J]. Signal Processing, 2002, 82(3): 417-431.

[6] RISTANIEMI T, RAJU K, KARHUNEN J, *et al*. Jammer cancellation in DS-CDMA arrays: pre and post switching of ICA and RAKE[C]// Proc of the 12th IEEE Workshop on Neural Networks for Signal Processing. 2002: 495-504.

[7] 金凤,马宝红,王吉富, 等. 基于复 FastICA 算法的 STBC-DS-CDMA 系统盲检测法 [J]. 现代电子技术, 2009,32(22):126-129.

[8] 吴昊,张杭,路威. 一种面向卫星频谱监测的复合式干扰自动识别算法 [J]. 系统仿真学报, 2008,20(17):4681-4684.

[9] HYVÄRINEN A. 独立成分分析[M]. 周宗潭,译. 北京:电子工业出版社,2007:108-165.