

Fast Frequency Hopping Receiver for Resisting Multitone Jam based on Independent Component

MA Ming¹, HUANG Guo-qing¹, LUO Ming-chao¹, ZHAO Li-jie²

1. Department of Aeronautic Electronic Engineering, The First Aeronautic Institute of the Air Force, Xinyang, China

2. PLA Troop 93846, China

brightma@126.com

Abstract: Fast frequency hopping systems are widely used in military communications because of the good security. But this system is usually jammed by hostile jammers such as multitone. To resist the multitone jamming for fast frequency hopping systems, a novel receiver architecture based on independent component analysis(ICA) is proposed. In this receiver, signals and jammers are separated using ICA firstly, then the hopping signals are demodulated by traditional receiver to get the transmitted information. Computer simulations show that the proposed receiver can gain lower bit error ratio than traditional receiver under same intensity jamming.

Keywords: blind source separation; fast frequency hopping; multi-tone jam

基于独立分量分析的抗多音干扰快跳频接收机

马明¹, 黄国庆¹, 罗明超¹, 赵利杰²

1. 空军第一航空学院, 河南 信阳, 中国, 430010

2. 中国人民解放军 93846 部队, 中国

brightma@126.com

【摘要】快跳频系统由于其良好的保密性能, 广泛应用于军事通信中。在电子战中该系统经常受到敌方干扰机的干扰, 而多音是经常采用的一种干扰方式。为了抑制多音干扰对快跳频系统的干扰, 提出了一种采用独立分量分析的接收机结构, 该接收机首先从射频将信号与干扰分离开, 然后采用传统的接收机对分离得到的跳频信号进行解跳, 从而得到发射的信号。计算机仿真表明, 在相同的干扰强度下, 与传统的接收机相比, 提出的接收机结构具有更低的误码率, 具有一定的抗干扰能力。

【关键词】盲源分离; 快跳频; 多音干扰

1 引言

盲源分离可以在对信源知之甚少的情况下, 分离出想要的信号^[1]。它已经成功地应用在生物医学信号处理(如心电图、肌电图、脑电图以及脑磁图等)、语音增强、图像增强、数字通信中同频干扰抑制、机械故障检测、雷达信号处理等方面^[2]。

在军事通信对抗中, 摆脱敌方同频干扰的影响, 保证我方通信的正常进行是重要的研究课题。已有文献研究了利用盲源分离将频域重合的信号分离这一问题。如文献[3]采用 3 天线阵列接收, 利用盲源分离实现了 3 路同频 PAM 信号的分离, 文献[4]采用相干解调的方式实现了多路 BPSK 信号的分离。

跳频通信系统(FH-SS)是一个用户的载波频率按某种跳频图案(伪随机调频序列)在很宽的频带范围内跳变的通信系统。信号频率的快速跳变使得非合作接收机难以捕获跳频通信发信机所发射的信号, 因此跳频通信是目前主要的军用通信技术。并且由于跳频

技术使用很宽的带宽传输窄带信号, 降低了敌方干扰的效率, 给敌方实施干扰带来困难。

2 跳频

信息信号经过波形调制(信息调制)后, 送入载波调制。载波由跳变序列(伪随机序列)控制跳变频率合成器来产生, 其频率随跳变序列的值的改变而改变, 因此, 载波首先被跳变序列调制, 称作调频调制。跳变频率合成器受跳变序列控制, 当跳变序列值改变一次时, 则载波频率跳变一次。跳变序列习惯上被称作跳频指令, 跳变频率合成器被称作跳频合成器。信息信号经过载波调制后形成跳频信号, 经过信道传输被接收机接收。接收机首先从发送来的调频信号中提取跳频同步信号, 使接收机频率本地伪随机序列控制的频率跳变与接收到的跳频信号的频率跳变同步。产生与发射机频率完全同步一致的本地载波。这个过程称为解跳。再用本地载波与接收信号作解调(载波解

调), 可获得携带有信息得信号, 从而得到发射机发送来的信息, 实现跳频通信^{[5][6]}。

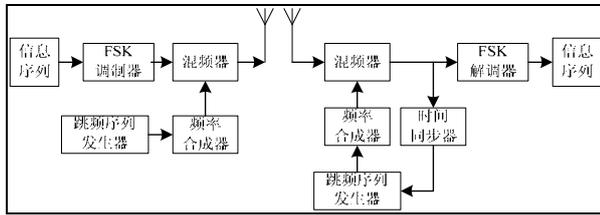


图 1 常规跳频接收机

Figure 1 Classical frequency hopping receiver

跳频系统根据每跳发送的比特数可以分为快跳频和慢跳频。慢跳频每几个数据比特跳一个频点, 快跳频系统每个数据比特都有一个或几个跳频驻留。当跳频速度足够快时, 在干扰信号达到接收机前, 信号已经移动到下一个频点, 从而实现抗跟踪干扰。

多音干扰能够有效地对抗快跳频信号, 干扰音调在多个频率上, 即使不知道跳频序列, 但已知跳频音调在频谱中的可能位置, 就可以加入干扰音调, 干扰跳频接收机的正常工作。

3 独立分量分析的数学模型及 FastICA 算法

3.1 数学模型

在独立分量分析中, 假设源信号是独立的, 通过寻找一个合适的目标函数, 如互信息、通过将这个目标函数最大化, 实现对信号的分离^{[1][7]}。

假设有n个信源, 通过线性混合后, 由n个探测器(传感器)接收, 整个系统用矩阵表示如下:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式(1)中, \mathbf{S} 为未知的n个源信号, \mathbf{A} 为 $m \times n$ 的混合矩阵, \mathbf{n} 为噪声, \mathbf{X} 为传感器接收到的信号。一般情况下, 假设源信号与观测信号维数相同, 在噪声不存在或者可以忽略不计的情况下, 这时盲源分离的模型如下:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} \quad (2)$$

独立分量分析的目标是使变换后的各信号之间尽量保持独立, 寻找矩阵 \mathbf{A} 的逆矩阵的估计值 $\hat{\mathbf{A}}^{-1}$, 得到对信源 \mathbf{S} 的估计:

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{Y} = \hat{\mathbf{A}}^{-1}\mathbf{X} = \hat{\mathbf{A}}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{S} \quad (3)$$

如果 $\hat{\mathbf{A}}^{-1}\mathbf{A} = \mathbf{I}$, 则 $\mathbf{Y} = \mathbf{S}$, 则实现了对源信号的估计。

进而可以求得源信号:

$$\mathbf{S} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{X} = \mathbf{U}^T\mathbf{V}\mathbf{X} \quad (4)$$

3.2 FastICA 算法

上世纪 90 年代末, Hyvarinen 等人提出基于峭度和负熵的的固定点算法^[7]。这一算法具有很快的收敛速度, 因此称为 FastICA。FastICA 算法属于批处理算法, 但它具有相当快的收敛速度, 是盲源分离算法中比较成功的算法。

FastICA 算法将非高斯极大化算法和定点迭代结合起来, 具有三阶收敛速度。衡量非高斯的目标函数有两种: 峭度和负熵。因此, FastICA 有两种形式: 基于峭度最大化和负熵最大化的 FastICA 算法。下面分别推导基于两种代价函数的 FastICA 算法。

考虑如下关于标准峭度的梯度函数:

$$-\beta \frac{\partial \text{kurt}(\mathbf{W}^T \mathbf{z})}{\partial \mathbf{W}} = -\text{sign}(\text{kurt}(\mathbf{W}^T \mathbf{z})) [E\{\mathbf{z}(\mathbf{W}^T \mathbf{z})^3\} - 3\mathbf{W}\|\mathbf{W}\|^2] \quad (5)$$

β 是输出信号峭度的符号。当对混合信号白化后, 信号的能量归一化, 所以 $\|\mathbf{W}\|^2 = 1$ 。这样, 每次迭代后可以将分离向量 \mathbf{W} 归一化。这样, 当盲源分离算法到达平衡点时:

$$\mathbf{W} = E\{\mathbf{z}(\mathbf{W}^T \mathbf{z})^3\} \quad (6)$$

由此得到两步迭代快速算法:

$$\begin{cases} \mathbf{W}(k+1) = E\{\mathbf{z}(\mathbf{W}^T(k)\mathbf{z})^3\} \\ \mathbf{W}(k+1) = \frac{\mathbf{W}(k+1)}{\|\mathbf{W}(k+1)\|^2} \end{cases} \quad (7)$$

总之, 基于峭度的 FastICA 总结如下:

- a. 对观测数据 \mathbf{x} 中心化;
- b. 白化中心化后的观测数据, 得到信号 \mathbf{z} ;
- c. 选择一个正交阵作为初始迭代点;
- d. 计算 $\mathbf{W}(k+1) = E\{\mathbf{z}(\mathbf{W}^T(k)\mathbf{z})^3\}$;
- e. 将分离向量归一化, 即

$$\mathbf{W}(k+1) = \frac{\mathbf{W}(k+1)}{\|\mathbf{W}(k+1)\|^2};$$

- f. 如果迭代前的分离向量与迭代后的分离向量指向同一方向, 即 $|\mathbf{W}^T(k+1)\mathbf{W}(k)| = 1$ 时, 终止迭代;
- g. 提取出一个源信号: $y(k) = \mathbf{W}(k)\mathbf{z}$ 。

采用负熵的 FastICA 具有更稳定的性能, 限于篇

幅在此不做讨论。FastICA 现在是国际上应用较多的一个算法，芬兰赫尔辛基理工大学的网站上 (<http://www.cis.hut.fi/projects/ica>) 可以下载包括 FastICA 在内的盲源分离工具包以及一些实际采集的数据。

4 提出的跳频通信接收机结构

考虑到多音干扰与跳频信号具有相同的频率成分，二者在频谱上是不能严格分开的。但由于多音干扰与跳频信号是由不同的发射机所发射的，二者的统计特性不同，概率分布也不同，一般情况下，二者之间是独立的。图 2 给出了某跳频电台信号与多音干扰的频谱图及概率分布图。

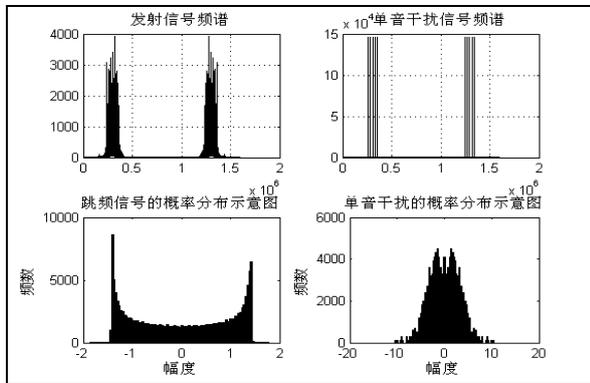


图 2 某跳频电台发射信号与多音干扰的频谱图及概率分布

Figure Frequency spectrum and PDF of a HF signal and multi-tone jammer

从图 2 中可以看出，跳频电台所发射的信号与多音干扰占据相同的频谱范围，所以二者在频率上是不可分的，但二者具有不同的概率分布，因此二者是独立的，可以采用独立分量分析的方法将二者分开。根据以上分析，采用双天线技术，设计如图 3 所示的具有抗多音扰的接收机。

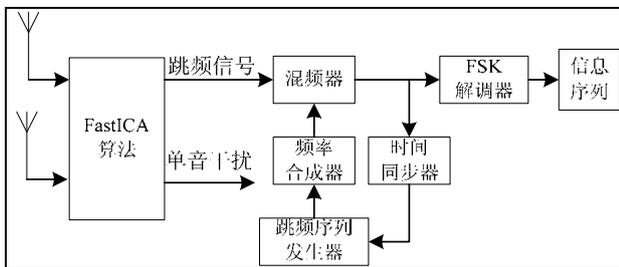


图 3 提出的接收机结构

Figure 3 Proposed receiver scheme

图 3 中，双天线接收到的信号是跳频电台所发射信号与多音干扰的混合，二者是相互独立的。首先采

用 FastICA 算法将混合信号分成独立的双路信号，分别得到跳频信号和多音干扰，然后采用常规的跳频接收机结构对跳频信号进行解跳，恢复出跳频电台所发射的信息。

5 计算机仿真

为了验证图 3 所示接收机结构的性能，采用 Matlab 产生跳频信号和多音信号。其中跳频信号调制方式采用 4FSK，载频为 100KHz，每符号周期跳 4 次，跳频频点为 16 个；多音信号随机干扰 1/3 的信道。

仿真中，混合矩阵中的每个元素与跳频发射机到两部接收天线的增益及干扰机到两部接收天线的增益有关，在此处混合矩阵 $A = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ 0.2 & 1 \end{bmatrix}$ 。假设接收机

采用相干接收，载波同步已经建立，且忽略噪声的影响。图 4 为某次仿真中跳频电台发送数据及采用图 3 所示接收机接收到的数据示意图。比较图 4 中上下两图，可以看出，提出的接收机可以在多音干扰下恢复出跳频电台发射的信息。

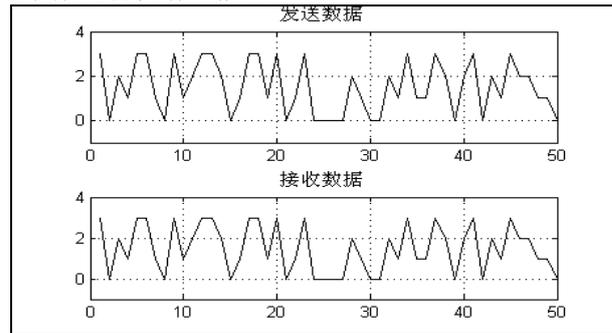


图 4 跳频电台发送数据及在提出的接收机解调得到的数据

Figure 4 Transmitted signal and received signal of the proposed receiver

为了验证提出接收机的性能，仿真重复 50 次，提出的接收机误码率及传统接收机误码率如图 5 所示。图 5 中上图为采用提出接收机误码率，下图为传统接收机的误码率。比较图 5 中上图和下图可以看出，提出的接收机具有更低的误码率。

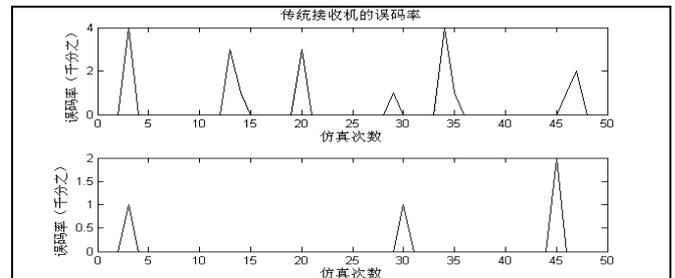


图 5 传统接收机误码率与提出的接收机误码率比较

Figure 5 BER of the classical receiver and the proposed receiver

6 结论

为了抑制多音干扰对快跳频系统的干扰,采用双天线技术,提出了一种采用独立分量分析的接收机结构,该接收机首先从射频将信号与干扰分离开,然后采用传统的接收机对分离得到的跳频信号进行解跳,从而得到发射的信号。计算机仿真表明,与传统的接收机相比,提出的接收机结构具有更低的误码率,具有一定的抗干扰能力。

由于独立分量分析采用了双天线接收,利用了传输路径的独立性,所以两天线接收到信号的路径增益应具有较大的差异。天线必需保持一定的距离,但本文对此问题没有过多的探讨,这是值得进一步研究的。

References (参考文献)

- [1] Aapo Hyvärinen, Juha Karhunen, Erkki Oja. Independent Component Analysis [M]. Chichester, England: John Wiley. 2001. Chap1-3.
- [2] Cichocki A, Amari S. Adaptive blind signal and image processing: learning and applications [M]. John Wiley & Sons, Ltd, 2002. P45-65.
- [3] 张昕, 胡波, 凌燮亭, 盲信号分离在数字无线通信中的一种应用[J], 通信学报, 2000年2月, Vol.21(2), P73-77. ZHANG Xi, Hu Bo, LING Hong-ting, An application of blind signal separation in wireless digital communication[J], *Journal of Communications*, 2000.02, Vol.21(2), P73~77.
- [4] I. Kostanic and W. Mikhay, Blind source separation technique for reduction of co-channel interference. ELECTRONICS LETTERS[C]. 26th September 2002 Vol, 38 No. 20, P1210-1211.
- [5] 沈丽丽, 侯永宏, 马兰 译. Roger L. Peterson, Rodger E. Ziemer 著, 扩频通信导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006年, P23-46. SHEN Li-li, HOU Yong-hong, MA Lan [T]. Peterson, Rodger E. Ziemer. Introduction to spread spectrum system. [M]. BEI Jing: Publication House of Electronic Industry, 2006, P23-46.
- [6] 张邦宁, 魏安全, 郭道省, 通信抗干扰技术[M]. 北京: 机械工业出版社. 2006年, P245-256. ZHANG Bang-ning, Wei An-quan, GUO Dao-xing. Anti-interference technology of communication[M]. China Machine Press., 2006, P245-256.
- [7] Hyvarinen A, Fast and robust fixed-point algorithm for independent component analysis[J]. *IEEE Trans. On Neural Networks*, 1999, 10(3), P626-634.