

一种同频非合作航天器通信信号的盲源分离算法

刘治军 梁宗闯 邱乐德 周业军 齐维孔

(中国空间技术研究院通信卫星事业部, 北京 100094)

摘 要 针对频谱混叠的同频非合作航天器通信信号分离问题,研究了盲源分离技术,提出一种以立方函数作为非线性函数的盲源分离改进算法。在介绍盲源分离模型的基础上,依据通信信号的亚高斯性,对快速独立分量分析(FastICA)算法的非线性函数作适应性改进,提升了算法的性能。选用 8FSK、BPSK、QPSK 和频谱混叠的通信信号与单音干扰信号进行混合,仿真并对比分析了 4 种应用不同非线性函数的 FastICA 算法。500 次的仿真结果表明:应用立方函数的 FastICA 算法的分离成功率达到 100%,平均迭代次数约为 25,性能指数均值为 0.115 7,具有更优的效能,可很好地解决非合作航天器通信信号的分离问题。

关键词 非合作航天器通信信号;立方函数;盲源分离;频谱混叠

中图分类号:TN911.7 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1673-8748.2015.06.004

Algorithm of Blind Source Separation for Non-cooperative Spacecraft Communication Signals with Same Carrier Frequencies

LIU Zhijun LIANG Zongchuang QIU Lede ZHOU Yejun QI Weikong

(Institute of Telecommunication Satellite, China Academy of

Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: To complete the separation of non-cooperative spacecraft communication signal with spectrum aliased, the research of BSS (blind source separation) is carried out. Based on the cubic function as a nonlinear one, the algorithm of BSS is improved. The separation model of BSS is described. The nonlinear function of FastICA (fast independent component analysis) is modified to improve the capability of the algorithm because communication signals are sub-Gaussian signals. Three kinds of common communication signal are mixed with a kind of sine wave interference signal. Several simulations of different algorithms are compared based on different nonlinear functions. The results of 500 simulations show that FastICA algorithm based on cubic function enhances the separation success rate to 100%, and the average number of iteration times is 25, the performance index is 0.1157. The cubic function makes the algorithm get the best effect and completes the separation of non-cooperative spacecraft communication signal well.

Key words: non-cooperative spacecraft communication signal; cubic function; blind source separation; aliased spectrum

收稿日期:2014-04-08; 修回日期:2014-05-08

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA01A504)

作者简介:刘治军,男,硕士研究生,研究方向为航天器通信技术。Email:2362172973@qq.com。

1 引言

地球同步轨道上卫星数量的增多,以及各种新型通信技术(如成对载波多址技术)在航天器上的应用,使得实际环境中无线电信号日益密集,自然干扰和人为干扰日益严重。卫星数量日益增多导致卫星间距越来越小,卫星信号会相互干扰;各种新型通信技术的应用使得下行信号本身就是混合信号,从而使得通信接收、频谱监视等应用中遇到的混合信号越来越多。这类信号一般在时域、频域上易发生混叠,无法采用传统的信号分离方法进行处理。另外,此类信号多是非合作的,即不知道信号的带宽、码速率和载波频率等基本信息,进一步加大了处理难度,因而须要研究同频非合作航天器通信信号的分离技术,而盲源分离技术是一个很好的选择。

盲源分离技术的研究起源于20世纪80年代^[1-2],国内的研究始于20世纪90年代^[3]。文献[4-5]中对盲源分离的理论、方法和应用进行了概括,文献[6-12]中将此理论与相应的研究领域结合进行了研究。其中:文献[8-11]中探讨了盲源分离在空间电子侦察中的应用情况,并进行了算法仿真分析。文献[12]中研究了如何用此技术解决邻星干扰抑制与抵消问题,以及在星载船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)中的突发混合信号盲分离问题,并取得了较好的仿真结果。在算法原理上,文献[8]中使用峭度作为代价函数对非高斯性进行度量,得到了较好的分离效果;但在实际应用中,由于峭度的值只能从测量样本中估计,峭度方法可能对野值极其敏感,并不是非高斯性的一个鲁棒度量^[7]。文献[9-10]中选择了鲁棒性较好的负熵作为代价函数,并分别使用并行与串行的FastICA算法,实现了对同频非合作信号的分离。串行FastICA算法与源数目一次方成正比,并行算法与源数目的二次方成正比,因而也不存在不适用高维空间的问题。不过,在非线性函数的选取上,文献[9-10]中并未具体针对通信信号进行讨论,所使用的非线性函数为双曲正切函数,但未能充分考虑通信信号的亚高斯性。

本文在已有研究的基础上,将盲源分离技术应用于分离频谱混叠的非合作航天器通信信号。通过结合通信信号的亚高斯性,对基于负熵的串行FastICA算法作适应性改进;对比仿真了使用4种不同非线性函数的分离算法,验证了应用立方函数

的盲源分离算法的优势。

2 盲源分离模型

最简单的盲源分离模型是线性混合模型,每个传感器信号 $x_i(k)$ 都是源信号 $s_j(k)$ 的线性组合。线性瞬时混合模型表示为

$$x_i(k) = \sum_{j=1}^N [a_{ij}s_j(k)] \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

式中: N 为源个数, M 为传感器个数,简化模型常常假设 $M = N$; k 为观测时刻,对于数字信号来说,表示第 k 个观测值; $x_i(k)$ 为第 i 个传感器在第 k 个时刻接收到的值; $s_j(k)$ 为第 j 个源在第 k 个时刻的观测值; a_{ij} 为源信号线性混合的混合系数。

式(1)写成矩阵形式为

$$x(k) = As(k) \quad (2)$$

式中: $x(k)$ 为传感器接收信号的值,即观测信号; $s(k)$ 为源信号; A 为 $M \times N$ 阶的混合矩阵,表征源信号的线性混合方式。

盲源分离的任务是在 s 和 A 未知的情况下,仅通过对 x 的处理,得到分离矩阵 W 。为了书写方便,求出源信号 s 的估计 y ,对瞬时混合模型的分离可表示为

$$y(k) = Wx(k) = WAs(k) \quad (3)$$

当 W 和 A 的乘积是一个每行和每列只有一个非零元素的矩阵时,就达到了恢复信号的目的。在实际应用中,对于观测信号首先需要进行预处理(即乘以预处理矩阵 V)得到信号 z ,之后再进行分离(即乘以分离矩阵 W)。

针对含噪声的情况,若噪声是加性噪声,则可以当作一个独立源进行分离;若噪声是非加性的,含在独立源中,模型中的 s 就是源和噪声的混合结果,分离后得到的 y 也是带噪声的,只要合理设计分布式天线,即可保证混合矩阵的条件数较小,噪声便不会被放大^[12]。

图1是盲源分离系统的示意框图。前面部分是未知源信号的混合过程;后半部分是盲源信号的分离过程。在盲源信号处理中,一般先要对混合信号进行预处理。预处理包括中心化和白化:中心化处理是使信号的均值为零;白化处理可去除各观测信号之间的相关性,从而简化后续独立分量的提取过程。通常情况下,对数据进行白化处理^[8]以使算法的收敛性较好,工作量少,效率高。



图 1 盲源分离系统模型

Fig. 1 System model for blind source separation

3 应用立方函数的盲源分离改进算法

本文在 FastICA 算法^[7]原理的基础上,结合通信信号的亚高斯性,对所选取的非线性函数进行适应性改进。FastICA 算法又称固定点(Fixed-point)算法,有基于峭度、基于负熵等形式。峭度和负熵均可作为非高斯性的度量,但峭度不是一个鲁棒的度量,样本中某个不准确的值会使峭度发生非常大的变化;而负熵则能很好地克服这一缺点^[8]。因此,本文采用的是应用负熵最大的 FastICA 算法。

3.1 FastICA 算法基本原理

应用负熵最大的 FastICA 算法以负熵最大作为一个搜寻方向,可以实现顺序提取独立源的目的,充分体现探查性投影追踪(Exploratory Projection Pursuit, EPP)这种传统线性变换的思想^[12]。此外,该算法采用了定点迭代的优化方法,使得收敛更加

快速、稳健。在该算法中,负熵可以近似为^[7]

$$N(Y) = \{E[g(Y)] - E[g(Y_{\text{Gauss}})]\}^2 \quad (4)$$

式中: $N(Y)$ 为反映 Y 偏离高斯随机向量的程度; $E[\cdot]$ 为均值运算; $g(\cdot)$ 为非线性函数,其选取规则详见第 3.2 节; Y 为某一随机向量, Y_{Gauss} 是与 Y 具有相同协方差矩阵的高斯随机向量。

经过一系列的数学推导后,可以得到 FastICA 算法如下。

$$W^* = E\{Xg(W^T X)\} - E\{g'(W^T X)\}W \quad (5)$$

$$W = W^* / \|W^*\| \quad (6)$$

式中: W^* 为 W 的新值; $E\{\cdot\}$ 表示取数据的期望; X 为观测矩阵; $g'(\cdot)$ 表示非线性函数 $g(\cdot)$ 的导数。

3.2 非线性函数的改进

非线性函数 $g(y)$ 经常取为 $g_1(y) = \tanh(a_1 y)$, 适用于亚高斯和超高斯信号并存的情况,通用性较强。这里, $1 \leq a_1 \leq 2$, 通常取 $a_1 = 1$ 。文献[9-10]中使用此非线性函数成功分离了几种频谱混叠的非合作信号。由于通信信号常常是亚高斯信号,因而选择专用性更强的非线性函数会获得更好的分离结果。本文列举了几个在其他领域使用过的非线性函数,如表 1 所示。后文中将使用应用这 4 种非线性函数的 FastICA 算法,对频谱混叠的通信信号进行仿真分析,以寻求适用于同频非合作通信信号的盲源分离技术。

表 1 非线性函数及其适用范围

Table 1 Category of nonlinear functions and principles of choosing

非线性函数	双曲正切函数 $g_1(y) = \tanh(y)$	指数函数 $g_2(y) = y \exp(-y^2/2)$	立方函数 $g_3(y) = y^3$	多项式函数 $g_4(y) = \frac{5}{8}y^3 + \frac{3}{8}y^5$
超高斯信号		✓		
亚高斯信号			✓	✓
超高斯和亚高斯混合信号	✓			

信号是亚高斯的还是超高斯的,可以根据峭度来判断。峭度是表征数据在均值两侧集中程度的参数,定义为

$$\text{kurt}(y) = E\{y^4\} - 3(E\{y^2\})^2 \quad (7)$$

峭度的值可正可负,具有负峭度的随机变量称为亚高斯的,峭度为正的随机变量称为超高斯的。数字通信信号的常用调制方式有 BPSK、QPSK 和 FSK 等几种,一般为亚高斯信号,因而理论上选择非线性函数 g_3 和 g_4 所得分离结果更好。

3.3 改进算法

改进算法的基本步骤如下^[12]。

(1) 预处理: 首先对观测矩阵 X 进行中心化,使

它的均值为 0; 然后对去中心化的数据进行白化处理,得到新的矩阵 $Z, X \rightarrow Z$ 。

(2) 设迭代次数 $n = 0$, 迭代精度 $\epsilon = 0.000\ 01$, 最大迭代次数 $n_{\max} = 10\ 000$, 待估计分量的个数 $m = m_0$, 当前提取的源信号序号 $p = 1$ 。

(3) 设定初始迭代矢量(随机的) $W_p = W_{p0}$ 。

(4) 保存上次迭代结果 $W_{\text{last}, p} = W_p$; 设定迭代方程 $W_p = E\{Zg(W_p^T Z)\} - E\{g'(W_p^T Z)\}W$, 非线性函数选用立方函数。

(5) 对数据进行正交化处理: $W_p = W_p -$

$$\sum_{j=1}^{p-1} (W_p^T W_j) W_j。$$

(6)将数据归一化处理:令 $W_p = W_p / \|W_p\|$ 。

(7)判断迭代次数是否超过限度 n_{\max} :若 $n > n_{\max}$, 结束;否则,迭代次数加1, $n = n + 1$ 。

(8)若 W_p 不收敛,即不满足 $|W_{\text{last},p} - W_p| < \varepsilon$, 返回第4步;否则, $p = p + 1$ 。

(9)如果已分离信号个数 p 大于源个数 m , 返回第3步;否则,结束,最终获得的分离矩阵为 $W = [W_1 \ W_2 \ \dots \ W_m]$ 。

3.4 评价指标

对盲源分离算法的评价主要包括两方面:一是算法的收敛速度,二是分离后的信号与源信号的逼近程度。本文采用迭代次数对收敛速度进行衡量;采用相似性系数与性能指数两个指标衡量分离结果的逼近程度。相似性系数便于直观理解试验分离后的结果,但不便于大量数据统计分析;性能指数则相反。因此,本文先利用相似性系数进行单次试验,直观说明分离结果,再利用性能指数对大量仿真结果进行统计分析。

1) 相似系数

相似系数的定义^[9]为

$$\xi_{ij} = \xi(y_i, s_j) = \frac{\left| \sum_{k=1}^T y_i(k) s_j(k) \right|}{\sqrt{\sum_{k=1}^T y_i^2(k) \sum_{k=1}^T s_j^2(k)}} \quad (8)$$

式中: T 为观测样值个数。

相似系数用来度量两个信号之间的相似程度,它抵消了分离结果在幅值上存在的差异,从而避免了幅值不确定性的影响。当由相似系数构成的相似系数矩阵的每行和每列仅有一个元素接近于1,则可以认为算法分离效果较为理想。

2) 性能指数

性能指数(Performance Index)的定义^[13-14]为

$$P_1 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \left[\left(\sum_{p=1}^N \frac{|f_{ip}|}{\max_j |f_{ij}|} - 1 \right) + \left(\sum_{p=1}^N \frac{|f_{pi}|}{\max_j |f_{ji}|} - 1 \right) \right] \quad (9)$$

式中: f_{ij} 为全局传输矩阵 $F = WA$ 的元素; $\max_j |f_{ij}|$ 表示全局传输矩阵的第 i 行元素绝对值中的最大值; $\max_j |f_{ji}|$ 表示第 i 列元素绝对值中的最大值。

若源信号 s 的估计 y 与源信号 s 的波形完全相同,则 $P_1 = 0$, 并且式(9)是全局传输矩阵为方阵的情况,在其他情况下须对其进行修正。

4 仿真算例

4.1 通信信号仿真

在航天数字通信中,常用调制方式有FSK、BPSK和QPSK等,因此,本文将8FSK、BPSK、QPSK和单音正弦波4种信号进行混合,混合矩阵是一个随机产生的矩阵,各元素值在(0,1)之内,条件数小于3。设定仿真条件见表2。为使观察更形象直观,在不影响试验结果的情况下,将8FSK的调制偏移量设置略高。用于仿真的4种信号的时域波形如图2所示。4种信号的频谱图见图3,可以直观看出,几种信号的频率较为接近,很难用常规的频谱分离方法进行分离。图4为4种信号的混合波形,即如图1所示的观测向量 $x(t)$,由源信号乘以混合矩阵 A 所得。后面将以此作为输入,采用本文的分离算法对 $x(t)$ 进行分离。

表2 仿真条件

Table 2 Conditions of simulation

信号种类	单音 干扰信号	8FSK	BPSK	QPSK
观察时间/ms	0.2	0.2	0.2	0.2
采样频率/MHz	2	2	2	2
信噪比/dB	15	15	15	15
中心频率/MHz	0.100	0.100	0.103	0.100
码速率/(kbit/s)		80	50	100
频率偏移量/MHz		0.025		

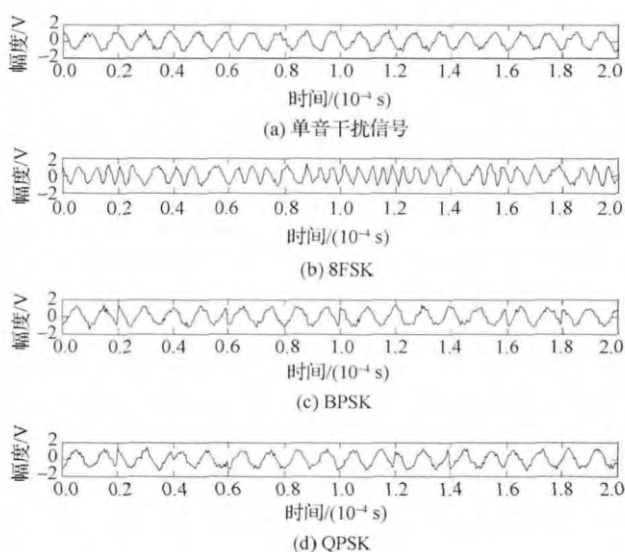


图2 通信信号时域波形

Fig 2 Waveforms of communication signals

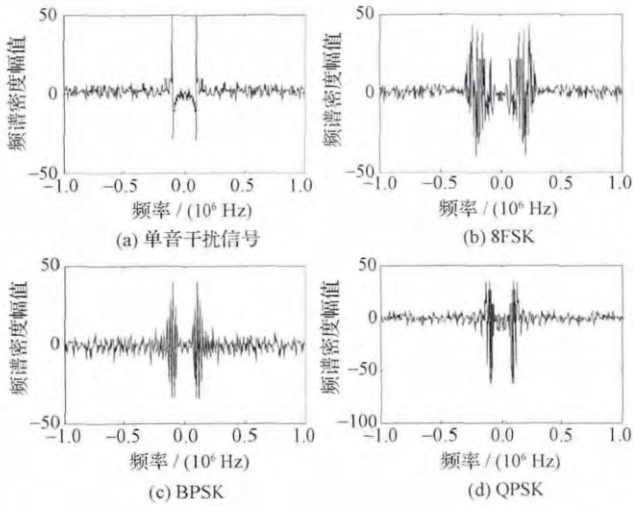


图 3 通信信号频谱波形

Fig. 3 Waveforms of communication signal spectrums

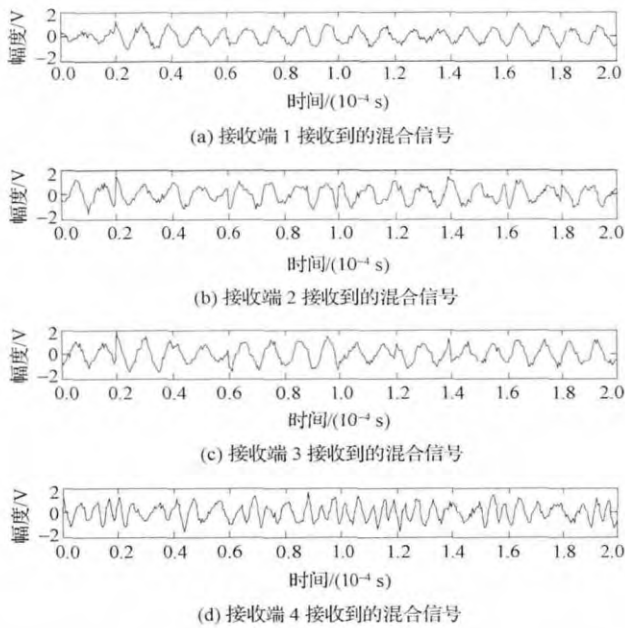


图 4 4 种通信信号混合后的波形

Fig. 4 Waveforms of four mixed communication signals

保持 4 种信号的信噪比为 15 dB, 仿真 1000 次, 计算各自峭度并进行统计, 其结果如表 3 所示。3 种常用通信信号的峭度范围均为 $(-0.5, -0.3)$, 且都为负值。亚高斯信号的峭度为负值, 统计结果验证了通信信号的亚高斯性。

表 3 通信信号的峭度统计

Table 3 Kurtosis statistics of communication signals

信号种类	峭度范围	均值
单音干扰信号	$(-0.446\ 1, -0.318\ 9)$	$-0.379\ 6$
8FSK 信号	$(-0.468\ 6, -0.302\ 6)$	$-0.374\ 8$
BPSK	$(-0.449\ 6, -0.319\ 0)$	$-0.375\ 6$
QPSK	$(-0.462\ 0, -0.320\ 5)$	$-0.374\ 0$

4.2 分离算法仿真结果与分析

使用相同的混合矩阵对原始信号进行混合, 对混合信号按第 3.3 节的分离算法进行分离。4 种不同非线性函数得到 4 个 FastICA 算法, 使用 4 种算法分别对混合信号进行分离仿真, 收敛精度为 0.000 01, 最大迭代次数 10 000。

根据不同算法得到的 4 个相似系数矩阵依次为

$$\begin{aligned}\xi_1 &= \begin{bmatrix} 0.105\ 4 & 0.998\ 3 & 0.047\ 9 & 0.106\ 1 \\ 0.994\ 2 & 0.045\ 5 & 0.039\ 4 & 0.002\ 2 \\ 0.004\ 6 & 0.028\ 8 & 0.998\ 1 & 0.096\ 2 \\ 0.020\ 9 & 0.023\ 0 & 0.000\ 1 & 0.989\ 7 \end{bmatrix}, \\ \xi_2 &= \begin{bmatrix} 0.105\ 3 & 0.998\ 3 & 0.047\ 7 & 0.105\ 3 \\ 0.994\ 2 & 0.045\ 3 & 0.038\ 8 & 0.001\ 9 \\ 0.020\ 4 & 0.025\ 3 & 0.111\ 9 & 0.994\ 3 \\ 0.007\ 5 & 0.026\ 4 & 0.991\ 8 & 0.015\ 4 \end{bmatrix}, \\ \xi_3 &= \begin{bmatrix} 0.108\ 6 & 0.998\ 3 & 0.056\ 8 & 0.107\ 5 \\ 0.993\ 8 & 0.048\ 9 & 0.040\ 2 & 0.001\ 3 \\ 0.005\ 1 & 0.019\ 7 & 0.997\ 6 & 0.093\ 4 \\ 0.024\ 9 & 0.025\ 2 & 0.003\ 9 & 0.989\ 8 \end{bmatrix}, \\ \xi_4 &= \begin{bmatrix} 0.110\ 3 & 0.998\ 3 & 0.062\ 9 & 0.108\ 6 \\ 0.993\ 5 & 0.050\ 8 & 0.042\ 6 & 0.003\ 6 \\ 0.003\ 6 & 0.013\ 4 & 0.997\ 1 & 0.091\ 6 \\ 0.027\ 4 & 0.026\ 9 & 0.006\ 4 & 0.989\ 8 \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

从相似系数矩阵还可以得到分离后的信号与源信号之间的对应关系。以第 1 个矩阵为例, 其对应关系为 $s_1 \leftarrow y_2, s_2 \leftarrow y_1, s_3 \leftarrow y_3, s_4 \leftarrow y_4$ 。分离后的信号与源信号之间的相关系数大于 0.97, 说明分离效果比较理想。

仿真试验将 3 种不同调制方式、中心频率相同的通信信号与 1 种在其带宽内的单音干扰信号进行混合, 目的是仿真真实通信过程中相同中心频率的不同调制方式信号混合, 并且带宽内存在单音信号干扰的情况。一般, 对于通信信号, 信号带宽在中心频率的 3% 以内, 因而在通信过程中, 单音信号会对相同中心频率的通信信号会产生干扰。几种相同中心频率的通信信号混合在一起, 是难以通过频域滤波的方法进行分离的, 因此必须采用新型的信号分离技术。

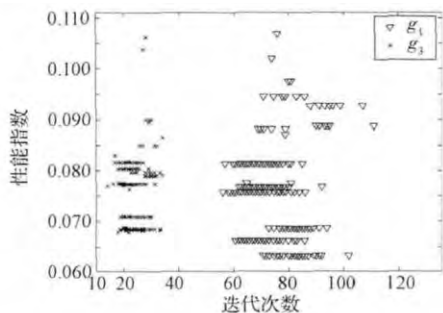
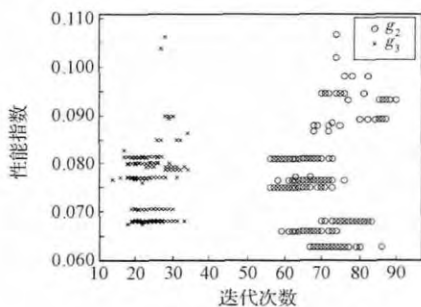
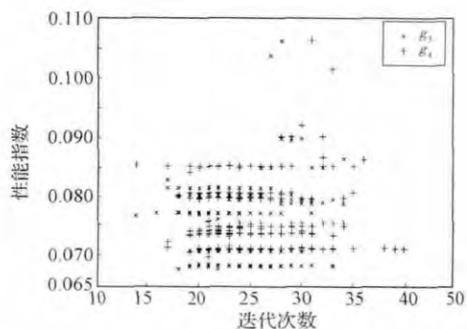
为进一步对比分离结果, 分别使用 4 种非线性函数进行 500 次分离仿真试验, 结果如表 4 所示。4 个函数的结果的成功率在 95% 以上, 均在可接受范围内。非线性函数 g_1 与 g_2 的迭代次数至少 60 次, 而 g_3 与 g_4 的迭代次数不到 30 次, 并且性能指数更小, 总体而言, 使用 g_3 与 g_4 的分离结果更优。

表 4 4 种非线性函数仿真所得统计结果

Table 4 Index statistics of simulations using four nonlinear functions

非线性函数	$g_1(y) = \tanh(y)$	$g_2(y) = y \exp(-y^2/2)$	$g_3(y) = y^3$	$g_4(y) = \frac{5}{8}y^3 + \frac{3}{8}y^5$
不收敛次数	13	6	0	0
分离成功率/%	97.4	98.8	100.0	100.0
迭代次数范围	(61, 10 000)	(60, 10 000)	(15, 34)	(17, 39)
平均迭代次数	337.17	192.89	25.168	26.43
性能指数范围	(0.092 6, 1.421 1)	(0.092 5, 1.260 1)	(0.090 2, 0.135 8)	(0.092 7, 0.148 1)
性能指数均值	0.147 0	0.129 8	0.115 7	0.123 6

进一步比较各非线性函数的效能,使用非线性函数 g_3 所得的分离结果分别与使用 g_1, g_2, g_4 所得的结果进行对比,见图 5~7(分布的局部区域的放大图,个别分离失败的点未列入其中)。图中每个散点的意义是,每次仿真完成后,该次仿真所需要的迭代次数以及此次仿真结果所算出的分离性能指数,因而点越靠近右上方,表明分离结果越差。在图 5 与图 6 中,从迭代次数来看,使用 g_3 要优于使用 g_1 与 g_2 ,而对于性能指数, g_1 与 g_2 的整体分布略大于 g_3 。图 7 中,代表 g_4 的散点的整体分布居于代表 g_3 的散点的右上方,因而使用 g_3 的分离结果略优于使用 g_4 的。综合以上结果,非线性函数 g_3 更适合通信信号的盲源分离。

图 5 使用非线性函数 g_1 与 g_3 分离所得指标的分布Fig. 5 Distributing of indexes using nonlinear function g_1 and g_3 图 6 使用非线性函数 g_2 与 g_3 分离所得指标的分布Fig. 6 Distributing of indexes using nonlinear function g_2 and g_3 图 7 使用非线性函数 g_3 与 g_4 分离所得指标的分布Fig. 7 Distributing of indexes using nonlinear function g_3 and g_4

5 结束语

选择何种非线性函数是盲源分离技术的关键问题。本文针对这一问题的研究结果表明:在信噪比与混合矩阵条件数满足一定条件的情况下,盲源分离技术可以对频谱混叠的非合作通信信号进行分离;可以完成对通信带宽内单音干扰信号的分离;针对非合作通信信号的盲源分离,采用应用立方函数的 FastICA 算法优于采用双曲正切函数的分离算法。本文提出的改进算法,可将显著提高航天器通信信号的抗干扰能力,也能提升针对非合作目标信号接收的分离能力。由于本文的算法是在非欠定条件下的分离,而在欠定条件下的盲源分离,还要进一步深入研究。

参考文献 (References)

- [1] Jutten C, Herault J. Blind separation of sources. Part I: an adaptive algorithm based on neuromimetic architecture[J]. Signal Processing, 1991, 24(1): 1-10
- [2] Common P, Jutten C, Herault J. Blind separation of sources, Part II: problems statement[J]. Signal Processing, 1991, 24(1): 11-20
- [3] 王卫华. 盲源分离算法及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨

- 工程大学,2009
- Wang Weihua. Application and algorithm of the blind source separation[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2009 (in Chinese)
- [4] 张贤达. 盲信号分离[J]. 电子学报, 2001, 29(12A): 1766-1771
- Zhang Xianda. Blind signals separation[J]. Acta Electronica Sinica,2001,29(12A):1766-1771 (in Chinese)
- [5] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000
- Zhang Xianda, Bao Zheng. Communication signals processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000 (in Chinese)
- [6] Cardoso J F. Infomax and maximum likelihood for blind source separation [J]. IEEE Signal Proc. Letters,1997, 4(4):112-114
- [7] Hyvärinen A. 独立成分分析[M]. 周宗潭, 董国华, 徐昕, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2007
- Hyvärinen A. Independent component analysis [M]. Zhou Zongtan, Dong Guohua, Xu Xin, et al, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007 (in Chinese)
- [8] 李莉. 基于峭度的盲分离在通信信号盲侦察中的应用[J]. 通信技术, 2010, 43(4): 133-135, 138
- Li Li. Application of blind source separation based on kurtosis in communication signal blind reconnaissance [J]. Communications Technology, 2010, 43(4): 133-135, 138 (in Chinese)
- [9] 周治宇, 陈豪. 空间同频电子侦察信号的盲分离[J]. 中国空间科学技术, 2009, 29(3): 10-15, 22
- Zhou Zhiyu, Chen Hao. Blind separation of space radio reconnaissance signals with same frequency [J]. Chinese Space Science and Technology, 2009, 29(3): 10-15, 22 (in Chinese)
- [10] 周治宇. 基于盲信号分离的同频信号的串行分离技术[J]. 信息与电子工程, 2009, 7(4): 308-313
- Zhou Zhiyu. Serial separation of signals with same frequency based on blind signal separation[J]. Information and Electronic Engineering, 2009, 7(4): 308-313 (in Chinese)
- [11] 周治宇, 陈豪. 空间电子侦察信号的盲分离[C]//卫星有效载荷技术学术会议论文集. 西安: 中国空间技术研究院西安分院, 2009: 92-98
- Zhou Zhiyu, Chen Hao. Blind separation of space radio reconnaissance signals [C]//Proceedings of Satellite Payload Technology Academic Conference. Xi'an: CAST-Xi'an Academy of Space Electronic Information Technology, 2009: 92-98 (in Chinese)
- [12] 万坚, 涂世龙, 廖灿辉, 等. 通信混合信号盲分离理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012
- Wan Jian, Tu Shilong, Liao Canhui, et al. Theory and technology on blind source separation of communication signals [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012 (in Chinese)
- [13] 吴其泽. 语音信号的盲源分离算法研究及应用[D]. 广州: 中山大学, 2010
- Wu Qize. Researches and application of blind speech signals separation [D]. Guangzhou: Sun Yatsen University, 2010 (in Chinese)
- [14] 李舜韶. 振动信号的盲源分离技术及应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011
- Li Shunming. Technique and applications of blind vibration signal separation [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011 (in Chinese)

(编辑: 夏光)