

# 基于复数 FastICA 算法的盲多用户检测

刘晓志<sup>1</sup>, 邵 秀<sup>1,2</sup>, 杨英华<sup>1</sup>, 陈晓波<sup>1</sup>

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳辽海装备有限责任公司, 辽宁 沈阳 110003)

**摘 要:** 针对 MIMO-OFDM 系统, 提出了一种基于复数 FastICA 的盲多用户检测算法. 该算法首先利用复数 FastICA 算法的快速收敛特性来提高多用户的分离速度, 同时利用信号的相关函数对复数 FastICA 算法引起的幅度不确定性和相位不确定性进行了修正, 最后将所提出的改进算法与复数自然梯度学习算法(CNGLA)进行仿真比较. 结果表明, 相比于传统的自然梯度算法, 所提算法不仅收敛速度较快, 而且具有更低的误码率, 另外随着接收天线的增多, 信号的分离效果会更好.

**关 键 词:** MIMO-OFDM 系统; 复数 FastICA 算法; 盲多用户检测; 幅度不确定性; 相位不确定性

中图分类号: TN 911.72

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)09-1253-05

## Blind Multi-user Detection Based on Complex FastICA Algorithm

LIU Xiao-zhi<sup>1</sup>, SHAO Xiu<sup>1,2</sup>, YANG Ying-hua<sup>1</sup>, CHEN Xiao-bo<sup>1</sup>

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shenyang Liaohai Equipment Co., Ltd., Shenyang 110003, China. Corresponding author: LIU Xiao-zhi, E-mail: liuxiaozhi@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** A new blind multi-user detection algorithm was proposed on the basis of complex FastICA in MIMO-OFDM system. With the proposed algorithm, the separation of multi-user could be speeded up by fast convergence characteristics of complex FastICA algorithm firstly, and the indeterminacy of amplitude and indeterminacy of phase by CFastICA algorithm were revised by using correlation function. At last, comparing the improved algorithm with the complex natural gradient learning algorithm(CNGLA), it was proved that CFastICA algorithm has not only faster convergent speed but also smaller bit error rate. It also indicated that using more numbers of receiving antennas would get better signal separation.

**Key words:** MIMO-OFDM system; complex FastICA algorithm; blind multi-user detection; indeterminacy of amplitude; indeterminacy of phase

多输入多输出(MIMO, multiple-input multiple-output)与正交频分复用(OFDM, orthogonal frequency division multiplexing)技术相结合被视为第四代移动通信的核心技术之一. MIMO 技术在不增加带宽的情况下, 可成倍地提高通信系统的容量和频谱利用率. 而 OFDM 技术可把频率选择性信道转换为多个平坦子信道, 以减小多径衰落的影响.

目前, 多用户检测技术<sup>[1]</sup>多应用在第三代移动通信(CDMA)系统中, 在 MIMO-OFDM 系统<sup>[2-3]</sup>中的应用研究还不多. 近几年研究的算法如正交 oja 子空间追踪方法、Kalman 滤波算法<sup>[4]</sup>等非盲检测算法需要用户的先验信息. 而 MIMO-

OFDM 系统由于天线数目较多, 发送原始用户信号需要占用大量的频谱资源, 从而影响数据的传输速率, 所以文献[5]将盲多用户检测算法应用到 MIMO-OFDM 系统中.

独立分量分析(independent component analysis, ICA)算法作为一种盲检测算法能有效地抑制高斯白噪声和有色噪声. 根据处理信号的类型不同, ICA 算法可分为分离实值信号的实数 ICA 算法和分离复值信号的复数 ICA 算法. 由于实际应用中经常存在一些复数混合信号, 如盲解卷问题、雷达和通信信号等都需要用复数 ICA 算法对其进行分离, 人们越来越多地关注复数

ICA 算法研究. 复数 FastICA (complex FastICA, CFastICA) 算法由于具有非常快的收敛速度, 可以快速有效地解决瞬时线性盲分离问题, 目前已经被应用于很多领域<sup>[6-7]</sup>.

MIMO - OFDM 调制是将在时域具有卷积关系的混合信号变换到频域进行调制, 故 MIMO - OFDM 系统输出的信号是复数混合信号, 所以在分离信号时需要选择针对复数混合信号进行分离的算法.

文献 [5] 利用复数自然梯度学习算法 (CNGLA) 对 MIMO - OFDM 系统的多用户进行了信号检测. 考虑到 CNGLA 算法需要依赖步长的选取, 且收敛速度较慢, 所以本文重点研究了收敛速度较快, 且完全不受步长影响的复数 FastICA 算法, 并对该算法在 MIMO - OFDM 系统中的盲多用户检测应用进行了详细的算法模型及具体实现步骤分析, 最后通过仿真验证了该算法的优越性.

1 系统模型

1.1 MIMO - OFDM 信号模型

假设 MIMO - OFDM 系统有  $M_T$  个发送天线,  $M_R$  个接收天线, 且  $M_R > M_T$ . 每个用户都有 1 个独占的发送天线. 系统的信号模型如图 1 所示.

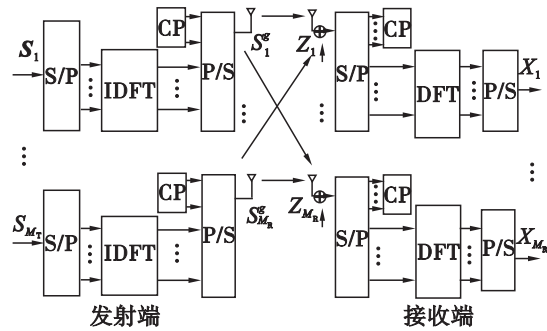


图 1 MIMO - OFDM 系统信号模型  
Fig. 1 MIMO - OFDM system signal model

发送端对每个用户信号进行线性预编码<sup>[8-9]</sup>, 本文采用以下编码方式:

$S_{i,k}(m) = [d_{i,k}(m) + ad_{i,1}(m)] / \sqrt{1 + |a|^2}$ . (1)  
其中:  $d_{i,k}(m)$  是用户  $i$  经过 DQPSK 编码的第  $k$  子载波信号, 且  $E[|d_{i,k}(m)|^2] = 1$ ;  $S_{i,k}(m)$  是对用户  $i$  的第  $k$  个子载波的线性编码信号,  $|a| \leq 1$ .

$S_{i,k}(m)$  的自相关函数为  
 $R_{S_i}(m, m) = R_{S_i}(0) = E[|S_i(k + m)|^2] = \frac{1}{1 + a^2}(1 + a^2) = 1$ . (2)

频点  $m$  和频点  $p$  的信号  $S_{i,k}(m), S_{i,k}(p)$  的互相关函数为

$R_{S_i}(m, p) = E[S_{i,k}(m)S_{i,k}^*(p)] = a^2 / (1 + a^2)$ . (3)

其中:  $m - p = 1$ ;  $S_{i,k}^*(p)$  为  $S_{i,k}(p)$  的共轭.

设用户  $i$  的输入信号是长度为  $N$  的数据符号块, 其形式如下:

$S_i(k) = [S_i(k), \dots, S_i(k + N - 1)]^T$ . (4)

在接收端, 第  $j$  根接收天线接收的信号表示成频域形式<sup>[10]</sup> 为

$X_j(k) = \sum_{i=1}^{M_T} H_{ij}S_i(k) + Z_j(k)$ . (5)

其中:  $Z_j$  是加性高斯白噪声;  $H_{ij}$  是对角矩阵. 由此看出经过 OFDM 调制后的信号  $X$  是复数信号. 第  $j$  根天线的第  $m$  子载波 ( $0 \leq m \leq N - 1$ ) 的接收信号为

$X_j(k + m) = \sum_{i=1}^{M_T} H_{ij}(m)S_i(k + m) + Z_j(k + m)$ . (6)

由于  $j$  满足  $1 \leq j \leq M_R$ , 故

$X(m) = H(m)S(m) + Z(m)$ . (7)

其中:  $X$  是 MIMO - OFDM 系统的输出信号;  $H$  是信道矩阵;  $S$  是源信号;  $Z$  是噪声信号.

1.2 复数 ICA 模型

ICA 是一种应用比较广泛的盲源分离方法<sup>[11]</sup>, 对复数信号进行分离时, 复数 ICA 模型与实数 ICA 模型大体相同, 即

$x = As + N$ . (8)

其中:  $s$  是源信号;  $x$  是混合观测信号;  $A$  是随机混合矩阵;  $N$  为加性高斯白噪声. 复数 ICA 的最终目的是寻找一个分离矩阵  $W$ , 使得

$y = W^Hx$ , (9)

能尽可能地还原源信号  $s$ .

比较式 (7) 和式 (8), 可以发现这两种模型的形式是一样的, 所以 MIMO - OFDM 系统的输出信号在每个子载波上满足 ICA 模型, 故复数 ICA 算法可以应用到 MIMO - OFDM 盲多用户检测系统中.

2 复数 FastICA 算法

复数 FastICA 算法又称固定点迭代算法, 是一种收敛速度快、精度高的复数 ICA 算法. 该算法利用牛顿迭代法对观测数据  $x$  的大批量采样点进行批处理, 每次从观测信号中分离出一个独立分量. 为简化算法的计算, 需要对数据  $x$  进行预处理, 得到去均值和白化后的数据  $z$ .

常用的复数 FastICA 算法的目标函数为

$$J(y) \propto \{E[G(y)] - E[G(v)]\}^2. \quad (10)$$

其中:  $v$  是标准化高斯变量;  $G(y) = \lg(a + y)$ ,  $a = 0.2$ .

设源信号  $s = s_r + jx_i$  为零均值、单位方差的白化信号, 且其实部和虚部互不相关, 则  $E(ss^H) = I$ , 其中  $s^H$  为  $s$  的共轭转置. 设混合信号及分离矩阵均为复数形式:  $x = x_r + jx_i$ ,  $W = W_r + jW_i$ . 由于  $s$  为白化数据, 因此可得  $E(xx^H) = I$ .

根据 Kuhn - Tucker 条件, 在  $E[(W^H x)^2] = \|W\|^2 = 1$  的约束下, 最大化代价函数  $E(G(|W^H x|^2))$  可由下式的一阶导数的解得到:

$$\nabla E(G(|W^H x|^2)) - \beta \nabla E(|W^H x|^2) = 0. \quad (11)$$

其中:  $\beta$  是拉格朗日乘子为恒定值; 代价函数式中的非线性函数取为  $G(y) = \lg(a + y)$ , 其中  $a = 0.2$ . 采用牛顿迭代算法对代价函数进行优化, 得到分离向量的迭代公式:

$$W_{k+1} = W_k - \nabla J(W_k) / \nabla^2 J(W_k). \quad (12)$$

其中:  $k$  为迭代次数;  $\nabla$  为  $W$  的一阶导数;  $\nabla^2$  为  $W$  的二阶导数. 算法中代价函数的求导采用实部和虚部分开处理的方法, 最终得到复数 FastICA 算法的迭代公式如下:

$$W^+ = E(x(W^H x)^* g(|W^H x|^2)) - E(g(|W^H x|^2) + |W^H x|^2 g'(|W^H x|^2)) W. \quad (13)$$

为了避免输出向量幅值的不确定性, 对每一步迭代得到的  $W$  均做归一化处理:

$$W^+ = W^+ / \|W^+\|. \quad (14)$$

复数 FastICA 算法具体步骤如下:

- 1) 对观测数据进行预处理, 选取  $G$  函数;
- 2) 任取随机复矩阵  $W$ , 设置迭代次数为 1 000;
- 3) 根据式 (13) 计算矩阵  $W$ ;
- 4) 进行正交化:  $W = (WW^H)^{-1/2} W$ ;
- 5) 根据式 (14) 进行归一化处理;
- 6) 判断  $W$  是否收敛, 如果  $W$  未收敛, 则转至第 3) 步, 继续更新  $W$ ; 否则跳至下一步;
- 7) 利用迭代之后得到的分离矩阵  $W$  求出分离后的信号:  $Y = W^H Z$ .  $Z$  是预处理后的信号.

### 3 盲多用户检测

接收端接收到的信号经过 DFT 变换后可以看成是  $M_T$  个用户分别在  $N$  个子载波上的混合信号, 故需要在  $N$  个子载波上进行  $N$  次复数 FastICA 分离. 对比式 (7) 和式 (8) 可知:  $X$  为观测信号,  $S$  为源信号,  $H$  为混合矩阵,  $Z$  为噪声, 而复数 FastICA 算法中得到的  $Y$  即为对

MIMO - OFDM 系统的多个用户信号 (即源信号  $S$ ) 的估计信号. 然而复数 ICA 算法本身会给分离信号带来置换不确定性和尺度不确定性, 这会严重影响源信号的恢复, 所以需要对每次分离得到的估计信号进行幅度、相位和顺序的修正, 从而得到各个用户的信息, 完成对多用户的盲检测.

下面对上述不确定性问题进行处理.

假设在接收端已知  $1 \leq i \leq M_T$ , 设  $S_i(k)$  的自相关函数  $R_{S_i}(0)$  不为零,  $i$  用户在  $p$  频点的复数 FastICA 输出  $\tilde{Y}_{ip}$  和  $l$  用户在  $q$  频点的输出  $\tilde{Y}_{lq}$  分别为

$$A_p e^{j\theta_{ip}} [S_i(k+p), S_i(k+p+N), S_i(k+p+2N), \dots], \quad (15)$$

$$A_q e^{j\theta_{lq}} [S_l(k+q), S_l(k+q+N), S_l(k+q+2N), \dots]. \quad (16)$$

其中:  $A_p, A_q$  为未知振幅尺度;  $e^{j\theta_{ip}}, e^{j\theta_{lq}}$  为未知相位偏离. 频点  $p$  处复数 FastICA 输出的 2 个信号的自相关函数为

$$\varphi_{ip}^{ip} = E[\tilde{Y}_{ip} \tilde{Y}_{ip}^H] = E(|\tilde{Y}_{ip}|^2) = A_p^2 R_{S_i}(0), \quad (17)$$

所以,  $\tilde{Y}_{ip}$  振幅修正为  $Y_{ip} = \tilde{Y}_{ip} / A_p = \sqrt{R_{S_i}(0) / \varphi_{ip}^{ip}} \tilde{Y}_{ip}$ . 同理,  $q$  点的振幅修正为  $Y_{lq} = \tilde{Y}_{lq} / A_q = \sqrt{R_{S_l}(0) / \varphi_{lq}^{lq}} \tilde{Y}_{lq}$ .

通过来自同一源信号的 2 个信号的互相关函数可以同时处理顺序和相位偏离.  $Y_{ip}$  和  $Y_{lq}$  的互相关函数:

$$\varphi_{lq}^{ip} = E[Y_{ip} Y_{lq}^H]. \quad (18)$$

由于不同用户信号是独立的, 所以可以得出:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{lq}^{ip} &= 0, & i &\neq l; \\ \varphi_{lq}^{ip} &= R_{S_i}(p, q) e^{j(\theta_{ip} - \theta_{lq})} \neq 0, & i &= l, q = p + 1. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

在仿真过程中, 通过比较在频点  $q$  经过复数 FastICA 分离出的两个信号分别与频点  $p$  分离的已调整完顺序的两个信号的相关系数的大小来判断两个信号是否相关, 相关系数大的两个信号是来自于同一源信号.

从第 2 个频点到第  $N$  个频点执行此操作, 可以依次消除各频点的置换不确定性. 但此时只能找出属于同一用户的信号, 用户不确定性仍然存在, 所以在 DQPSK 解调以后仍需要对信号进行整体排序.

最后还要对每个频点上已经排好顺序的信号进行相位补偿操作, 从式 (19) 可以看出, 即使  $i = l$ , 在每次分离后也都会产生不同的相位偏移  $e^{j\theta_{ip}}$  和  $e^{j\theta_{lq}}$ , 严重影响信号的恢复. 由于已知  $R_{S_i}(p, q)$ , 式 (19) 中, 对于相邻频点同一用户相位偏移

的不一致,可以通过  $\varphi_{lq}^{ip}Y_{iq}/R_{S_i}(p,q)$  将  $q$  点的相位调整到与  $p$  点相位相同. 这样从第 2 个频点到第  $N$  个频点执行此操作,就可以修正  $q$  点的相位偏离,使信号得以恢复.

经过幅度、相位和顺序修正得到的信号即为输入端各个用户的估计信号.

4 实验仿真

对 MIMO - OFDM 系统的盲多用户检测进行仿真实验,系统参数设置为:子载波个数 64,CP 长度 8,IFFT/FFT 变换数 64,采用 DQPSK 调制方式,线性编码系数  $a=0.6$ . 仿真中,每个用户使用 200 个 OFDM 符号块,且独占 1 个发送天线,假定是理想同步的,无信道编码,加入的噪声为加性高斯白噪声.

为了评价多用户检测算法性能的优劣,通常定义误码率为进行多用户检测得到用户信号估计后,所有估计错误的信号比特数在总的用户信号比特数所占的比重. 误码率越低,说明所使用的多用户算法的分离性能越好. 本文采用误码率来衡量多用户检测效果,将改进的复数 FastICA 算法 (CFastICA) 与传统的复数自然梯度法 (CNGLA)<sup>[5]</sup> 在 MATLAB 编程环境下进行仿真实验对比.

1) 分别采用两种算法对同一接收信号进行分离,观察误码率随信噪比增加时的变化情况. 仿真结果如图 2 所示.

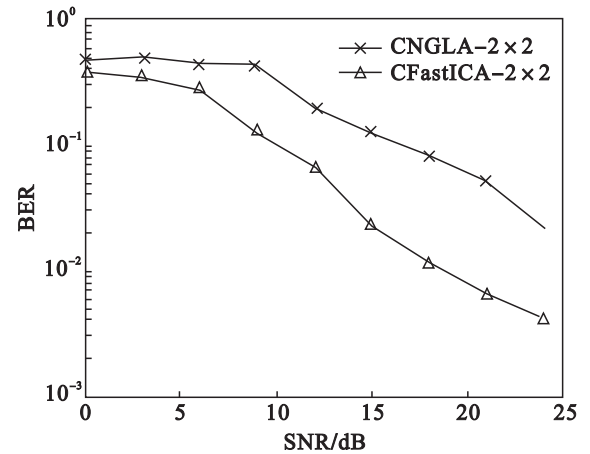


图 2 两种算法的误码率随信噪比变化曲线  
Fig. 2 Two algorithms BER curves with SNR

从图 2 可以看出:相同信噪比情况下,改进的 CFastICA 算法误码率更低. 因此改进的 CFastICA 算法与 CNGLA 算法相比具有更好的分离效果.

2) 采用复数 FastICA 算法,2 根发送天线发送信号. 观察接收天线数量分别为 2,4 的情况下误码率随信噪比增加时的变化情况,仿真结果如图 3 所示.

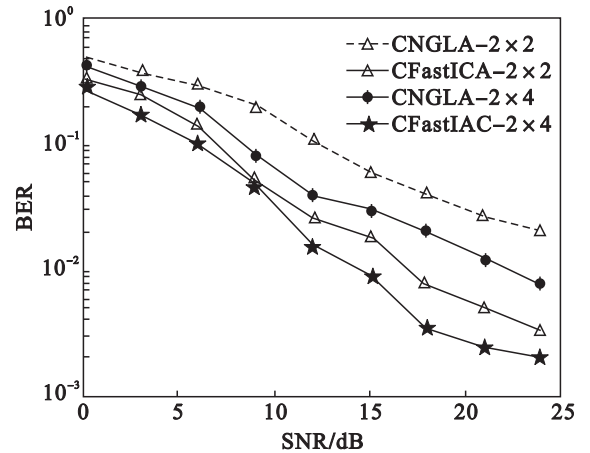


图 3 2,4 根接收天线时误码率随信噪比变化曲线  
Fig. 3 BER curves with SNR of 2 and 4 receiving antennas

从图 3 可以看出:当信噪比较低时,4 根接收天线比 2 根接收天线的误码率要低,但相差不大. 在信噪比大于 15 时,4 根接收天线时的误码率降低的比较大,分离效果改进相对明显. 这也可以说明随着接收天线数量增多,信号的分离效果会更好.

对 CNGLA 算法和改进的 CFastICA 算法进行 10 次混合信号的分离实验. 通过比较平均运行时间来判断两种方法的收敛速度. 运行时间如表 1 所示. 由表 1 可以看出,改进的 CFastICA 算法的运行时间明显少于 CNGLA 算法,具有更快的收敛速度.

表 1 运行时间比较		
Table 1 Comparison of running time		
序号	$t(\text{CNGLA})/\text{s}$	$t(\text{CFastICA})/\text{s}$
1	1.284 4	0.308 5
2	0.138 8	0.111 8
3	0.791 0	0.234 4
4	0.251 1	0.135 4
5	0.373 4	0.296 9
6	0.384 3	0.200 8
7	0.293 9	0.183 9
8	0.453 4	0.258 4
9	0.271 3	0.124 8
10	0.414 0	0.258 9