

波束空时分组编码的 ICA 盲检测方案

谷波^{①②} 刘琚^① 许宏吉^①

^①(山东大学信息科学与工程学院 济南 250100)

^②(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘要: 理论研究已经证明, 结合波束形成和空时分组编码的混合系统与传统的单纯使用波束发射或空时编码的方案相比具有很大的性能提高; 传统的译码方案是借助接收端的信道估计来实现的, 它需要知道准确的信道状态信息(CSI)。但如果信道估计不易实现, 则系统性能将受很大影响。独立分量分析(ICA)作为一种经典的盲信号分离技术可以在不进行信道估计的情况下对发射信号实现有效检测。本文针对接收端的信号结构提出了一种基于 ICA 的正交检测方案; 并通过仿真将新方案与传统方案进行了性能比较。仿真结果表明, 新方案具有较好的系统适应性和误码率特性。

关键词: 波束空时分组编码(BSTBC); 信道估计; 独立分量分析(ICA)

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0105-04

Blind Detection of Beam Space-Time Block Coding Based on ICA Scheme

Gu Bo^{①②} Liu Ju^① Xu Hong-ji^①

^①(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

^②(State Key Lab. of Mobile Communications, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Theoretical investigations have proven that the system combining beamforming with space-time block coding can improve the performance efficiently, compared to the conventional single beamforming or space-time block coding only schemes. The conventional decoding schemes, which need accurate Channel State Information (CSI), are usually based on channel estimation. When the CSI is hard to achieve in some cases, the system performance would be affected heavily. Independent component analysis (ICA), one classical blind signal separation technique, can be used to detect the transmitted signals without channel estimation. Aiming at signals structure at the receiver, this paper proposed an orthogonal detecting scheme based on ICA. Simulations were carried out to compare the performance of the new scheme with conventional schemes. Simulation results for Rayleigh fading channels demonstrated that the new scheme could enhance the flexibility of the communication system and achieve better Bit Error Rate (BER) performance.

Key words: Beam Space-Time Block Coding(BSTBC); Channel estimation; Independent Component Analysis (ICA)

1 引言

信息理论已经证明, 多天线策略可以有效改善链路稳定性并提高频谱效率, 它必将在未来的无线通信系统中发挥重要作用。近年来, 已出现了多种针对不同通信环境的多天线空时处理方案。其中, 由 Alamouti 提出的空时分组码(STBC)方案^[1], 以及基于波束形成的智能天线技术^[2]就是两种极具代表性的空时处理方法, 它们可以通过在基站使用多天线来分别获得发射分集和波束形成增益, 从而提高系统性能。

结合波束形成和空时分组编码的混合系统^[3]可以兼得两者的优点, 同时获得发射分集和波束形成增益, 从而大大提高链路质量。该混合系统定义为波束空时分组编码(BSTBC)系统。

对于 BSTBC 系统, 传统的接收端检测是通过信道估计方法^[4]得出复信道增益, 然后与发射波束权值作用后, 采用 Alamouti 最大似然译码方案来实现的。如果在某些特定情况下, 比如系统处于快速变化的环境中, 或者由于算法本身所带来的估计错误, 都会导致系统性能严重恶化。在大部分情况下, 实现信道估计需要在数据流中添加训练序列, 但这会导致频谱效率的损失。

近些年来, 独立分量分析(ICA)技术已经在通信领域引

2005-05-17 收到, 2005-11-07 改回

国家自然科学基金(60572105), 综合业务网国家重点实验室基金(ISN7-02)和移动通信国家重点实验室开放基金(A0403, A2005008)资助课题

起了特殊关注。即使没有任何信道状态信息, ICA 仍然可以从观测信号中将发射信号恢复出来。将 ICA 技术用于空时编码系统的信号检测^[5,6]已经开始了部分尝试, 并取得了一些成果。同样, 对于 BSTBC 系统也可以采用 ICA 分离技术, 本文中, 首先通过定义一个等价于 STBC 系统信道的有效信道, 然后证明有效信道的正交性, 并对应提出了一种基于 ICA 的正交分离方案。仿真实验表明, 通过与一些基于信道估计的检测方法进行比较, 本文提出的新方案在成功实现盲检测的同时, 也获得了较高的性能。

2 BSTBC 系统模型

在图 1 所示模型中, 假定发射天线阵列的阵元数为 M , 阵元间距大约为 $1/2$ 下行载波波长, 以保证阵元间的相关性, 多径数目为 L , 接收天线数目为 N (以下介绍以单接收天线为例), 空时编码选择二阶 Alamouti 方案。

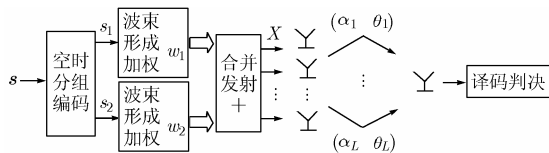


图1 BSTBC 系统模型

令 \mathbf{s} 为待发送的原始符号序列, 符号流中的每两个符号分为一组进行 Alamouti 编码, 然后分成两路输出; 令 $\mathbf{s}(k) = [s_1(k) \ s_2(k)]^T$ 表示所发射的第 k 组信号中的两个符号, 编码规则可以表示为

$$\mathbf{C}(k) = \sum_{n=1}^2 \mathbf{A}_n \mathbf{s}_n(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1(k) & \mathbf{c}_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1(k) & -s_2^*(k) \\ s_2(k) & s_1^*(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 \mathbf{C} 为编码后的输出矩阵, $\mathbf{c}_i (i=1,2)$ 代表原始符号流经编码器的第 i 路输出, \mathbf{A}_n 是与第 n 个符号 $s_n(k)$ 相对应的正交编码矩阵, 两分支信号被分别送入波束形成器并使用 \mathbf{w}_1 和 \mathbf{w}_2 进行加权, 加权矩阵 \mathbf{W} 可以表示为

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 & \mathbf{w}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{21} \\ w_{12} & w_{22} \\ \vdots & \vdots \\ w_{1M} & w_{2M} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 \mathbf{w}_1 和 \mathbf{w}_2 都是 $M \times 1$ 维向量, w_{ij} 是第 i 路编码输出和第 j 个发射天线之间的加权因子; 权值 \mathbf{W} 可以根据文献[7]所提出的方法由下行信道协方差矩阵(DCCM)获得。

发射信号 \mathbf{X} 可以表示为

$$\mathbf{X} = \mathbf{C}\mathbf{W}^H = \mathbf{c}_1 \mathbf{w}_1^H + \mathbf{c}_2 \mathbf{w}_2^H \quad (3)$$

无线信道表示为

$$\mathbf{h}_{\text{BF}} = \sum_{i=1}^L \alpha_i \cdot \mathbf{a}(\theta_i) \quad (4)$$

其中 α_i 表示第 i 条路径的复信道增益, $\mathbf{a}(\theta_i)$ 为对应于信号离开角(AOD)为 θ_i 时的 $M \times 1$ 维下行阵列导引矢量。

信号通过无线信道传输到达移动终端, 接收信号可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{W}^H \mathbf{h}_{\text{BF}} + \mathbf{v} \quad (5)$$

其中 \mathbf{v} 是具有零均值和 σ^2 方差的加性高斯白噪声。

为了在下一节中引出基于 ICA 的正交分离方案, 这里先定义一个等价于 STBC 系统信道的有效信道 $\mathbf{h}_{\text{effective}}$, 并表示为

$$\mathbf{h}_{\text{effective}} = \mathbf{W}^H \mathbf{h}_{\text{BF}} \quad (6)$$

由于 \mathbf{W}^H 为 $2 \times M$ 维矩阵, \mathbf{h}_{BF} 为 $M \times 1$ 维向量, 所以 $\mathbf{h}_{\text{effective}}$ 即为 2×1 维向量, 定义

$$\mathbf{h}_{\text{effective}} = \mathbf{W}^H \mathbf{h}_{\text{BF}} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 $h_i = \sum_{j=1}^M w_{ij} \cdot \mathbf{h}_{\text{BF}}(j)$, $i=1,2$ 。于是接收信号 $y_n(k)$ 可以写作

$$\begin{bmatrix} y_1(k) & y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ s_2(k) & s_1^*(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(k) & -s_2^*(k) \\ s_2(k) & s_1^*(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1(k) & v_2(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)又可以写作

$$\begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(k) \\ s_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1(k) \\ v_2(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

定义 $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix}$, 把式(9)写为矩阵形式:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{S} + \mathbf{V} \quad (10)$$

由 $\mathbf{H}^H \mathbf{H} = \rho \mathbf{I}$, 其中 $\rho = |h_1|^2 + |h_2|^2$, 可以获知, 矩阵 \mathbf{H} 是正交的, 这正是下面将要介绍的 ICA 正交检测方案设计中所使用的一个重要信息。

3 基于 ICA 的盲检测方案

3.1 ICA 系统模型

独立分量分析(ICA)是盲信号分离技术中的一种信号处理和数据分析方法, 它可以利用源信号的随机独立性而仅通过观测信号恢复出发射信号。其线性混叠模型为

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{v} \quad (11)$$

其中 \mathbf{A} 为混叠矩阵, \mathbf{v} 为噪声向量。

对于接收的混叠信号 \mathbf{y} , 只需通过估计一个分离矩阵 \mathbf{B} , 然后作用于 \mathbf{y} , 即可得出源信号 \mathbf{s} 的估计值, 其分离模型表示为

$$\mathbf{z} = \mathbf{B}\mathbf{y} = \hat{\mathbf{s}} \quad (12)$$

将式(10)和式(11)进行比较, 可以看出二者的系统模型是相似的, 因此可以考虑将 ICA 技术应用于 BSTBC 系统的接收信号检测, 而且应用 ICA 技术可以避免信道估计, 这在某些信道估计不易实现的情况下是非常有意义的。

对于 ICA 问题, 最关键的一步就是分离矩阵 \mathbf{B} 的估计, 在这里提出一种新的正交分离方案, 首先证明在 BSTBC 系

统下应用 ICA, 其分离矩阵 \mathbf{B} 是正交的:

$$\mathbf{z} = \mathbf{B}\mathbf{y} = \mathbf{B}\mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{B}\mathbf{V} = \mathbf{G}\mathbf{s} + \tilde{\mathbf{v}} \quad (13)$$

如果我们想把分离信号 \mathbf{z} 作为源信号 \mathbf{s} 的估计, 则矩阵 \mathbf{G} 应满足:

$$\mathbf{G}^H\mathbf{G} = \mathbf{B}^H\mathbf{H}^H\mathbf{H}\mathbf{B} = \rho\mathbf{B}^H\mathbf{B} = \mathbf{I} \quad (14)$$

于是得出结论:

$$\mathbf{B}^H\mathbf{B} = \frac{1}{\rho}\mathbf{I} \quad (15)$$

即矩阵 \mathbf{B} 是正交阵。

3.2 正交检测新方案

新方案是从矩阵结构设计角度提出的, 令分离矩阵 \mathbf{B} 为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 & \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中 $\mathbf{B}_2 = \mathbf{J}\mathbf{B}_1^*$, $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$ 。于是 $\mathbf{B}^H\mathbf{B} = \alpha\mathbf{I}$, 其中

$\alpha = \|\mathbf{B}_1\|^2$, 由式(15)可知 $\alpha = 1/\rho$, 则分离信号 \mathbf{z} 即为

$$\mathbf{z}_1(k) = \mathbf{B}_1(k)\mathbf{y}(k) \quad (17)$$

$$\mathbf{z}_2(k) = \mathbf{B}_2(k)\mathbf{y}(k) \quad (18)$$

分离矩阵的训练公式为

$$\mathbf{B}'_1(k+1) = \mathbf{B}_1(k) - \mu\nabla_{\mathbf{B}_1} J_{\text{CMA}}(k) \quad (19)$$

其中 μ 是训练步长, 代价函数:

$$J_{\text{CMA}} = \sum_{i=1}^2 E \left[|z_i|^2 - 1 \right]^2 + \frac{1}{\rho} \sum_{i,j=1}^2 \left| E(z_i z_j^*) \right|^2 \quad (20)$$

是恒模量代价函数^[8], ρ 可以通过下式进行估计。

$$\hat{\rho}(k+1) = (1-\lambda)\rho(k) + \lambda \frac{\mathbf{y}^T(k)\mathbf{y}(k)}{\sigma_s^2} \quad (21)$$

其中 $\lambda \in [0,1]$ 是遗忘因子。为了保证 $\alpha = 1/\rho$, 对 \mathbf{B}_1 进行归一化:

$$\mathbf{B}_1(k+1) = \frac{1}{\sqrt{\hat{\rho}}} \frac{\mathbf{B}'_1(k+1)}{\|\mathbf{B}'_1(k+1)\|} \quad (22)$$

于是

$$\mathbf{B}_2(k+1) = \mathbf{J}\mathbf{B}_1^*(k+1) \quad (23)$$

当估计出分离矩阵 \mathbf{B} 以后, 应用式(12)我们可以恢复出源信号 \mathbf{s} 。

3.3 预处理步骤及噪声影响分析

在利用分离矩阵 \mathbf{B} 进行信号分离之前, 还有一个重要的预处理步骤, 即对接收数据向量的预白化, 以去除其分量的二阶相关性, 通过对接收混叠信号的协方差矩阵 $\mathbf{R}_y = E[\mathbf{y}\mathbf{y}^T]$ 做特征值分解(EVD), 表示为 $\mathbf{R}_y = \mathbf{E}\mathbf{D}\mathbf{E}^T$, 其中 \mathbf{E} 为 $m \times m$ 维特征矢量矩阵, \mathbf{D} 为 $m \times m$ 维特征值矩阵。通过考虑有用信号和噪声分量对协方差矩阵的不同影响, \mathbf{R}_y 可以进一步分解为 $\mathbf{R}_y = \mathbf{E}_s\mathbf{D}_s\mathbf{E}_s^T + \mathbf{E}_v\mathbf{D}_v\mathbf{E}_v^T$, 其中 $\mathbf{D}_s = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ 为 $n \times n$ 维对角矩阵, 它包含有 \mathbf{R}_y 的 n 个最大的特征值, 由其所对应的特征向量张成的子空间

为信号子空间; 矩阵 $\mathbf{D}_v = \text{diag}(\lambda_{n+1}, \dots, \lambda_m)$ 是包含剩余噪声特征值的对角阵, 由其对应的特征向量张成的子空间为噪声子空间。

信号子空间的特征值一般呈现明显的特征, 它是源信号功率和噪声功率的线性合并, 在信噪比(SNR)足够高的情况下, \mathbf{R}_y 的 n 个最大的特征值要远大于剩余的 $m-n$ 个特征值。则通过预白化只取有用的信号子空间来分离信号, 即可减弱噪声的影响, 但是在低 SNR 情况下, 这种特征将变得不明显, 或者说有用信号会淹没在噪声子空间里, 从而给信号的分离带来一定困难, 即所谓的检测失败。

4 仿真结果

这一部分我们主要通过仿真比较该文所提出的新的检测方案的性能与传统的基于信道估计方案的性能。在仿真中假定信道为准静态平瑞利衰落信道, 调制方式为 BPSK。假定发射天线阵列阵元数为 4, 多径数目为 2, 接收天线数目分别考虑 1 和 2 的情况。

图 2 为在信噪比为 10dB, BPSK 调制, 单接收天线条件下, 新方案对接收信号的分离效果图。各子图分别表示两路接收信号与相对应的分离信号在数据长度为 300 情况下形象化的星座图。从图中可以看出, 新方案对接收信号可以实现较好的分离。

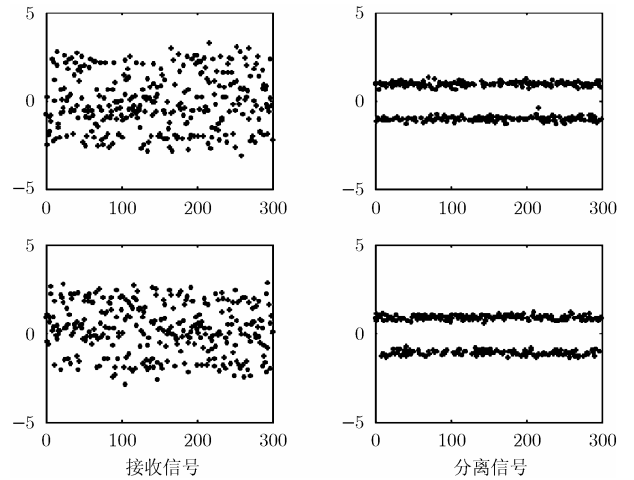


图 2 新方案下接收与分离后信号的比较(BPSK 调制)

图 3 为当接收天线数目为 1 时的新方案与基于信道估计方案的性能比较, 其中假定信道状态信息完全已知的 Alamouti 性能曲线被用来作为参考, 从仿真结果来看, 基于 ICA 的新方案性能优于基于信道估计的 semiblind 以及 trained 算法。另一方面, 对于 ICA 方案, 存在着检测失败的情况, 尤其是信噪比值较低的情况下, 当这种情况发生时, 就需要重新发送所需数据, 图 4 即为单接收天线, 发送数据长度为 600bit, 保持成功检测次数为 5000 次的情况下的失败次数仿真曲线。

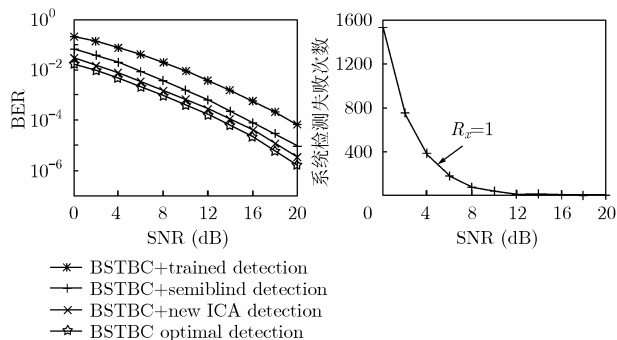


图 3 单接收天线情况下新方案与基于信道估计方案性能比较

为了进一步改善系统接收以及分离效果,可以在接收端使用多天线,图 5 即为两接收天线下的新方案与基于信道估计方案的性能比较,可以看出,使用双天线接收后,系统分离效果均有很大改善,同样,ICA 方案性能略优于信道估计方案;图 6 为双接收天线下 ICA 方案的仿真失败次数曲线,发送数据长度为 600bit,保持成功检测次数为 5000 次,通过与单接收天线情况比较可知,系统检测失败次数大大降低了。

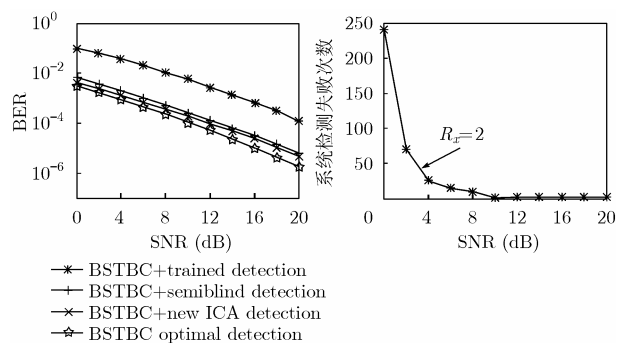


图 5 双接收天线情况下新方案与基于信道估计方案性能比较

5 结束语

本文针对 BSTBC 系统的实际特点,通过定义并证明有效信道及 ICA 分离矩阵的正交性,提出了一种基于 ICA 的正交盲检测方法,它可被用来检测 BSTBC 系统的发射信号。ICA 技术的最大优势在于它不需要估计信道信息,因此,它不需要发送很长的训练序列,而只需非常短的签名序列以便确定发射序列的符号顺序,从而提高了频谱效率和数据发射速率。

仿真结果表明,与基于信道估计的方案相比,新方案取得了较好的性能。但是方案所面临的最大的挑战是当发射天线数目多于接收天线数目,即观测信号数目多于源信号数目时,由于 ICA 算法自身的局限性,系统性能会受较大影响。因此,如何将该方案推广到多天线系统是以后的研究内容。

在 ICA 方案中,系统还存在着检测失败的情况,当这种情况发生时,就需要重传所需数据,因此有必要结合一种有效的重传机制。另外尽量减少计算分离矩阵所需要的数据组长度,提高它的自适应能力,以便能更好地工作于快速时变信道将是下一步的研究重点。

参考文献

- [1] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique, for wireless communications [J]. *IEEE Journal on Sel. Areas in Comm.*, 1998, 16(8): 1451-1458.
- [2] Friedlander B and Scherzer S. Beamforming versus transmit diversity in the downlink of a cellular communications system [J]. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2004, 53(4): 1023-1034.
- [3] Lei Z, Chin F P S, and Liang Y C. Combined beamforming with space-time block coding for wireless downlink transmission [J]. Proc. Vehicular Technology Con, VTC 2002-Fall, Vancouver, BC, Canada, 2002, Vol. 4: 24-28.
- [4] Stoica P and Ganesan G. Space-time block codes: Trained, blind and semi-blind detection [J]. in Proc. of IEEE ICASSP2002, 2002: 1609-1612.
- [5] Xu H J, Liu J, and Hu H B. Blind detection based space-time block coding with antenna subset selection [J]. in Proc. the Seventh International Conference on Signal Processing (ICSP04), Beijing, China, Aug.31-Sept.4, 2004, vol.2: 1731-1734.
- [6] Liu J, Iserte A P, and Lagunas M A. Blind separation of OSTBC signals using ICA neural networks [J]. *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*, Darmstadt, Germany, Dec.14-17, 2003.
- [7] Lei Z, Chin F P S, and Liang Y-C. Space-time block coding for switched beam systems [J]. In Proc. Wireless Communications and Networking, 2003 (WCNC'03), New Orleans, LA, 2003: 699-704.
- [8] Rinas J and Kammeyer K D. Comparison of blind source separation methods based on iterative algorithms [J]. 5th International ITG Conference on Source and Channel Coding(SCC04), Erlangen, Germany, January 14-16, 2004.

谷波: 男, 1981 年生, 硕士生, 研究方向为空时信号处理、智能天线、盲信号处理等。

刘 璐: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 通信工程系主任, 山东大学-美国德州仪器(TI)公司数字信号处理实验室主任, 主要研究方向为通信信号处理、盲信号处理、多媒体通信等。

许宏吉: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、智能天线、盲信号处理等。