

级联 LDPC 编码的协作 MIMO 系统研究

刘玉广¹, 罗宁², 马林华¹, 杨雪³, 胡小响⁴

(1.空军工程大学航空航天工程学院,陕西西安,710038;

2.中国电子科技集团公司第十研究所,四川成都,610036;

3.空军驻北京地区军事代表局,北京,100009;4.94916部队,江苏南京,210022)

摘要 为满足无线传感器网络应用 MIMO 技术的需求,构建了基于分簇的协作 MIMO 系统,并对传输过程进行了分析。针对系统受发射端簇首节点与协作节点之间信道质量影响较大,存在误码传播的问题,设计了级联 LDPC 编码的协作 MIMO 系统,详细分析了接收端 LDPC 分层译码算法的实现过程。仿真了簇首节点与协作节点之间相同信噪比情况下不同天线数目的误码性能,簇首节点与协作节点之间不同信噪比情况下相同天线数目的系统性能和 2 发 1 收、2 发 2 收级联 LDPC 编码的协作 MIMO 系统性能,可以推广到多发多收系统。仿真表明:级联 LDPC 编码的协作 MIMO 系统可以有效地解决协作 MIMO 系统误码传播的问题,显著的提高协作 MIMO 系统的性能。并且仿真中接收端采用的 LDPC 分层译码算法,在相同仿真条件下,与传统的 BP 译码算法相比,收敛速度更快,纠错性能更好。

关键词 协作 MIMO;LDPC 编码;分层译码

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.03.018

中图分类号 TN925 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)03-0078-05

The Research of Cooperative MIMO System Concatenated LDPC Coding

LIU Yu-guang¹, LUO Ning², MA Lin-hua¹, YANG Xue³, HU Xiao-xiang⁴

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. The 10th Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China; 3. Air Force Military Representative Office in Beijing Region, Beijing 100009, China, 4. Unit of 94916, Nanjing 210022, China)

Abstract: To meet the needs of wireless sensor network with MIMO technology, the cooperative MIMO system is built based on cluster and the transmission process is analyzed. To resolve the problem of error propagation caused by the transmission between the head node and the cooperative node in the same cluster, the cooperative MIMO system concatenated LDPC coding is designed and the realization process of layered decoding algorithm is analyzed in detail. The error performance under the same signal-to-noise ratio with different antenna number and the error performance of the different signal-to-noise ratio with same antenna number between the cluster head node and cooperative nodes are simulated. Besides, the performances of the cooperative MIMO system concatenated LDPC coding with two transmitters and one receiver, and with two transmitters and two receivers are simulated, which can be extended to system with multiple transmitters and multiple receivers. The simulation results show that the cascaded LDPC coding coopera-

收稿日期 :2012-11-19

基金项目 :陕西省电子信息综合系统集成重点实验室基金资助项目(201102Y02;2011ZD01)

基金项目 :刘玉广(1988-),男,山东潍坊人,硕士生,主要从事 LDPC 编码,协作 MIMO 系统研究.

E-mail:liuyuguang1988@126.com

tive MIMO system can effectively solve the problem of error propagation in cooperative MIMO system. Meanwhile the LDPC layered decoding algorithm is used at the receiving end, compared with conventional BP decoding, in the same simulation conditions, convergence is faster and error correction performance is better.

Key words: cooperative MIMO; LDPC code; layered decoding

无线传感器网络具有密集型、随机分布的特点,使其非常适合用于恶劣的战场环境中。无线传感器网络的一种典型应用模式是传感器节点监测环境状态的变化或事件的发生,将发生的事件或变化的状态报告给管理中心(接收端),采用的是多个传感器节点向管理中心通信的模式。这种通信模式需要传输的数据量很大,传统的通信方式需要消耗大量的能量,而传感器网络的一个重要特征是能量受限。因此,需要寻找一种提高系统能量效率,降低系统能耗的通信方式。

多输入多输出(MIMO)技术是利用空间分集增益,提高信道质量和频谱利用率的有效方法。然而,由于传感器节点体积、功耗等限制,不便于在单个节点上配置多根天线,考虑在每个节点上配置一根天线。管理中心由于能量相对不受限,配置的天线数量不受限制。利用单天线的传感器节点相互协作,形成虚拟多天发射阵列,结合接收端管理中心多天接收,形成协作 MIMO 系统,可以有效的提高 MIMO 系统的分集增益,提高传输质量,进而降低传感器节点能量的消耗。

MIMO 系统中的空时分组码(STBC)具有高分集增益和较简单的编译码方法,成为研究和应用最广泛的空时编码。文献[1]给出了协作 MIMO 系统采用分布式 STBC 的性能分析。在文献[2]中,协作 MIMO 的发射端节点之间的信道质量对整个系统的性能存在影响,针对的只是单伙伴、双伙伴的协同分集情况。

LDPC 编码是基于校验矩阵构造的一类线性分组码,具有非常优异的纠错能力,可以改善恶劣环境下的传输质量^[3]。因此提出了一种级联 LDPC 编码的协作 MIMO 系统,可以抑制发射端信道优劣对系统性能的影响,解决误码传播的问题,有效降低误码率。

1 系统模型

本文讨论的是单跳无线传感器网络。传输系统模型^[4]见图 1。每个传感器是一个数据采集节点。所有的数据采集节点按照文献[5]提出的分簇算法形成几个虚拟簇,选择相应的节点组成协作多天线

阵列,每个簇内都按照文献[6]提出的簇首选择算法选择簇首节点。

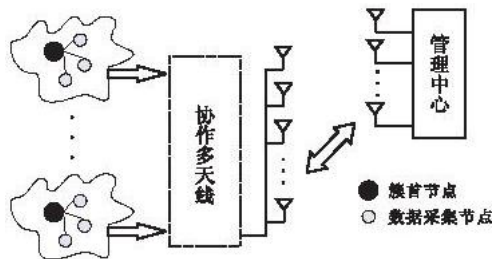


图 1 系统模型图

Fig. 1 System model map

每个数据采集节点采用时分多址(TDMA)方式向簇首节点广播数据和信息,簇首节点接收完一轮信息后进行数据融合,然后向选定的协作节点广播数据和信息,协作节点接收完信息后,与簇首节点共同进行分布式空时编码^[7],向管理中心发送信息。管理中心采用最大比合并(MRC)准则和极大似然(ML)判决算法对接收到的信息进行处理。

2 过程描述

文献[8]给出了 LDPC 编码与空时编码相结合的编码协作方法,考虑的是协同条件下 2 个单天线终端发送不同信息情况下的性能,没有考虑协作终端之间信息存在误码的问题。本文给出的级联 LDPC 编码的协作 MIMO 系统,考虑簇首节点向协作节点发送信息过程中存在误码的情况。

2.1 发射端

图 2 给出的是级联 LDPC 后发射端协作传输过程。如图 2 中,簇首节点进行信息传输前,先进行 LDPC 编码,经过调制发射到协作节点。然后,簇首节点向协作节点发送数据的过程中,由于簇首节点与协作节点之间经历的信道不同,产生的误码不同,传输到协作节点的信息发生了改变。协作节点接收到信号后解码,然后选择相应的码字按照一定的规则进行空时编码,本文采用的空时编码方式是 STBC 编码。

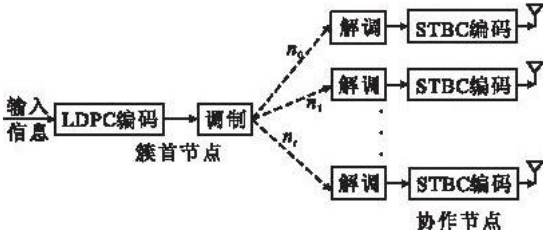


图2 发射端协作过程

Fig. 2 The cooperative process of transmitter

2.2 管理中心

管理中心配置多根天线,接收到协作节点发送来的信息后,先进行 STBC 译码,经过解调处理后,再进行 LDPC 译码处理。管理中心接收处理过程见图 3。与普通的空时编码系统的译码算法不同的是,合并得到的判决消息并不是直接用来对比特进行硬判决,而是根据这些判决消息信息求出对应码字比特的初始信息,来进行 LDPC 迭代译码。

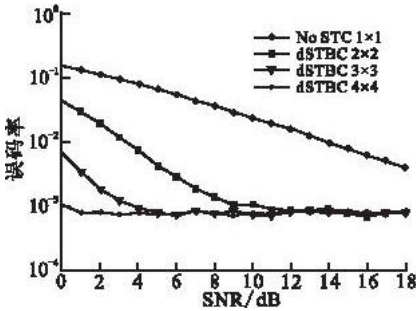


图3 管理中心(接收端)接收处理过程

Fig. 3 The receiving and processing process of managing center(receiver)

2.3 LDPC 分层算法

LDPC 译码通常采用的是 BP (Belief Propagation) 算法和带偏移量的最小和算法^[9]。它们每次迭代过程中更新的变量消息直到下次迭代才能被传出去。而分层译码算法能在一次迭代过程中将更新的变量消息立即被传递,改进了消息的收敛特性,能有效地提高译码收敛速度。因此本文 LDPC 译码采用分层译码算法^[10]。

分层译码的具体步骤为:

1) 译码初始化。

将校验节点划分为常层,每次记作 $L_k, k \in [1, K]$, 则有 $\cup_{k=1}^K L_k = \mathbf{H}$, \mathbf{H} 为 LDPC 码校验矩阵,且对于所有的 $m \neq n$, 有 $L_m \cap L_n = \emptyset$;

每个变量节点 $Q_j (1 \leq j \leq n)$ 的对数似然比 (Log Likelihood Ratio, LLR) 被初始化为经信道后接收的信息的对数似然比,即初始消息 $L(Q_j^{(0)})$:

$$L(Q_j^{(0)}) = \log \frac{Pr[v_i=0|r]}{Pr[v_i=1|r]} \quad (1)$$

所有层的节点的校验消息 $L(R_{i,j}^{(l,\xi)})$ 初始化为

$0, \xi=1, 2, \dots, K$;

迭代次数初始化 $l=1$, 层数初始化 $k=1$;

2) 校验节点更新。

对于每个校验节点 $c_j \in L_\xi$, 计算其传递给与其相连的变量节点 $v_i \in N_{c_j}$ 的信息:

$$L(R_{i,j}^{(l,\xi)}) = \left(\prod_{j' \in N_{c_j} \setminus \{j\}} \text{sign}(L(Q_{j'}^{(l-1)}) - L(R_{i,j'}^{(l-1,\xi)})) \right) \min_{j' \in N_{c_j} \setminus \{j\}} |L(Q_{j'}^{(l-1)}) - L(R_{i,j'}^{(l-1,\xi)})| \quad (2)$$

3) 判决消息更新。

$$L(Q_j^{(l)}) = L(Q_j^{(l-1)}) + \sum_{i \in N_{c_j}} (L(R_{i,j}^{(l,\xi)}) - L(R_{i,j}^{(l-1,\xi)})) \quad (3)$$

4) 硬判决及校验检测。

① 对 $Q_j^{(l)}$ 进行硬判决:

$$r_j = \begin{cases} 1 & , L(Q_j) \leq 0 \\ 0 & , L(Q_j) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

得到 $\mathbf{r}_n = (\bar{r}_1, \bar{r}_2, \dots, \bar{r}_n)$ 。

② 如果 $\mathbf{H} \cdot \mathbf{r}_n^T = 0$ 则停止迭代, 输出 $\mathbf{r}_n = (\bar{r}_1, \bar{r}_2, \dots, \bar{r}_n)$ 为译完码字, 若不满足则进行下一次迭代, 直到满足校验关系或者达到最大迭代次数, 停止译码迭代, 跳出循环。

在这种译码算法下, 各节点能够很快获得最新的更新消息, 加快了译码收敛速度。

经过 LDPC 译码处理后, 获得数据采集节点发送来的信息。

3 仿真结果

仿真基于 MATLAB 平台, 簇首节点与协作节点之间的信道为高斯信道, 协作 MIMO 系统传输过程采用的是平坦瑞利衰落信道。传输过程中采用的是加性高斯白噪声, BPSK 调制。SNR=7 dB 时, 误码率为 7×10^{-4} 左右。采用的 LDPC 码的度分布序列为:

$$\lambda(x) = 0.276\ 074x + 0.302\ 585x^2 + 0.421\ 341x^8 \quad (5)$$

$$\rho(x) = x^6$$

码长为 2 048, 码率为 $\frac{1}{2}$ 。簇首节点与协作节点

之间的信道质量以信噪比 (SNR) 来衡量。

图 4 为不同天线数目下协作 MIMO 的性能对比曲线。从图中可以看出, 在误码率未降到 7×10^{-4} 时, 随着天线数目的增加, 误码率随着信噪比的增加而迅速下降, 这是由于获得了分集增益。但是信噪比继续增加, 误码率随着信噪比的增加而变化

不大,图 4 中,对于 2 发 2 收协作 MIMO 系统仿真曲线可以看出,当信噪比未达到 10 dB 时,误码率随着信噪比的增加而迅速下降,当信噪比大于 10 dB 时,误码率随着信噪比的增加而变化不大,可见出现错误平层。并且随着天线数目的增加,出现错误平层时的信噪比也减小。可以推断出簇首节点与协作节点之间的信道质量对整个系统性能的影响很大。

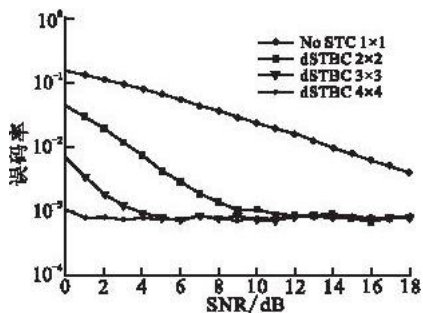


图 4 SNR=7 时不同天线数目协作 MIMO 系统性能比较

Fig. 4 Performance comparison of cooperative MIMO system with different antenna under SNR=7

图 5 给出的是 2 发 2 收协作 MIMO 系统在簇首节点与协作节点之间不同信噪比情况下的仿真曲线。从图中可以看出,在簇首节点与协作节点之间的信噪比较小时,协作节点接收到簇首节点发来的信息的误码率较高,造成协同信号正交性受到破坏,因此管理中心接收到信息的误码率也比较高。随着信噪比的提高,簇首节点与协作节点之间的信道质量变好,误码率有所降低。随着簇首节点与协作节点之间信噪比的增加,错误平层下降,在信噪比为 10dB 时,协作 MIMO 误码率与经典 MIMO 系统的误码率曲线基本一致。

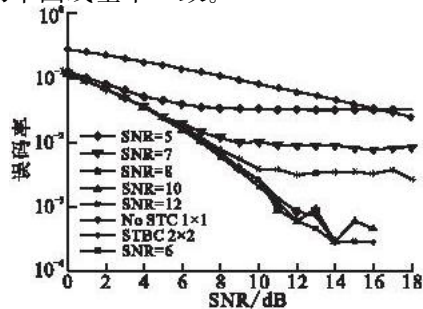


图 5 在不同 SNR 情况下,2 发 2 收协作 MIMO 协作 MIMO 系统性能比较

Fig. 5 Performance comparison of cooperative MIMO system with two transmitters and two receivers under different SNR

级联 LDPC 编码的协作 MIMO 系统的性能以 2 个协作天线的系统进行研究。LDPC 译码最大迭代次数设为 2。图 6、图 7 给出了 2 发 1 收、2 发 2 收级联 LDPC 编码的协作 MIMO 系统。从图 6 中可

以看出,在误码率达到 10^{-4} 时,采用 BP 译码算法的级联 LDPC 编码的协作 MIMO 系统,与协作 MIMO 系统、MIMO 系统相比分别获得了 7 dB、10 dB 的编码增益,而采用分层译码算法的系统,由于其收敛速度快,与 BP 译码算法相比,有 4 dB 的增益,误码性能得到进一步的提升。由图 7 中 2 发 2 收的级联 LDPC 编码的协作 MIMO 系统可以得到同样的性能提升。

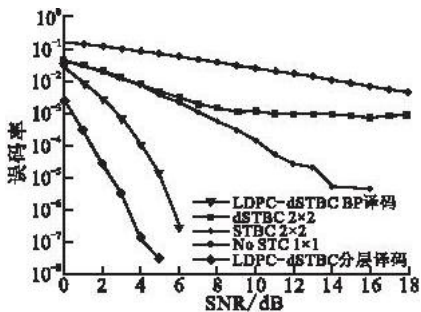


图 6 2 发 1 收情况下,不同系统的性能对比

Fig. 6 Performance comparison of different systems with two transmitters and one receiver

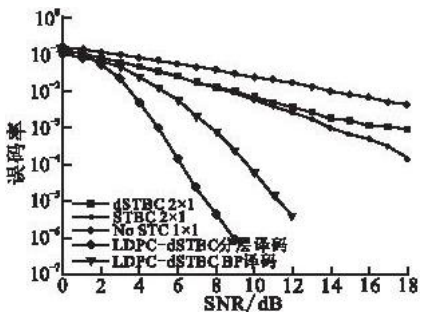


图 7 2 发 2 收情况下,不同系统的性能对比

Fig. 7 Performance comparison of different systems with two transmitters and two receivers

4 结语

本文基于无线传感器网络,构建了一个基于分簇的协作 MIMO 系统,并对传输过程进行了分析。针对协作 MIMO 系统受发射端簇首节点与协作节点之间信道质量影响较大,存在误码传播的问题,设计了级联 LDPC 编码的协作 MIMO 系统,详细分析了接收端 LDPC 分层译码算法的实现过程。仿真分析表明,级联 LDPC 编码的协作 MIMO 系统可以有效地解决协作 MIMO 系统误码传播的问题,显著的提高协作 MIMO 系统的性能。并且仿真中接收端采用的 LDPC 分层译码算法,在相同仿真条件下,与传统的 BP 译码算法相比,收敛速度更快,纠错性能更好。

参考文献(References):

- [1] Tim C W, Bas Driese. Backwards compatibility for MIMO systems based on IEEE 802. 11a[C]// Proc of the 10th international OFDM workshop. Hamburg, Germany: [s. n.], 2005: 109-113.
- [2] 邱云周,丁盛,严凯,等.分布式空时分组码译码转发的协同分集技术研究[J].电子技术应用,2007,33(12):105-108.
QIU Yunzhou, DING Sheng, YAN Kai, et al. Research on technique of cooperative diversity based on space-time block coding decode and forward[J]. Application of electronic technique, 2007, 33(12):105-108. (in Chinese)
- [3] 郭兴阳,褚振勇,梁俊,等.卫星通信中的一种改进 LDPC 译码算法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(3):60-63.
GUO Xingyang, CHU Zhenyong, LIANG Jun, et al. An advanced LDPC decoding algorithm for satellite communication[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(3):60-63. (in Chinese)
- [4] 蒋芳,胡艳军,朱传伙,等.无线传感器网络中一种基于 OSTBC 的高效协作传输技术[J].信号处理,2011,27(3):105-108.
JIANG Fang, HU Yanjun, ZHU Chuanhuo, et al. An efficient cooperative transmission strategy base on OSTBC for wireless sensor networks[J]. Signal processing, 2011, 27(3):105-108. (in Chinese)
- [5] 刘玉广,马林华,王广聪,等.协作 MIMO 在无人机通信中的应用研究[J].光通信研究,2012,8(4):67-70.
LIU Yuguang, MA Linhua, WANG Guangcong, et al. Application of cooperative MIMO in UAV communications [J]. Study on optical communications, 2012, 8(4):67-70. (in Chinese)
- [6] 赵政春,邓曙光,蒋冬初.高斯分布无线传感器网络簇头选择算法[J].计算机工程与应用,2011,47(16):83-85.
ZHAO Zhengchun, DENG Shuguang, JIANG Dongchu. Algorithm in choice of head-node on WSNs based on Gaussian distribution [J]. Computer engineering and applications, 2011, 47(16): 83-85. (in Chinese)
- [7] 王永民,苟彦新,孟相如.基于 Kalman 滤波的自适应 MIMO 信道估计[J].空军工程大学学报:自然科学版,2004,5(6):34-39.
WANG Yongmin, GOU Yanxin, MENG Xiangru. Adaptive MIMO channel estimation based on Kalman filtering[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2004, 5(6): 34-39. (in Chinese)
- [8] 雷维嘉,谢显中,李广军.LDPC 编码与时空编码相结合的编码协作方法[J].电子科技大学学报,2009,38(1):21-24.
LEI Weijia, XIE Xianzhong, LI Guangjun. Code cooperation by using LDPC code and space-time code [J]. Journal of university of electronic science and technology of China, 2009, 38(1):21-24. (in Chinese)
- [9] 野晓东,马林华,王卫民,等.基于整数运算的 LDPC 码最小和译码算法[J].通信学报,2010,31(6):106-111.
YE Xiaodong, MA Linhua, WANG Weimin, et al. Min-sum decoding algorithm for LDPC codes based on integer operation [J]. Journal on communications, 2010, 31(6):106-111. (in Chinese)
- [10] Ueng Y L, Leong C Y, Yang C J, et al. An efficient layered decoding architecture for nonbinary QC-LDPC codes[J]. IEEE transactions on circuits and systems, 2012, 59(2):385-398.

(编辑:徐楠楠)