

二层架构的无线传感器网络的二进制源估计*

戈 军¹, 周莲英²

(1. 宿迁学院 计算机科学系, 江苏 宿迁 223800; 2. 江苏大学 计算机科学与通信工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 针对传统源估计方案不易于扩展至大量传感器问题, 首先提出了基于两层 WSN 的新迭代译码 DJSCC 方案, 其具有低复杂性和高可扩展性。该方案使用每集群的两个 sink 节点提供差分空时分组编码(DSTBC), 其易于扩展到大量传感器, 适合间接源观测应用, 还适用于时变观测精度模型。通过对 BER 性能上限的分析, 建立了系统模型, 并进行了系统仿真。仿真结果表明: a) 与基本解码方案相比, 该方案算法的 BER 系统性能提高了 1~4 dB; b) 利用 DSTBC 的每群集的辅助 sink 节点, 不但增加了在失败情况下的系统可靠性, 而且也提高了整个系统的 BER 性能约 2~3 dB。

关键词: 二进制源估计; 分布式代码; 迭代译码; 两层无线传感器网络

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)09-3408-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.09.055

Binary source estimation using two-tier structure of wireless sensor network

GE Jun¹, ZHOU Lian-ying²

(1. Dept. of Computer Science, Suqian College, Suqian Jiangsu 223800, China; 2. College of Computer Science & Communication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: The traditional source estimates scheme can not being easily scalable to a large number of sensors, this paper proposed a new DJSCC scheme with iterative decoding for a two-tiered WSN. It had the low complexity and the high extendibility. This scheme used two sink nodes per cluster providing a distributed space-time block coding(DSTBC). The proposed scheme was easily expandable to a large number of sensors, appropriated for applications with indirect source observation. It was applicable to time-varying observation accuracy models. Through the analysis of BER performance upper bound, establishing a system model and implementing system simulation. Simulation results show that: a) the BER performance of the system with the proposed algorithm shows 1 to 4 dB improvement compared to the basic decoding scheme, b) the proposed use of secondary sink node at each cluster employing DSTBC not only increases the reliability of the system in case of failure in one of sink nodes, but also improves the BER performance of the whole system by about 2 to 3 dB.

Key words: binary source estimation; distributed codes; iterative decoding; two-tiered wireless sensor networks

在一个集群无线传感器网络(WSN)传感一个连续变化的数据区中,传感器的观测是高度相关的。一般相关模型是二进制对称信道(BSC)^[1]。根据 Slepian-Wolf 定理^[2],传感器数据间的相关性已被广泛用于提高信源编码效率。此外,结合信源编码与信道编码可以简化系统。

一个特殊情况是使用不同的观测来估计一个单一数据源。所需传感器的数量由观测精度和所需误码率性能设定。此数量的应用相当高,此时传感器的观测是不准确的^[3]。大多数文献中所述 DJSCC 代码是基于 LDPC 和 turbo 码。由于 LDPC 和 turbo 码解码的复杂性^[4],因此它们不易于扩展至大量传感器中。

针对上述问题,本文提出一种全新的 DJSCC 方案,该方案具有低复杂性和高可扩展性。该系统由具有随机交织器和 RSC 编码器的简单结构化的传感器组成。所提出的迭代译码算法估计观测精度参数,并在解码过程中使用它。为进一步提高系统性能,运行在半功率模式下的两个 sink 节点位于每个集群, DSTBC 被用于提高瑞利衰落信道的系统

性能^[5]。

1 分布式编码的二进制源

1.1 相关模型

一个拥有 M 个传感器的集群被认为是观测相同的源。二进制制代码数据帧 $S = \{s^1, s^2, \dots, s^M\}$ 假定是长度为 N , $p(s^k = 0) = p(s^k = 1) = 1/2$ 的独立同分布(i. i. d) Bernoulli 序列。传感器 i 测量噪声数据记为 $X_i = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^N\}$ 。数据源 S 和 i^{th} 传感器的观测数据间的信道误码模型化为交叉概率 β_i 的 BSC 信道。因此有

$$x_i^k = s^k \oplus e_i^k \quad (1)$$

其中: e_i^k 是第 i^{th} 个传感器的 k 位的错误概率 $p(e_i^k = 1) = \beta_i$, $p(e_i^k = 0) = 1 - \beta_i$, $i = 1, 2, \dots, M$ 。

BSC 信道假定为无记忆和独立的,因此,序列 X_i 也是一个 i. i. d 序列。传感器等观测精度 $\beta_i = \beta$, 每个组的两个源之间的成对的相关参数可以建模^[6]为

收稿日期: 2011-12-30; 修回日期: 2012-02-14 基金项目: 国家“863”计划基金资助项目(2007AA04Z1B2); 江苏省科技攻关项目(BE2007071)

作者简介: 戈军(1977-),男,江苏宿迁人,讲师,硕士,主要研究方向为计算机网络安全、无线传感器网络(gjun@sqc.edu.cn);周莲英(1964-),女,江苏泰州人,教授,博士,主要研究方向为网络安全性能、物联网。

$$\begin{aligned}
 p(x_i^k = \alpha | x_j^k = \alpha) &= 1 + 2\beta_j\beta_j - \beta_i - \beta_j = 1 + 2\beta^2 - 2\beta \\
 p(x_i^k = \alpha | x_j^k = \bar{\alpha}) &= \beta_i + \beta_j - 2\beta_i\beta_j = 2\beta - 2\beta^2 \quad (2) \\
 \alpha &\in \{0, 1\}, \bar{\alpha} = 1 - \alpha
 \end{aligned}$$

这意味着第 i^{th} 与第 j^{th} 个传感器间的数据相关可以被模型化为交叉概率 $\beta_{ij} = 2\beta - 2\beta^2$ 的 BSC 信道。这样的结果是使用解码算法,见 1.3 节。

1.2 编码器设计

图 1 描述了 M 个传感器组成的系统。每个传感器挑选一个长度为 N 的框架,并对 RSC 编码器生成矩阵 $\left[1 \frac{1+D^2}{1+D+D^2}\right]$ 的数据进行编码。由此产生的系统和校验位形成 50% 编码器,可以正确地击穿以实现理想的编码率传感器。随机交织进行 RSC 编码之前增加由此产生的码字的最小距离。这些传感器一起构成一个 PCCC 分布式结构。译码器结构设计中应考虑 RSC 编码器相关输入性能。

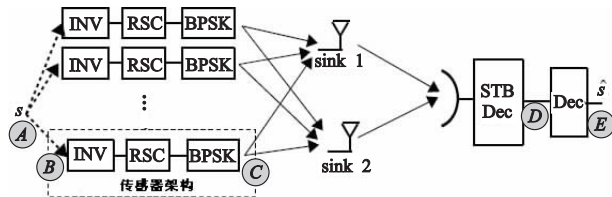


图1 二层架构WSN的二进制源观测的系统模型

1.3 译码器设计

由编码器结构得到启发,在接收端,可以利用基于多 turbo 译码器 (MTD) 的译码器。Log-MAP 算法用来计算输出日志的可能性比率 (LLRs)。图 2 为基于多 turbo 译码器的译码器结构。

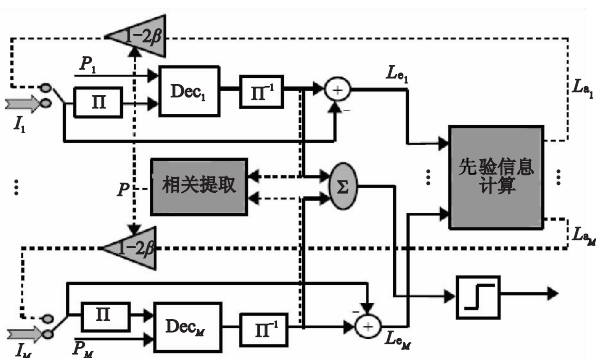


图2 基于多turbo译码器的译码器结构

在图 2 中,译码器结构的改进用黑颜色标记并将其归纳如下:

a) 初始化。译码器结构中的每个 RSC 译码器对应一个传感器节点。在第一次迭代译码中,LLRs 系统的数据位反馈到所有 RSC 译码器而不是一个。此结果偏置译码器的最终输出到源数据,而不是偏置到特定传感器的观测。

b) LLR 交换。每个译码器的输入 LLR 按平均值计算输出 LLRs 的所有其他 RSC 译码器。在这个过程中,1.1 节考虑了传感器间的交叉概率。每个译码器的外在 LLRs 作为先验信息应用到其他的译码器之前,按 $L_{ai} = (1 - 2\beta) \frac{1}{M-1} \sum_{j=1, j \neq i}^M L_{ej}$ 缩小, L_{ai} 和 L_{ei} 分别表示先验信息和第 i^{th} 个 RSC 译码器的外在 LLRs 信息, $\hat{\beta}$ 是 β 的估计。

c) 判定。在最后一次迭代中,基于平均输出 LLRs 进行了硬判决。出于初始化步骤的同样原因, $L_{av}^{\text{out}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M L_{ei}^{\text{out}}$ 取代

特定 RSC 译码器的 LLR 输出。

由于源数据和每个传感器 BSC 间的交叉概率是解码算法中必需的,基于 RSC 译码器 LLR 的标志,每次迭代后使用输出 LLRs 进行估计。每次迭代后,对应每个传感器的数据观测估计可以得到更接近实际传感器的观测。如果每次迭代结束后, $Y_i = \{y_i^1, y_i^2, \dots, y_i^N\}$ 表示第 i^{th} 个传感器和 $\hat{Y}_i$ 的传输 BPSK 调制帧表明其估计,则有

$$\hat{y}_i^k \approx y_i^k = 2x_i^k - 1 = 2(s^k \oplus e_i^k) - 1 \quad (3)$$

新的随机变量 ρ_{ij}^k 定义为

$$\rho_{ij}^k = \frac{|\hat{y}_i^k - \hat{y}_j^k|}{2} \quad (4)$$

可以表明接收到的帧 ρ_{ij} 平均定义为 $\hat{\beta}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N \rho_{ij}^k}{N}$ 是一个和方差 $\frac{1}{N}(\beta_{ij} - \beta_{ij}^2)\beta_{ij} = 2\beta - 2\beta^2$ 的平均随机变量。方差接近零的大面阵长度为 N 。

为了更准确,传感器间的交叉概率估计平均 $M-1$ 连续传感器间关联 $\frac{\sum_{i=1}^{M-1} \beta_{i,i+1}}{(M-1)}$ 的计算。仿真结果验证了这种方法的准确性。

2 Sink 节点的分布式空时编码

在提出的模型 (图 1) 中,每个群集以放大转发运行两个 sink,而不是一般单 sink 配置。Sink 节点在同一频段并行操作。Sink 节点利用 2×1 的 STBC,以提高开发分集增益的误码率性能。

近来的著作中,为了执行协作分集^[7],系统添加一个或多个额外的中继节点。而在该文提出的方案中,两个 sink 节点有一个接收帧噪声,因此不再需要 sink 节点间通信。

为了实现一个给定的总功率的最佳性能,功率同样应分为发射器和中继节点^[8]。如果总功率为 P_t ,功率 $P_t/(2M)$ 和 $P_t/4$ 分别分配到传感器和每个 sink 节点中。

3 性能分析

本章导出了系统误比特率 (BER) 性能的上限。每个传感器到基站的传输链路,图 1 中的 C 到 D 点,形成一个分布式时空码。下面导出链路的信噪比 (SNR) 方程^[8]为

$$P_b^{\text{in}} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[\int_0^{\infty} \frac{e^{-\frac{2x}{\mu}}}{\mu} K_0 \left(\sqrt{\frac{4x}{\mu}} \right) dx \right]^2 d\varphi \quad (5)$$

其中: P_b^{in} 表示位误码率; K_0 表示第二类修正零阶 bessel 函数; μ 表示系统的等效 SNR。

为了获得系统 BER 性能的上限,本文考虑一个独立 MAP 译码的基本译码器。每个传感器到基站的信道,图 1 中的 C 到 D 点,被替换交叉概率为 P_b^{in} 的 BSC 信道。

利用 RSC 编码器的位重量枚举函数 (WEF) 计算^[9]为

$$\begin{aligned}
 B(X) &= \frac{3X^5 - 6X^6 + 2X^7}{1 - 4X + 4X^2} = \\
 &= 3X^5 + 6X^6 + 14X^7 + 32X^8 + \dots \quad (6)
 \end{aligned}$$

一个 RSC 编码器的位误码率上限超过一个小交叉概率 P_b^{in} 的 BSC 信道,根据文献^[9]其为

$$P_b^{\text{rsc}} < B(X) |_{X=2} \sqrt{\frac{P_b^{\text{rsc}}}{P_b}} \approx B_{d_{\text{free}}} \left[2 \sqrt{\frac{P_b^{\text{rsc}}}{P_b}} \right]^{d_{\text{free}}} \quad (7)$$

其中: $d_{\text{free}} = 5$ 是代码的最小距离, $B_{d_{\text{free}}} = 3$ 。因此,每个观测的

位误码率,相对于源信号 RSC 解码后,图1中点A,考虑到观测误差参数 β_i 上界为

$$P_b^i < \beta_i \otimes P_b^{\text{RSC}} = \beta_i (1 - P_b^{\text{RSC}}) + (1 - \beta_i) P_b^{\text{RSC}} \quad (8)$$

如果相应位在一半以上的传感器的解码错误,则基本译码器输出的一个特殊位是错误的。因此,最后位系统误差的概率,图1中的A到E点,上界为

$$P_b^i < \sum_{i=\lfloor \frac{M}{2} \rfloor + 1}^M \binom{M}{i} p^i q^{M-i} + \frac{(-1)^M + 1}{4} \binom{M}{M/2} (pq)^{\frac{M}{2}} \quad (9)$$

$$p = 1 - q = P_b^i$$

4 仿真结果

图3给出了 $E_b/N_0 = M \frac{\text{SNR}}{R}$ 的系统 BER 性能。其中, E_b 指信息位的总能量; N_0 指一个单侧噪声功率; M 是传感器数量; R 是每个传感器的编码率。

图中传感器数量为4,帧长度为256,观测精度建模是交叉概率为0.01的BSC信道。

基于传感器输出到基站的内链接方程式(5),图3的虚线表明了图1中与仿真结果相匹配的C到E点的BER分析,实线表明了由方程式(9)推导出整个系统的BER性能上限。仿真结果表明,基本译码器的性能接近高SNR值的上限。可以看出,迭代译码器优于基本的译码器。针对不同的SNR值,性能的改善为1~4 dB。然而整个系统的错误平层没有显著提高。

通过采用两个sink节点和利用DSTBC,图4显示了两层网络中所提出模型的性能改善。它表明,使用两个sink性能提高约2~3 dB。使用同样的功耗DSTBC也获得1~2 dB的提高。

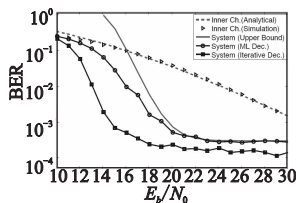


图3 所提解码方案与标准译码器的BER性能比较

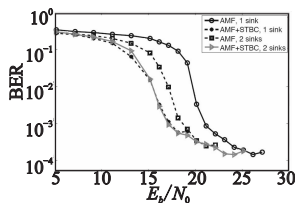


图4 所提编码方案的BER性能

5 结束语

本文提出了两层WSN的新的迭代译码DJSCC方案。所提方案易于扩展到大量传感器,适合间接源观测的应用。所提算法的自相关估计性能适用于未知,甚至适用于时变观测精度模型。BER性能上限的分析导出了系统模型及仿真结果验证。所提算法的BER系统性能表明,与基本的解码方案相比有1~4 dB的提高。

利用DSTBC的每群集的辅助sink节点,不但增加了在失败情况下的系统可靠性,而且也增加了整个系统的BER性能约2~3 dB。

参考文献:

- [1] WANG Pu, AKYILDIZ I F. Spatial correlation and mobility aware traffic modeling for wireless sensor networks [C]//Proc of the 28th IEEE GLOBECOM. 2009:3128-3133.
- [2] GARCIA-FRIAS J, ZHAO Ying. Compression of binary memoryless sources using punctured turbo codes [J]. IEEE Communications Letters, 2002, 6(9):394-396.
- [3] RAZI A, YASAMI K, ABEDI A. On minimum number of wireless sensors required for reliable binary source estimation [C]//Proc of IEEE WCNC. 2011.
- [4] GARCIA-FRIAS J, XIONG Zi-xiang. Distributed source and joint source-channel coding: from theory to practice [C]//Proc of IEEE ICASSP. 2005:1093-1096.
- [5] 张勇, 韩力, 程智慧, 等. Nakagami 衰落信道中差分空时分组码误比特率分析 [J]. 通信技术, 2008, 41(10):58-60.
- [6] RAZI A, ABEDI A. Distributed coding of sources with unknown correlation parameter [C]//Proc of ICWN. 2010.
- [7] LANEMAN J N, WOMELL G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2003, 49(10):2415-2425.
- [8] MAHAM B, NADER-ESFAHANI S. Performance analysis of distributed space-time codes in amplify-and-forward mode [C]//Proc of IEEE SPAWC. 2007:1-5.
- [9] LIN Shu, COSTELLO D. Error control coding [M]. 2nd ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 2004.