

无线传感器网络中一种基于 OSTBC 的高效协作传输技术

蒋 芳 胡艳军 朱传伙 苑玉召

(安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽合肥 230039)

摘 要: 针对发端能量受限的无线传感器网络提出了一种基于 OSTBC 的高效虚拟 MIMO 协作传输策略。在无线传感器网络的每个簇内采用一种全速率的分布式 OSTBC 传输方案, 同时对调制方式的星座大小进行优化, 创建了一种更高效的无线传感器网络和 MIMO 通信相结合的模式。针对该模型在接收端进行迭代译码, 并推导出该系统的总能耗函数和网络时延算式。通过仿真显示, 该模型不仅能够极大的降低发端能耗, 对任意协作节点数目均能够实现全速率传输, 解决了传统分布式空时码用于无线传感器网络时发端的数据积压问题, 减小了网络时延。因此本协作传输模型从能量消耗和网络时延两方面对无线传感网的性能进行了提升, 能够为无线传感网的应用提供有意义的参考。

关键词: 无线传感器网络; 协作传输; OSTBC; 网络时延

中图分类号: TP393; TN911.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)03-0438-06

An efficient cooperative transmission strategy based on OSTBC for wireless sensor networks

JIANG Fang HU Yan-jun ZHU Chuan-huo YUAN Yu-zhao

(Key Laboratory of Intelligent Computation and Signal Processing (Anhui University), Ministry of Education, Hefei 230039, China)

Abstract: An efficient virtual MIMO (Multiple Input Multiple Output) cooperative transmission strategy based on OSTBC (Orthogonal Space Time Codes) for wireless sensor networks is proposed in this paper. The full-rate distributed OSTBC encoded cooperative transmission is adopted in the inner-cluster, in the meanwhile we optimize the constellation size and propose a more efficient cooperative transmission model combining WSN and MIMO systems. In the receiver, we apply an iterative decoding algorithm, and deduce an energy consumption function and the total delay equation. Simulations show that with the proposed strategy, the goal of full rate transmission can be achieved for any arbitrary number of cooperative nodes, and both the total energy consumption and the total delay on the transmission side can be greatly reduced. So our efficient virtual MIMO cooperative transmission model improve the wireless sensor network performance in both energy consumption and time delay, and our research can provide a meaningful reference for application of WSN.

Key words: wireless sensor networks; cooperative transmission; orthogonal space time code; network delay

1 引言

无线传感器网络 (WSN, wireless sensor network) 在国际上被视为互联网之后的第二大“泛在网”, 具有非常广泛的应用前景, 其发展和应用将会给人类生产和生活的各个领域带来深远影响。但 WSN 在发展过程中, 仍然有非常多的关键技术有待发现和研究, 能量效率是其关键技术之一。

基于分布式 OSTBC (orthogonal space-time block code)

的虚拟多输入多输出技术 (MIMO, multiple input multiple output) 由于其复杂度低, 以及能够提供编码和分集增益, 被认为是一种能量有效的传输技术, 在 WSN 中受到越来越多的关注。文献 [1] 中分析了在 WSN 中采用协作 MIMO 技术后的能量有效性问题以及网络延时, 但其分析仅限于采用 Alamouti 码的两个节点进行协作传输的情况。文献 [2] 中提出了一种分布式无线传感器网络中基于 V-BLAST 接收处理的虚拟 MIMO 接收方案。文献 [3-6] 中考虑了基于 STBC 编码的协作传

输策略。与传统的 SISO (single input single output) 技术相比,这些采用虚拟 MIMO 传输的技术即使增加了电路消耗和本地通信的开销,由于能够大大降低传输能量,WSN 的总能量消耗是降低的。

但上述研究仅限于传统的空时编码直接应用于 WSN 中,没有考虑到当协作节点大于 2 时,OSTBC 不能实现全速率传输,从而使得发端数据堆积,网络延时增大。而采用准正交设计时虽然能够达到全速率,又会使得译码复杂度增加。本文将全速率的分布式 OSTBC 引入 WSN,对传统的虚拟 MIMO 协作传输策略进行改进,提出了一种更高效的虚拟 MIMO 传输系统模型,并对调制方式的星座图大小进行优化,推导出该系统的总能耗函数和网络延时算式。

2 系统模型

本文讨论发端能量受限的单跳 WSN。传输系统模型如图 1 所示,每个数据采集节点 (DCN, data collection node) 由于不易更换电池能量受限,且受体积限制只配置单根天线。而数据收集节点 (DGN, data gathering node) 相对 DCN 而言能量相对不受限,可进行一些较复杂的数据处理,且可以有较大的物理尺度,能够容纳多天线容量。

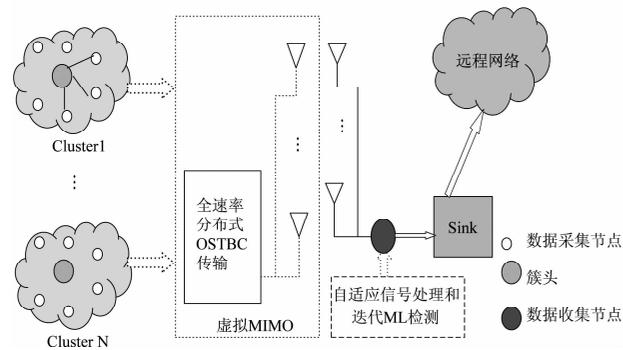


图1 系统模型图

所有的数据采集节点按照一定的分簇算法形成几个虚拟簇,每个簇内都选取一个簇头和若干个协作节点。每个数据采集节点采用时分多址 TDMA 方式向簇头广播数据和信息,簇头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。协作节点接收完成后与簇头共同进行全速率分布式 OSTBC 编码,向数据收集节点传送信息。数据收集节点由于能量相对不受限,可采用一些自适应算法对信息进行恢复和检测。

3 基于分布式 OSTBC 的全速率协作传输

由于 OSTBC 可以实现 MIMO 信道提供的全分集增益,同时在接收端进行非常简单的 ML (Maximum-Likeli-

hood) 译码。因此,本文在由簇头和簇内协作节点联合向数据收集节点传输信息阶段采用分布式 OSTBC 编码方案。在 OSTBC 编码方案中[7],要求编码矩阵满足

$$X^H X = (|s_1|^2 + |s_2|^2 + \dots + |s_k|^2) I_N \quad (1)$$

其中 N 是簇内总的发送节点数目, I_N 是 $N \times N$ 的单位矩阵, (s_1, s_2, \dots, s_k) 是 T 个时隙内发送的 k 个符号。在文献[7-8]中已经证明,要满足(1)式,复数域 OSTBC 在协作节点数大于 1 (即相当于 MIMO 系统中发射天线数大于 2) 时不能达到全速率传输。Tarokh 在文献[7]中提出的 OSTBC 编码方案对于任意数目的发射天线码率都只能达到 $1/2$ 。而文献[9]中提出的编码方案对于 $2k-1$ 或 $2k$ 根天线,码率为 $\frac{k+1}{2k}$,仍然不能达到全速率传输。表 1 给出了对于任意数目的发射天线,正交空时码所能够达到的最高码率。

表1 正交空时码的码率

N (簇内总的发送节点数目)	码率
2	1
3...4	3/4
5...8	1/2
9...16	5/16
$(2^{k-1} + 1) \dots 2^k$	$\frac{(k+1)}{2^k}$

本文采用的全速率协作传输方案可分三个步骤完成: OSTBC 编码,全速率传输,迭代 ML 解码。

3.1 OSTBC 编码

簇头和协作节点形成一个虚拟 MIMO 发送阵列,对数据进行 OSTBC 编码,编码规则服从亲和正交设计[10]。

对于协作节点数为 $2^k - 1$ ($k = 1, 2, 3, \dots$) 的情况, OSTBC 编码矩阵 X 的设计用以下递归算式表示:

令 $X_1(s_1) = s_1 I_1$, 则

$$X_{2^k}(s_1, s_2, \dots, s_{k+1}) = \begin{pmatrix} X_{2^{k-1}}(s_1, \dots, s_k) & s_{k+1} I_{2^{k-1}} \\ -s_{k+1}^* I_{2^{k-1}} & X_{2^{k-1}}^H(s_1, \dots, s_k) \end{pmatrix} \quad (2)$$

若事先选定的总编码协作节点数目不是 2 的倍数,编码矩阵可从满足 $N = 2^k$ 条件的更大的编码矩阵中删除一些列来获得。如 2 个节点协作传输时, OSTBC 编码矩阵 X_3 可从 3 节点协作时的编码矩阵 X_4 中删除一列获得。

3.2 全速率传输

传输时使用所有发送节点但只传输编码矩阵的部分码字。即只发送编码矩阵的部分行,以此来提高码

率[11]。具体保留几行不传,应根据事先选定的协作节点数目,以保证实现全速率传输。

定义接收端信号为如下的代数矩阵形式

$$Y = XH + z \quad (3)$$

X 为编码矩阵, H 为信道系数, z 为均值为 0 方差为 σ^2 的加性白高斯噪声。

现以每个簇内选取 3 个协作节点和簇头共同发送数据的情况为例, OSTBC 编码矩阵如:

$$X = \begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & 0 \\ -s_2^* & s_1^* & 0 & s_3 \\ -s_3^* & 0 & s_1^* & -s_2 \\ 0 & -s_3^* & s_2^* & s_1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

显然矩阵(4)满足公式(1)和(2)的正交设计,且用了 4 个时隙来发送 3 个符号,码率为 3/4。为了实现全速率传输,我们在发端只发送矩阵 X 的 3 行数据(可以为任意 3 行),也就是用 3 个时隙来发送 3 个符号,码率为 1,实现了全速率传输。更多协作节点的情况以此类推。

3.3 基于 EM 的迭代 ML 解码

在数据收集节点处进行 ML 检测。由于发送端删除了部分码字未传,所以接收数据不完整,可结合自适应算法进行检测。本文采用 EM 算法(expectation maximization)进行迭代 ML 估计,解出发送数据。

同样以每个簇内选取 3 个协作节点和簇头共同发送数据的情况为例,发送端编码矩阵如(4)式所示,为保证全速率传输,第四行数据被删除。此时接收端的接收矩阵可表示为 $Y = [y_1, y_2, y_3, \tilde{y}_4]^T$, 其中 y_1, y_2, y_3 为接收端的接收信号,由(3)、(4)式知

$$\begin{aligned} y_1 &= h_1 s_1 + h_2 s_2 + h_3 s_3 + z_1 \\ y_2 &= -h_1 s_2^* + h_2 s_1^* + h_4 s_3 + z_2 \\ y_3 &= -h_2 s_3^* + h_3 s_2^* + h_4 s_1 + z_3 \end{aligned} \quad (5)$$

由于发送端只发了三行数据,所以接收信号矩阵 Y 中的第四行数据 y_4 缺失,用其估计值 \tilde{y}_4 来表示。此时不能直接采用 ML 检测进行 OSTBC 译码,必须结合一些自适应算法对接收端数据进行恢复。假设信道状态已知,要对发送数据 s_i 进行估计,而此时接收端数据 Y 不完整,我们采用了 EM 算法进行迭代 ML 检测。EM 算法分为两步, E 步计算似然函数的数学期望, M 步对数学期望值进行最大化,两步迭代进行,直到数学期望值收敛到一最大值。

E 步计算似然函数的数学期望

$$Q(X|\tilde{X}_n) = E \left[\log(p(Y|X)) | Y_n, \tilde{X}_n \right] \quad (6)$$

\tilde{X}_n, Y_n 分别为第 n 次迭代后 X, Y 的估计值。基于编码矩阵 X , 接收端的接收信号 Y 的似然函数为

$$p(Y|X) = C \cdot \exp \left(-\frac{1}{\sigma^2} \|Y - XH\|^2 \right) \quad (7)$$

C 为取决于接收信号矩阵维数和噪声方差 σ^2 的常数。则

$$Q(X|\tilde{X}_n) = E \left[\ln C - \frac{1}{\sigma^2} \|Y_n - \tilde{X}_n H\|^2 \right] \quad (8)$$

M 步最大化 $Q(X|\tilde{X}_n)$, 即第 $n+1$ 次迭代解出的 X 的估计值为

$$\tilde{X}_{n+1} = \arg \max_X Q(X|\tilde{X}_n) \quad (9)$$

此时可得到第 $n+1$ 次迭代解出的接收信号矩阵 Y 的估计值 $Y_{n+1} = [y_1, y_2, y_3, \tilde{y}_{4,n+1}]^T$ 其中 $\tilde{y}_{4,n+1} = -h_2 \tilde{s}_{3,n}^* + h_3 \tilde{s}_{2,n}^* + h_4 \tilde{s}_{1,n}$ 。

重复以上两个步骤,直到 $Q(X|\tilde{X}_n)$ 充分大时,停止。由于 EM 算法容易陷入局部最优,算法对初始值高度依赖。因此初始值选取上可令 $\tilde{X}_0 = H^{-1}Y$, 此时 H, Y 分别取实际传输和接收到得实际值。

4 能量效率分析和星座图优化

4.1 能量效率分析

在进行能量分析时,我们将整个 WSN 的协作传输过程分三个阶段,分别给出各阶段的能量效率算式。

- 假设每个数据采集节点具有相同的数据包长度为 N_i 个比特,数据采集节点数目为 M 个,则 M 个数据采集节点向簇头发送各自的数据包阶段消耗的能量为:

$$E_{phase1} = \frac{MN_l}{bB} (P_{lo-tr} + P_{tc} + P_{rc}) \quad (10)$$

$P_{lo-tr}, P_{tc}, P_{rc}$ 分别为发送 1 比特数据消耗的传输能量、发送机电路消耗、接收 1 比特数据的接收机电路消耗[1]。 b 为每个符号映射的比特数(对应于星座图的大小), B 为信道带宽。

- 簇头对接收到的数据包进行数据融合,然后向选定的所有协作节点发送数据包。这个阶段消耗的能量为:

$$E_{phase2} = \frac{N_l}{bB} (P_{lo-tr} + P_{tc}) + \frac{N_l(N_r - 1)}{bB} P_{rc} \quad (11)$$

上式中的第一部分为簇头向协作节点发送数据包时簇头消耗的能量,第二部分为协作节点接收簇头发来的数据包过程中消耗的总能量。 N_T 为包括了簇头和协作节点的总发送节点数。

• 簇头和协作节点进行 OSTBC 编码后,形成虚拟 MIMO 发送阵列联合向数据收集节点发送数据包过程中消耗的能量为:

$$E_{\text{phase3}} = N_l E_{bt} + \frac{N_l N_T P_{tc}}{bB} \quad (12)$$

上式中第一部分为传输能量消耗,第二部分为发送机的电路消耗。其中 E_{bt} 为发送 1 比特数据时的传输能量,根据 Cui 在文献 [1] 中的定义, E_{bt} 为:

$$E_{bt} = \frac{2}{3}(1+\alpha) \left(\frac{P_b}{4} \right)^{-\frac{1}{N_T}} \frac{2^b - 1}{b^{\frac{1}{N_T+1}}} N_0 \times \frac{(4\pi d)^2}{G_t G_r \lambda^2} M_l N_f \quad (13)$$

α 为取决于调制方案和星座图大小的系数, P_b 为误比特率, N_0 为单边功率谱密度, d 为发送节点到数据收集节点间的距离, $G_t G_r$ 分别为发射天线和接收天线增益, λ 为载波波长, M_l 为链路预留, N_f 为接收机噪声系数。

考虑到簇头和协作节点联合向数据收集节点发送数据阶段采用了改进的 OSTBC 传输方案,只发送了编码矩阵的部分行数据,第三阶段消耗的能量算式修正如下:

$$\beta E_{\text{phase3}} = \beta \left(N_l E_{bt} + \frac{N_l N_T P_{tc}}{bB} \right) \quad (14)$$

系数 β 根据具体协作节点数目以及正交设计方案联合选取。若采用表 1 中给出的最高码率正交设计方案, β 分别为 $\frac{3}{4}, \frac{1}{2}, \frac{5}{16}, \dots, \frac{k+1}{2^k}$, 对应于发送节点数为 3-4, 5-8, 9-16, $\dots, (2^{k-1} + 1) \sim 2^k$ 。则 WSN 总能量消耗算式为:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{phase1}} + E_{\text{phase2}} + \beta E_{\text{phase3}} \quad (15)$$

4.2 星座图优化

分析 (15) 式我们发现存在一个最优值 b , 使得 E_{total} 取值最小, 即使整个 WSN 的能量消耗达到最小。因此根据不同的传输距离, 可对 (15) 式进行优化, 选取最优的 $b_{\text{optimized}}$ 值。

$$b_{\text{optimized}} = \arg \min E_{\text{total}}(b) \quad (16)$$

5 网络时延

WSN 的网络时延主要取决于传输延时。对于信道带宽固定为 B , 符号周期近似为 $T_s \approx 1/B$ 。若采用表 1 所

示的传统的 OSTBC 传输方案, 由于当发送节点数大于 2 时不能实现全速率传输, 发送节点向数据收集节点发送数据时, 会在发端产生数据堆积, WSN 网络总时延为:

$$T = T_s \left(\sum_{i=1}^M \frac{N_l}{b_i'} + \frac{N_l}{\beta b_m} \right) \quad (17)$$

而采用全速率的 OSTBC 传输方案时, 对于任意协作节点数目都可以实现全速率传输, 此时 WSN 网络总时延为:

$$T_{\text{improved}} = T_s \left(\sum_{i=1}^M \frac{N_l}{b_i'} + \frac{N_l}{b_m} \right) \quad (18)$$

根据我们之前对 β 取值的分析发现, 采用我们给出的高效模型能够有效降低网络时延, 当协作节点数目取得越多时, 优势越明显。

6 仿真分析

为了证明本文所提高效协作传输策略在 WSN 中的有效性, 我们进行了仿真并与传统的 OSTBC 直接应用于 WSN 的模型进行了比较。图 2 为全速率 OSTBC 编码方案与传统的 OSTBC 编码方案的误符号率性能比较。当协作节点数为 3 (即 $N_T = 4$), 调制方式采用 PSK 时, 即使全速率方案的解码器必须估计部分发送码字, 可能会产生一些错误符号, 但全速率方案的误比特率性能仍要优于传统方案。这是由于全速率方案可以任意选择 3 行数据进行发送, 因此可以通过插入 1 比特信道状态信息, 选择信道条件最好的 3 行发送。并且在总比特率一致的情况下全速率传输可以降低星座图规模从而减少总的错误符号的数目。

我们所采用的改进的全速率 OSTBC 编码协作传输策略在发端只进行了删余操作, 因此和传统的分布式 OSTBC 编码协作相比在发端几乎不会带来复杂度的增加。当然我们会发现本策略未发送全部的编码码字, 使得在 DGN 处必须进行迭代 ML 译码, 这增加了接收端的运算量及处理复杂度。以图 2 所示 4×1 系统仿真为例, 传统 OSTBC 协作只需一次 ML 检测, 计算量为 $O(M^4)$, M 为取决于调制方式星座图大小的量。而使用改进协作策略需进行迭代检测, 因此根据迭代次数 N , 计算量为 $O(NM^4)$ 。由于 EM 算法收敛速度对初值的高度依赖性, 因此 N 的取值和所选用初值有关。本仿真中初值选取按照 $\tilde{X}_0 = H^{-1}Y$, 计算量包含矩阵的伪

逆运算和乘法运算,复杂度为 $O(13)$,按照此初值选取,一般迭代3次算法即可收敛。所以图2所示仿真总检测计算量为 $O(3M^4+13)$,相对于传统 OSTBC 协作策略接收端处理复杂度有所增加,但是由于我们的协作传输策略针对发端能量受限而接收端 DGN 处能量相对不受限的应用模型,因此接收端复杂度的增加是可以接受的。

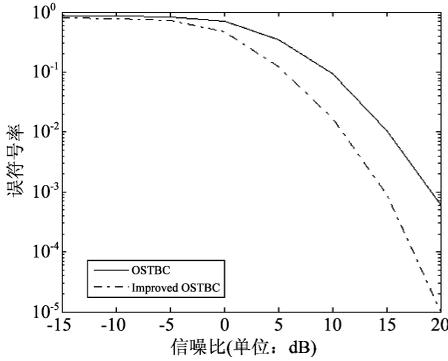


图2 两种模型的误符号率比较

图3为给定误比特率条件下,传输的数据包长度为20000比特时,SISO模型、传统的 OSTBC 模型以及本文所提的高效协作传输模型网络总能耗和传输距离之间的比较。显然本文所提高效模型的发端总能耗是最小的。仿真参数选取如表2。

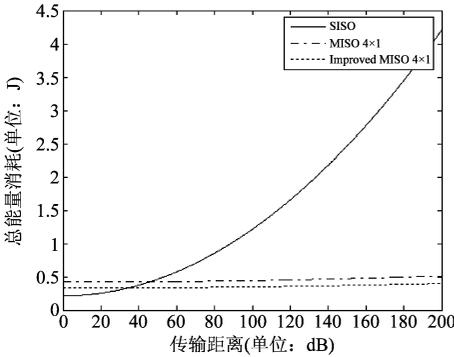


图3 不同传输策略能量效率比较

表2 仿真参数

B	10000	P_b	0.001
η	0.35	λ	0.12m
N_f	10dB	M_t	40dB
σ^2	-174dBm/Hz	P_{tc}	0.0482w
$G_t G_r$	5dBi	P_{rc}	0.1648w
ξ	$3 \frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}} + 1$ $M = 2^b$	α	$\frac{\xi}{\eta} - 1$

图4和5分别给出了当 $d=5$ 米时星座优化的结果以及不同传输距离下对应的最优星座图规模。从图4中可以看出,当 $d=5$ 米时最优星座图规模 $b_{optimized} = 12$ 。图6反映了星座优化对两种 4×1 模型总能耗的影响。

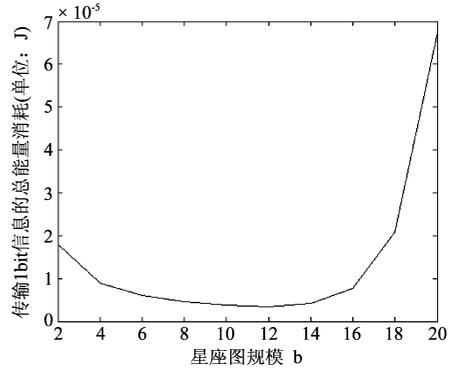


图4 传输距离取5m时星座图取值与总能量消耗的关系

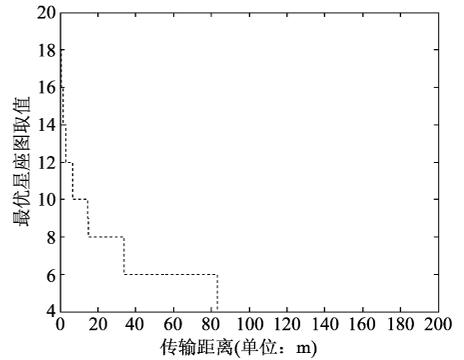


图5 不同传输距离对应的最优星座图

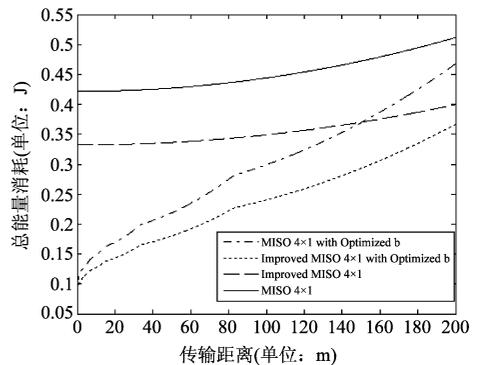


图6 星座图优化前后不同模型的能量效率比较

图7给出了3种模型的总网络时延比较。相较于传统的协作传输模型,高效模型有更小的网络延时;和SISO模型相比较,即使增加了本地通信的消耗,高效模型在20-250m传输距离内仍有优势。因此,无论是从总能量消耗方面还是总网络延时方面来看,本文所提的高效无线传感器网络都有明显的优势。

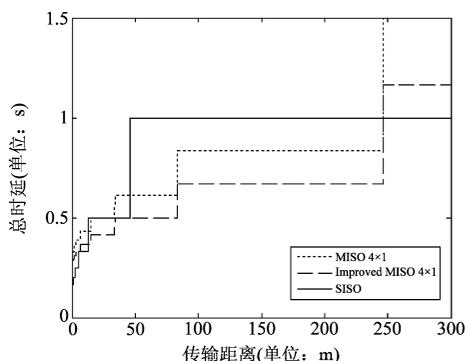


图7 网络总时延比较

7 结论

本文针对发端能量受限的单跳 WSN, 提出了一种高效的编码协作传输方案, 推导了系统的总能量耗计算式和总网络时延算式。发端采用一种全速率的分布式 OSTBC 编码, 结合编码方案进行协作传输策略研究以及接收端的译码算法研究, 并针对调制方式的星座图大小进行了优化, 最后通过仿真验证了该方案在三节点协作时能量效率和网络时延方面都优于基于传统 OSTBC 编码协作的 WSN, 且不会带来误码率的损失。当然我们只作了三协作节点的误码率仿真分析, 当协作节点数大于三个时, 需要在误码率和传输速率及能量消耗之间作一个折衷。

参考文献

- [1] Cui S. Andrea J. Goldsmith, Ahmad B. Energy efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks[J]. IEEE Journal on selected areas in communications. August 2004, Vol. 22. No. 6. pp1089-1098.
- [2] Jayaweera S. K. An energy-efficient virtual MIMO architecture based on V-BLAST Sensor and Ad Hoc Communications and processing for distributed wireless sensor networks Networks[C], 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference 4-7 Oct. 2004. Page(s):299-308.
- [3] Li X., Chen Mo and Liu W. Application of STBC-Encoded cooperative transmissions in wireless sensor network [J]. IEEE Signal Processing letters. February 2005, Vol. 12. No. 2. pp134-137.
- [4] Jayaweera S. K. Virtual MIMO-based cooperative communication for energy-constrained wireless sensor networks [J]. IEEE Transaction On Wireless Communication Mar. 2006, Vol. 5. pp984-989.
- [5] Jayaweera S. K., Energy analysis of MIMO techniques in

wireless sensor networks[C], in 38th Annual Conference on Information Science. and System. (CISS 04), Princeton, NJ, Mar. 2004.

- [6] 俞杰, 陈慧明, 金彦亮, 基于空时分组码的无线传感网协同传输系统的节能方法[J], 上海大学学报(自然科学版), Dec. 2007, Vol. 13 No. 6, pp696-698.
Yu J. Chen H Jin Y. Energy Efficiency of STBC-Encoded cooperative transmission system in wireless sensor networks[J]. Journal of Shanghai university (natural science edition), Dec. 2007, Vol. 13 No. 6, pp696-698.
- [7] Tarokh V. Jafarkhani H. Calderbank A. R. Space-time block codes from orthogonal designs IEEE Transaction Information Theory, Jul 1999, Vol. 45. pp. 1456-1467.
- [8] Tarokh V. Seshadri N. Calderbank A. R. Space-time codes for high data rate for high data rate wireless communications: performance criterion and code construction [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, Vol. 44, No. 2. pp. 744-765.
- [9] Lu K. Fu S. and Xia X. -G. Closed form design of complex orthogonal space-time block codes of rates $(k+1)/2k$ for $2k-1$ and $2k$ transmit antennas[J], IEEE Transactions on Information Theory, 2005, Vol. 51. No. 12, pp4340-4347.
- [10] 任品毅, 廖学文, 高贞贞, 徐静译, 协作通信及网络[M], 北京: 电子工业出版社, 2010, 40-41.
Ren P. -Y Liao X. -W. Gao Z. -Z. Xu J, Cooperative Communications and Networking [M], Beijing: Publishing house of electronics industry 2010, 40-41.
- [11] Laufer A. and Bar-Ness Y Improved transmission scheme for orthogonal space time codes[C], in 42nd Annual Conference on Information Science and Systems (CISS 08). 2008 pp1108-1113.

作者简介



蒋芳(1981-), 女, 在读博士, 讲师, 主要研究方向为无线传感器网络以及协作通信。



胡艳军(1967-), 女, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为无线传感器网络, 无线通信。