

# 虚拟多天线无线传感器网络

李忠亮<sup>1</sup>,毛飞<sup>2</sup>,周正<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学,陕西西安 710072; 2. 北京邮电大学 无线网络实验室,北京 100876)

**摘要** 提出一种基于虚拟多天线技术的分布式和协作的无线传感器网络,分析了该虚拟多天线无线传感器网络的性能。同点到点的无线传感器网络相比较,在天线传输信号能量相同的情况下,虚拟多天线无线传感器网络的误比特概率(BER)更小;或者在同样误比特概率情况下,虚拟多天线无线传感器网络的天线传输信号能量更低。这些特性能够提高无线传感器网络的性能或延长无线传感器网络的使用寿命。

**关键词** 多天线;无线传感器网络;误比特率

中图分类号 TN911.22

文献标识码 A

文章编号 1003-3106(2008)07-0001-03

## Virtual MIMO Wireless Sensor Network

LI Zhong-liang<sup>1</sup>, MAO Fei<sup>2</sup>, ZHOU Zheng<sup>2</sup>

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China;

2. Wireless Network Lab, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** A virtual multiple-input multiple-output (MIMO) based communication architecture is proposed for distributed and cooperative wireless sensor networks. The performance of this virtual MIMO wireless sensor network is analyzed. Compared with the end-to-end wireless sensor network, the bit error rate (BER) of virtual MIMO wireless sensor network is smaller or the energy consumed by each sensor in the virtual MIMO wireless sensor network is saved under the same BER performance. These properties can improve the performance or extend the life of wireless sensor networks.

**Key words** MIMO; wireless sensor network; BER

## 0 引言

不同类型的传感器网络的性能限制已经引起了广泛的研究,如文献[1]。在这些研究中主要关注的是抽样和压缩问题或者是信道容量问题。本文提出的无线传感器网络,其目标是在高保真度情况下,在空间和时间基础上搜索一种物理模型。有关该方面的研究,如文献[2-4]。文中从多天线的物理层出发,分析了无线传感器网络的性能。由于多天线通信技术的优越特性,其已经被建议用于多个通信标准中。同传统的点到点通信系统相比,多天线通信系统在没有增加系统带宽和发射功率的情况下提高了系统的性能。另外通过以空间分集的方式使用多天线技术,能够提高系统的信道容量<sup>[5]</sup>。本文的主要目标是分析得出误比特率和传感器节点的数目、基站数目以及节点传输总功率之间的关系。

## 1 虚拟多天线无线传感器网络模型

本文提出的虚拟多天线无线传感器网络的模型如图1所示。

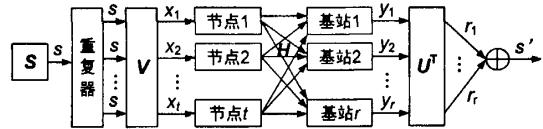


图1 虚拟多天线无线传感器模型

在该模型中,有一个物理现象,用来产生信源比特“1”或“0”,用“S”来表示。通过节点各自的识别器,节点间的相互通信和反馈信号来形成虚拟多天线无线传感器网络,假定该网络具有精确的时间同步。还假定中间数据汇聚单元能理想地连接到基站,因而基站收集到的数据能够被中间数据汇聚单元协作地处理。下面介绍网络参数。

### 1.1 信道特性 $H$

定义传输天线(传感器节点)和接收天线(基站)的数目分别为  $t$  和  $r$ 。在该线性模型中,接收向量  $Y$

收稿日期:2008-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(60432040,60572020);北京市自然科学基金项目(4052021);教育部博士点专项基金项目(20060013008)。

和发送向量  $X$  之间的关系为:

$$Y = HX + N. \quad (1)$$

式中,  $H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{r1} & h_{r2} & \cdots & h_{rt} \end{bmatrix}$ , 是一个  $r \times t$  矩阵;  $N$  为一个均值为零独立同分布的高斯噪声。矩阵  $H$  的特性如下:

①  $H$  是一个与信道特性相关的随机矩阵;

②  $H$  是确定的并且对于发送部分和接收部分来说都是已知的;

③  $H$  是一个随机矩阵但一旦选定则为固定的。

利用奇异值分解理论, 矩阵  $H$  能够被表示为:

$$H = UDV^T. \quad (2)$$

式中,  $U$  为  $r \times r$  的酉矩阵;  $V$  为  $t \times t$  的酉矩阵;  $D$  为  $r \times t$  的非负对角矩阵。实际上, 矩阵  $D$  对角线上的非负元素为矩阵  $HH^T$  的特征值的均方根, 矩阵  $U$  的列为  $HH^T$  的特征向量, 矩阵  $V$  的列为  $H^T H$  的特征向量。可将式(1)表示为:

$$Y = UDV^T X + N. \quad (3)$$

## 1.2 信源信息处理

该模型中通过  $S$  将物理现象转换为比特信号  $s$ , 然后通过重复器和前向编码器形成发送向量  $X = [x_1, x_2, \dots, x_t]^T$ , 最后通过  $t$  个传感器节点将信息传输出去。

## 1.3 信道的空间带宽 $B$

从式(2)得到传输矩阵  $H$  有  $k$  ( $k \leq \min\{t, r\}$ ) 个非零奇异值定义为:  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 。每一个非零奇异值表示一个单独的空间信道。在这种情况下, 矩阵的秩相应地表示信道的空间带宽, 具体表示为:

$$B = \text{rank}(H).$$

## 1.4 传输信号向量 $X$ 所需的能量

从以上分析知道, 传输信号向量  $X$  能够表示为:  $X = VS$ , 这里  $V$  为一个  $t \times t$  的酉矩阵并且由传输矩阵  $H$  所决定。  $S$  为信源信号向量  $[s, s, \dots, s]$ 。所以, 传输信号向量  $X$  所需的能量为:

$$P = E(X^T X) = tE(s^T s).$$

假定  $E(s^T s) = E$ , 则  $P = tE$ 。

## 2 虚拟多天线无线传感器网络性能分析

在这里将利用贝叶斯判决准则分析虚拟多天线

无线传感器网络的性能。因为信息比特  $s$  为“1”或“0”, 这里假定  $\sqrt{E}$  表示比特“1”,  $-\sqrt{E}$  表示比特“0”, 并且假定发送比特“0”和“1”的概率相同。

定理 1: 虚拟多天线无线传感器网络的误比特率为:

$$P(\epsilon) = Q\left(\frac{(\lambda_1 + \dots + \lambda_k)\sqrt{E}}{\sigma}\right). \quad (4)$$

式中,  $k$  为传输矩阵  $H$  的秩;  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$  为矩阵  $HH^T$  特征值的均方根;  $E$  为信源比特  $s$  的能量;  $\sigma$  为噪声方差的均方根。

证明: 由图 2, 基站接收信号向量  $Y$  为:

$$Y = HX + N = UDS + N. \quad (5)$$

所以经过接收机修正后的信号  $R$  为:

$$R = U^T Y = (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k)s + U^T N. \quad (6)$$

式中,  $k$  为传输矩阵  $H$  的秩;  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$  为矩阵  $HH^T$  特征值的均方根。

因为信源比特  $s$  可被表示为:  $\sqrt{E}$  或  $-\sqrt{E}$ , 所以得到:

$$R = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)\sqrt{E} + U^T N, s \text{ 为比特“1”};$$

$$R = -(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)\sqrt{E} + U^T N, s \text{ 为比特“-1”}.$$

又因为

$$E(U^T N) = 0, \quad (7)$$

$$E((U^T N)^T (U^T N)) = \sigma^2, \quad (8)$$

由式(5)~(8)得到:

$$\begin{cases} H_1: P(r|H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(r-(\lambda_1 + \dots + \lambda_k)\sqrt{E})^2}{2\sigma^2}} & \text{for “1”} \\ H_0: P(r|H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(r+(\lambda_1 + \dots + \lambda_k)\sqrt{E})^2}{2\sigma^2}} & \text{for “0”} \end{cases}$$

又由贝叶斯判决准则:

$$\frac{P(r|H_1)}{P(r|H_0)} > \frac{P(H_0)}{P(H_1)} = 1,$$

即

$$\exp\left\{\frac{2(\lambda_1 + \dots + \lambda_k)\sqrt{E}}{\sigma^2} r\right\} > \frac{P(H_2)}{P(H_1)} = 1 \Rightarrow r > \frac{\lambda_1 + \dots + \lambda_k}{\sigma^2} \sqrt{E}.$$

这样, 误比特率就可以表示为:

$$P(\epsilon) = P(\epsilon|H_1)P(H_1) + P(\epsilon|H_0)P(H_0) = Q\left(\frac{(\lambda_1 + \dots + \lambda_k)\sqrt{E}}{\sigma}\right).$$

式中,  $Q$  函数定义为:  $Q(x) = \int_x^{+\infty} \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{y^2}{2}} dy$ 。证毕

推论 1(互惠性): 由于矩阵  $H^T H$  和矩阵  $HH^T$  有相同的非零特征值, 所以相应于通信信道  $H$  和

$\mathbf{H}^T$  的系统性能相同。

例 1: 假如对于所有的  $r$  和  $t$ , 传输信道矩阵为:

$\mathbf{H}_n = \mathbf{1}$ , 则  $\mathbf{H}$  可以表示为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \sqrt{1/r} \\ \vdots \\ \sqrt{1/r} \end{bmatrix} (\sqrt{n}) [\sqrt{1/t} \ \cdots \ \sqrt{1/t}]$$

这样发现在对矩阵  $\mathbf{H}$  进行奇异值分解后, 对角矩阵  $\mathbf{D}$  将只有一个非零元素  $\sqrt{n}$ 。利用式(4), 系统的误比特率为:

$$P(\epsilon) = Q\left(\frac{\sqrt{n} \sqrt{E}}{\sigma}\right)$$

由于  $Q$  函数  $Q(x)$  随着  $x$  的单调增加单调减小, 所以

同点到点无线传感器网络(其误比特率为  $Q(\frac{\sqrt{E}}{\sigma})$ )

相比, 多天线无线传感器网络的误比特率减少了。点到点无线传感器网络和例 1 中多天线无线传感器网络的误比特性能如图 2 所示。

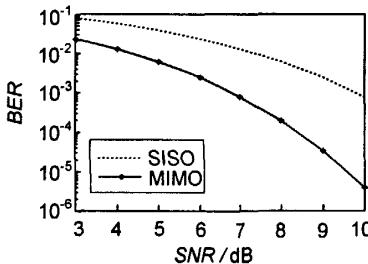


图 2 点到点和多天线无线传感器网络误比特率性能比较

### 3 虚拟多天线无线传感器网络的能量特性

在无线传感器网络中, 由于传感器节点一旦布置了, 节点的电池很难更换, 因而无线传感器网络中一个很重要的事情就是节约传感器节点传输信息消耗的能量。因此, 将讨论如图 1 所示虚拟多天线无线传感器网络的能量特性。

定理 2: 同点到点无线传感器网络相比, 在相同误比特率性能条件下, 虚拟多天线无线传感网络中每个节点消耗的能量为:

$$E_{\text{MIMO}} = E_{\text{SISO}} / (\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_k)^2$$

式中,  $k$  为传输矩阵  $\mathbf{H}$  的秩;  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$  为矩阵  $\mathbf{H}\mathbf{H}^T$  特征值的均方根;  $E_{\text{SISO}}$  为点到点无线传感器节点传输 1 比特信息传感器节点消耗的能量;  $E_{\text{MIMO}}$  为虚拟多天线无线传感器网络中传输 1 比特信息每个传感器节点消耗的能量。

证明: 由式(4)和点到点无线传感器网络的误比特率  $Q(\frac{\sqrt{E_{\text{SISO}}}}{\sigma})$ , 如果二者的误比特率相同, 则

$$Q\left(\frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_k) \sqrt{E_{\text{MIMO}}}}{\sigma}\right) = Q\left(\frac{\sqrt{E_{\text{SISO}}}}{\sigma}\right) \quad (9)$$

从式(9)得到:

$$\frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_k) \sqrt{E_{\text{MIMO}}}}{\sigma} = \frac{\sqrt{E_{\text{SISO}}}}{\sigma} \Rightarrow \\ E_{\text{MIMO}} = E_{\text{SISO}} / (\lambda_1 + \cdots + \lambda_k)^2$$

例 2: 取  $r = t = n$  和  $\mathbf{H} = \mathbf{I}_n$ 。则有

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \cdots = \lambda_n = 1$$

所以,  $E_{\text{MIMO}} = E_{\text{SISO}} / n^2$ 。

由例 2 可以发现, 多天线无线传感器网络中每个节点消耗的能量减少了, 从而延长了每个节点的寿命。由于传感器网络中的每个节点的寿命被延长了, 因而整个网络的寿命也同样被延长了。

### 4 结束语

本文分析了虚拟多天线无线传感器网络的性能。结果表明, 在无线传感器网络中使用多天线技术能够提高无线传感器网络的性能, 同点到点的无线传感器网络相比较, 在天线传输信号能量相同的情况下, 虚拟多天线无线传感器网络的误比特概率 (BER) 更小; 或者在同样误比特概率情况下, 虚拟多天线无线传感器网络的天线传输信号能量更低。这些特性能够提高无线传感器网络的性能或延长无线传感器网络的使用寿命。

◆

### 参考文献

- 1] CHAMBERLAND J F, VEERAVALLI V V. Decentralized Detection in Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003(51): 407 - 416.
- 2] GASTPAR M, VETTERLI M. On the Capacity of Large Gaussian Relay Networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(3): 765 - 779.
- 3] GASTPAR M, VETTERLI M. Source-channel Communication in Sensor Networks [C]. In 2nd Int Workshop on Info Proc in Sensor Networks. New York, NY: Lecture Notes in Computer Science, Springer, 2003: 162 - 177.
- 4] GASTPAR M, VETTERLI M. Power, Spatio-temporal Bandwidth, and Distortion in Large Sensor Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23 (4): 745 - 754.
- 5] GOLDSMITH A, JAFAR S A, JINDAL N, et al. Capacity Limits of MIMO Channels [J]. IEEE J. Select. Areas Commun., 2003, 21(6): 684 - 702.

### 作者简介

李忠亮 男,(1968-),西北工业大学博士研究生。主要研究方向:信号处理、无线测控技术。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>