

文章编号:1001-893X(2011)01-0084-05

一种超宽带模拟合并转发协作通信系统^{*}

钱 慧,余 轮,郑海峰

(福州大学 物理与信息工程学院,福建 福州 350108)

摘 要:针对频率选择性衰弱信道下协作通信系统信道估计复杂的问题,提出了一种模拟合并放大转发超宽带(UWB)协作通信方案。该方案在源节点处对发送符号进行实数分布式空时编码并附加传输参考,在中继节点处利用传输参考对多径分量进行模拟合并,从而构建了一种改进型非正交放大转发协作通信系统。仿真结果证明,相对于无协作通信系统,模拟合并转发协作系统无需信道估计就可获得传输性能的有效提升。

关键词:超宽带通信;协作通信;实数分布式空时码;传输参考;非正交放大转发

中图分类号:TN925 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2011.01.017

An Ultra - wideband Analog Combination and Forward Cooperative Communication System

QIAN Hui, YU Lun, ZHENG Hai-feng

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In allusion to the complexity channel estimation of cooperative communication system over frequency - selective fading channels, a scheme of analog combination and forward ultra - wideband (UWB) cooperative communication is proposed. The transmitting symbol is coded by real space - time code and the transmitted reference is appended at source node, the multipath components are analog combined by applying the transmitted reference at relay node, then a modified non - orthogonal amplify - and - forward cooperative communication system is constructed. The simulation results show that compared to the non - cooperative communication, the transmission ability of analog combination and forward cooperation system can be efficiently improved without channel estimation.

Key words: ultra - wideband communication; cooperative communication; real space - time code; transmitted reference; non - orthogonal amplify - and - forward

1 引 言

脉冲无线电(Impulse Radio, IR)是当前一种新兴的无线通信技术之一,被广泛应用在低速高密度无线传感器网络中^[1]。在低功耗超宽带无线传感器网络中,衰弱是影响通信质量的主要因素。作为一种抗衰弱的有效措施,协作分集技术可以通过共享若

干传感器节点的天线资源,在不同的通信支路上发送相同的信息样本,在接收端利用合并处理起到改善系统通信传输性能的目的^[2]。

在目前众多的协作通信协议中,非正交放大转发协议以其简单的实现结构和相对较高的数据传输率受到了人们广泛的关注^[2-5]。目前,已有的非正交放大转发通信方案针对协作系统在高斯白噪声信道下的传输性能进行了深入分析。但是,脉冲超宽

^{*} 收稿日期:2010-10-12;修回日期:2010-12-06

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2009J01286)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Fujian Province(No. 2009J01286)

带无线通信系统主要工作在多径传输环境中。在非正交放大转发协作通信网络中,中继节点在放大转发信息的同时转发通信支路上的多径干扰,因此,协作系统必须要通过比传统的超宽带(Ultra-wideband, UWB)接收机更为复杂的信道估计才能实现有效通信。

传输参考(Transmitted Reference, TR)是一种最佳的可抵抗多径干扰的模拟处理方案。在 TR 系统中,由于发送端传送了参考信号,因此,在接收端仅需要模拟相关器和积分器就可以有效地合并多径分量。本文利用 TR 接收机的特性,在中继节点处,利用传输参考信号对接收的多径分量进行模拟合并,在保证实现结构简单的同时避免多径分量在目的节点处形成累积,使得协作通信系统获得有效的分集增益。为了实现非正交协作通信,本文利用实数分布式空时码对发送符号进行了编码,构建一种基于传输参考技术的改进型非正交放大转发 UWB 协作通信系统。为了验证方案的正确性,本文对协作系统在无符号干扰条件下的传输性能进行了仿真分析。

2 UWB-TR 协作通信系统

2.1 三节点 UWB-TR 协作通信模型

三节点协作模型是最早提出、研究最广泛的协作分集实现模型。文献[2]指出,采用非正交放大转发协议可以达到协作通信系统分集复用折衷(Diversity Multiplexing Tradeoff, DMT)的上限,是最佳的放大转发协作通信模式。采用非正交 AF 协议的三节点协作通信模型如图 1 所示。协作系统包含一个源节点、一个协作中继节点和一个目的节点,其中 $h'_{1}(t)$ 、 $g'_{1}(t)$ 、 $h'_{0}(t)$ 分别表示源-中继节点间、中继-目的节点间、源-目的节点间衰弱信道的冲激响应。根据非正交放大转发协议,每个协作周期包含两个传输时隙:在第一个时隙,源节点广播发送 N_s 个符号,目的节点和中继节点接收信息;第二个时隙,源节点继续发送 N_s 个符号,而中继节点对第一个时隙接收到的符号放大转发给目的节点。

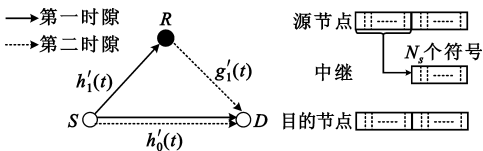


图 1 三节点协作通信系统

Fig.1 Three-node cooperative communication system

本文考虑 UWB-TR 通信系统采用脉冲幅度调制方式传输信息,将信息比特序列 b_j 映射为由 $\{+1, -1\}$ 组成的 PAM 调制符号集 a_j 。为了更好地获得协作系统的空间分集增益,本文在 UWB-TR 通信系统中引入实数分布式空时码。假定每个协作周期包含 4 个符号周期,在第一个时隙发送信息符号 $[a_1 \ a_2]^T$,在第二个时隙发送信息符号 $[a_3 \ a_4]^T$ 。利用实数分布式空时编码原理,本文采用文献[4]空时码字 $\mathbf{X}$:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = M_p \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} & \sqrt{2}\theta \\ 0 & 0 & \sqrt{2} & \sqrt{2}\bar{\theta} \\ 1 & \bar{\theta} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\theta = (1 + \sqrt{5})/2$, $\bar{\theta} = (1 - \sqrt{5})/2$, $\mathbf{A}$ 为信息符号, M_p 为空时码变换矩阵。

根据 TR 传输的基本原理,系统发射一对时间间隔为 T_d 的脉冲,并将码字加载在承载信息的数据脉冲上。因此,源节点发送信号可以表示为

$$s_{st}(t) = \sqrt{\beta_1} [w(t - jT_f - c_jT_c) + x_jw(t - jT_f - c_jT_c - T_d)] \quad (2)$$

式中, $w(t)$ 表示能量归一化的发射脉冲波形, β_1 为每个信息比特的平均发射功率, T_f 为脉冲重复周期, c_j 为 TH 码序列, T_c 为相应的 TH 码片时间。

假定在一个协作周期内信道状态保持不变,系统中的节点都是同步的,源-中继节点和源-目的节点间的信道冲激响应都可以由 L 个多径分量组成。在一个协作周期内的第一时隙,在经过多径衰弱信道传输以后,中继节点和目的节点接收到的信号为

$$r_1(t) = h'_{1}(t) * s_1(t) + n_1(t) \quad (3)$$

$$d_1(t) = h'_{0}(t) * s_1(t) + z_1(t) \quad (4)$$

式中, $n_1(t)$ 和 $z_1(t)$ 分别为中继节点和目的节点处的加性高斯白噪声。中继节点对接收信号进行放大并在协作周期的第二个时隙发射转发信号 $y_r(t)$ 。假定在协作周期第二个时隙中,源-目的节点和中继-目的节点间的信道冲激响应的多径分量依然为 L 时,为了避免符号间干扰,协作系统用非协作系统两倍的符号周期传输信息。在第二个时隙,目的节点采用多址接入,接收信号为

$$d_2(t) = h'_{0}(t) * s_2(t) + g'_{1}(t) * y_r(t) + z_2(t) \quad (5)$$

这种非正交协作通信模型可以等价于 2×2 MIMO

信道:

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h'_0 & 0 \\ g'_1 * h'_1 & h'_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 + n_1 * g'_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由公式(5)可以看出,中继节点接收信号的时延扩展和噪声在目的节点会造成累积。

2.2 中继节点多径合并预处理

在假定系统时钟同步的前提下,在本方案中,中继节点主要完成源-中继信道之间的多径分量模拟合并,以及对合并分量进行放大、转发的功能,其实现结构如图2所示。

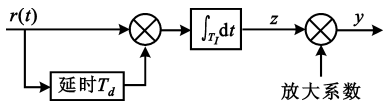


图2 中继节点多径合并
Fig.2 Multipath combination at relay node

根据非正交放大转发协议,在第 j 个符号周期内,中继节点接收的信号为

$$r_j(t) = s_j(t) * h'_1(t) + n_1(t) = \sqrt{\beta_1} [h_1(t - jT_f - c_jT_c) + x_j h_1(t - jT_f - c_jT_c - T_d)] + n_1(t) \quad (7)$$

其中, $h_1(t) = h'_1(t) * w(t)$ 。

在本方案中,在协作系统的第 j 个符号周期内,中继节点积分器的输出为

$$\begin{aligned} z_j &= \int_{jT_f + c_jT_c + T_d}^{jT_f + c_jT_c + T_d + T_l} r_j(t) r_j(t - T_d) dt = \\ &\beta_1 \int_0^{T_l} x_j h_1(t)^2 dt + \sqrt{\beta_1} \int_0^{T_l} x_j h_1(t) n_1(t - T_d) dt + \\ &\sqrt{\beta_1} \int_0^{T_l} h_1(t) n_1(t) dt + \int_0^{T_l} n_1(t) n_1(t - T_d) dt = \\ &\beta_1 \left(\int_0^{T_l} h_1(t)^2 dt \right) x_j + N_1 + N_2 + N_3 \end{aligned} \quad (8)$$

式中, T_l 表示积分时间。由上式可知,判决变量 z_j 由两部分组成:第一项为接收信号中数据脉冲和参考脉冲的相关输出量,是进行判决恢复所需要的有用信息;后三项都是噪声,可以统一表示为 n_j 。根据中心极限定理,可以近似认为 n_j 是均值为零、双边功率谱密度为 $N_0/2$ 的高斯分布白噪声。当中继节点完成信号接收后,对接收信号进行放大。为了获得最大分集-复用增益,其放大系数满足以下条件:

$$\alpha^2 \leq \frac{\left(\int_0^{T_l} h_1(t)^2 dt \right)^{-1}}{\beta_1^2 \rho_1^2 \left(\int_0^{T_l} h_1(t)^2 dt \right) + N_0/2} \quad (9)$$

式中, ρ_1 为控制增益,在第二个时隙转发的信号可以表示为

$$Y = \alpha \sqrt{\beta_2} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \alpha \beta_1 \rho_1 \left(\int_0^{T_l} h_1(t)^2 dt \right) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.3 最大似然接收

根据非正交放大转发协议,目的节点接收到的信号分为两个时隙,假定第一个时隙接收到的信号为 D_I ,第二个时隙接收到的信号为

$$D_{(4 \times 1)} = \begin{bmatrix} D_I \\ D_{II} \end{bmatrix} = \tilde{H} X + n = \tilde{H} M_p A + n \quad (11)$$

其中:

$$\tilde{H} = \begin{bmatrix} \beta_1 \left(\int_0^{T_l} h_0(t)^2 dt \right) I_2 & 0 \\ \alpha^2 \beta_1 \beta_2 \rho_1 \left(\int_0^{T_l} h_1(t)^2 dt \right) \left(\int_0^{T_l} g'_1(t)^2 dt \right) I_2 & \beta_2 \left(\int_0^{T_l} h_0(t)^2 dt \right) I_2 \end{bmatrix}$$

$$n = \begin{bmatrix} n''_1 \\ n''_2 \\ \alpha^2 \beta_2 \left(\int_0^{T_l} g'_1(t)^2 dt \right) n_1 + n'_1 * g'_1(t) \\ \alpha^2 \beta_2 \left(\int_0^{T_l} g'_1(t)^2 dt \right) n_2 + n'_2 * g'_1(t) \end{bmatrix}$$

接收端接收到信号后,在一个协作周期内,对符号信息进行最大似然估计:

$$\hat{A} = \arg \min_A \| D - \tilde{H} M_p A \|_F^2 \quad (12)$$

此时系统的成对错误概率为

$$P_e(A^{(i)} \rightarrow A^{(j)} | \tilde{H}) = Q \left(\frac{d(A^{(i)}, A^{(j)})}{2} \right) \quad (13)$$

其中:

$$Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp \left(-\frac{x^2}{2 \sin^2 \theta} \right) d\theta \quad (14)$$

且有:

$$\begin{aligned} d^2(A^{(i)}, A^{(j)}) &= \frac{E_s}{N_0/2} \| \tilde{H} M_p (A^{(i)} - A^{(j)}) \|_F^2 = \\ &\frac{E_s}{N_0/2} \| \tilde{H} M_p E \|_F^2 \end{aligned} \quad (15)$$

式中, E_s 为每个信息符号的发送功率。因此,成对错误概率为

$$\begin{aligned} P_e(A^{(i)} \rightarrow A^{(j)}) &= E_h \left[Q \left(\frac{d(A^{(i)}, A^{(j)})}{2} \right) \right] = \\ &\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} E_h \left[\exp \left(-\rho \frac{h^T U^T U h}{8 \sin^2 \theta} \right) \right] d\theta \end{aligned} \quad (16)$$

由得到的成对错误概率可知,当 $\det(\mathbf{U}^T \mathbf{U}) \neq 0$, 且编码增益函数满足条件 $(1/12)\det(\mathbf{U}^T \mathbf{U})$ 时,协作通信系统传输性能可以随着信噪比的增加趋近上限。

3 仿真分析

IEEE 802.15.4a 工作组所定义的信道模型是一种经典的低速、脉冲超宽带通信系统信道传输模型^[6]。本文选择其中多径分量较少的室内视距传输环境 CM1 和室内非视距传输环境 CM2 作为协作系统节点之间的通信信道模型。由于 CM1 信道和 CM2 信道的均方根延迟扩展分别为 16 ns 和 19 ns, 为了使仿真系统不出现符号间干扰, 因此, 本文选择仿真系统的传输速率为 1 Mbit/s, 其它系统的仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数	
Table 1 Simulation parameters	
参 数	取 值
脉冲波形	Scholtz 单周脉冲
脉冲成形因子/ns	0.25
脉冲宽度/ns	0.5
比特脉冲重复数	1
TH 码最大值	20
TH 码片时间/ns	1
TH 码周期	1 000
帧周期/ns	200

假定协作通信系统的三节点之间的距离相等, 功率分配为 $\beta_1 = 2\beta_2 = -30$ dBm 时, 图 3 和图 4 显示了协作系统在 CM1 和 CM2 环境下的仿真性能。

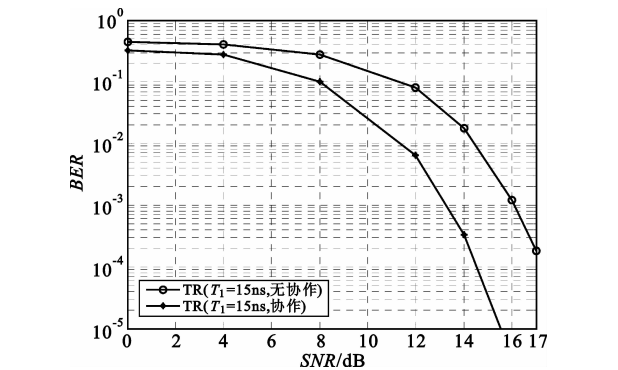


图 3 CM1 下系统仿真结果
Fig.3 Simulation result of system in CM1

在 TR 超宽带通信系统中, 积分时间是影响接收机性能的关键。由于协作通信系统会产生多径分

量累积, 因此相对于传统的 TR 接收机, 协作系统的目的节点必须采用较长的积分时间才能收集到有效的多径分量。然而, 由于接收机使用的是带噪声的相关模板, 随着积分时间的增加, 收集的有用信号分量增大, 噪声也增大了。为了验证模拟合并协作通信系统的有效性, 本文为协作系统和非协作系统选择了相同的积分时间, 其中, 15 ns 为视距信道模型 CM1 环境下通信系统的积分时间, 75 ns 为非视距信道模型 CM2 环境下通信系统的积分时间。当比特率 (BER) 为 10^{-3} 时, 图 3 和图 4 分别显示了协作系统误码率可以获得 3.5 dB 左右以及 3 dB 左右的提升。

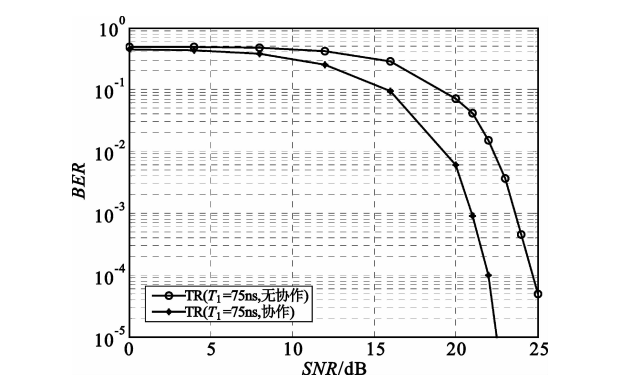


图 4 CM2 下系统仿真结果
Fig.4 Simulation result of system in CM2

分析图 3 和图 4 可知, 采用模拟合并转发技术, 协作通信系统不需要延长积分时间就可以有效地捕获接收机判决所需的多径分量, 与 2.3 节的分析相符, 从而验证了中继节点的模拟合并预处理模块可以有效地消除由于协作而产生的多径分量累积。协作通信系统利用简单的 TR 接收技术就可以直接获得协作分集所带来的传输增益。

4 结 论

为了解决协作通信产生的多径分量累积问题, 本文对非正交放大转发协议进行了修正, 研究了一种频率选择性信道下超宽带协作通信方案。该方法类似于检测转发协作通信方案, 但是由于利用了传输参考技术, 因此中继节点实现结构更为简单, 无需数字处理模块。在中继和目的节点利用模拟相关器和积分器, 实现了多径分量的两级收集。该方法无需复杂的信道估计就可获得优于无协作通信系统的传输性能。但是, 该方法所获得的增益离协作通信系统的增益上限还有一定的距离。

本文的工作主要是对无符号间干扰下的超宽带协作通信系统的传输性能进行了分析。在今后的工作中,将对存在符号间干扰条件下的模拟合并协作通信系统的复用分集增益、中断概率等问题进行深入分析。

参考文献:

[1] Yang L, Giannakis G B. Ultra - wideband communications: An idea whose time has come [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2004, 21(6): 26 - 54.

[2] Laneman J N, Tse D N C, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062 - 3080.

[3] 郭希蕊, 雷维嘉, 谢显中. 一种基于检测转发方式的酉空时协作分集技术[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2008, 20(5): 521 - 524.

GUO Xi - rui, LEI Wei - jia, XIE Xian - zhong. A unitary space - time cooperative diversity based on detect and forward method [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2008, 20(5): 521 - 524. (in Chinese)

[4] Abou - Rjeily C, Daniele N, Belfiore J C. On the amplify - and - forward cooperative diversity with time - Hopping ultra - wideband communications [J]. IEEE Transactions on Communication, 2008, 56(4): 630 - 641.

[5] Ding Y, Zhang J K, Wong K M. The amplify - and - forward half - duplex cooperative system; Pairwise error probability

and pre - coder design [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(2): 605 - 617.

[6] FOESTER J. Channel Modeling Sub - committee Report Final [R]//IEEE P802.15 - 02/368r5 - SG3a. [S. l.]: IEEE, 2002.

作者简介:

钱 慧(1977 -),女,湖北监利人,2004 年获工学硕士学位,现为福州大学物理与信息工程学院博士研究生、讲师,主要研究方向为无线传感器网络、超宽带通信、压缩感知理论及应用;

QIAN Hui was born in Jianli, Hubei Province, in 1977. She received the M.S. degree in 2004. She is currently working toward the Ph.D. degree and is also a lecturer in College of Physics and Information Engineering at Fuzhou University. Her research interests include wireless sensor networks, ultra - wideband communication, compressed sensing theory and application.

Email: qianhui9@vip.sina.com

余 轮(1952 -),男,福建福清人,福州大学物理与信息工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为多媒体通信系统;

YU Lun was born in Fuqing, Fujian Province, in 1952. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor with College of Physics and Information Engineering at Fuzhou University. His research direction is multimedia communication system.

郑海峰(1978 -),男,福建莆田人,福州大学物理与信息工程学院讲师,主要研究方向为无线传感器网络、认知无线电。

ZHENG Hai - feng was born in Putian, Fujian Province, in 1978. He is now a lecturer with College of Physics and Information Engineering at Fuzhou University. His research interest include wireless sensor network and cognitive radio.

《电讯技术》2008 ~ 2010 年论文发表情况比较

本刊自 2008 年 1 月起刊期变更为月刊来,载文量明显增大,基金项目论文的比例呈增长趋势,充分说明本刊在促进学术交流和科技创新方面取得了一定的成绩。

年度	发表论文篇数	基金项目论文比例
2008	315	30%
2009	270	41%
2010	319	43%