

协作超宽带中的转发时延分配方法

吴宣利, 林迪, 白旭, 邱昕

(哈尔滨工业大学 通信技术研究所, 哈尔滨 150001, xlwu2002@hit.edu.cn)

摘要: 在研究现有线性转发时延分配方法的基础上, 提出了非线性的转发时延分配方法, 并通过理论分析证明了根据等概率的分配方式所得到的转发信号冲突概率是最小的. 数值计算结果表明, 相比于传统的线性转发时延分配方法, 本文方法可以有效地降低转发信号的冲突概率, 从而保证协作超宽带系统的性能增益.

关键词: 超宽带; 协作通信; 中继; 转发时延

中图分类号: TN914.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)09-1383-05

Forwarding time delay allocation method in cooperative ultra-wideband communications

WU Xuan-li, LIN Di, BAI Xu, QIU Xin

(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China, xlwu2002@hit.edu.cn)

Abstract: In this paper, the existing linear forwarding time delay allocation methods are analyzed, and then a non-linear forwarding time delay allocation method is proposed for cooperative ultra-wideband system. Theoretical analysis verifies that the minimum conflict probability can be obtained using the proposed method with equal probability. Numerical results show that compared with traditional linear time delay allocation methods, the proposed method can reduce the conflict probability of forwarding signals efficiently, and the performance gain of the cooperative ultra-wideband systems can be obtained.

Key words: ultra-wideband; cooperative communication; relay; forwarding time delay

近年来,超宽带技术以其低功率谱密度、高多径分辨率等优点已成为未来短距离无线互联以及无线传感器网的候选技术之一^[1-2],为了避免对现存系统造成干扰,美国联邦通信委员会于2002年发布了关于超宽带技术的“First Report and Order”,在容许了超宽带技术商业应用的同时,也对超宽带发射机在室内和室外应用时的有效全向辐射功率(Effective Isotropic Radiated Power, EIRP)做出了严格的限制.其中,在超宽带发射机工作频段3.1~10.6 GHz处的峰值EIRP为-41.3 dBm/MHz,由于这一峰值EIRP非常低,导致超宽带接收机接收到的信号功率也非常低,

从而加大了超宽带接收机设计的难度^[2].为了保证接收信号的质量,同时降低超宽带接收机的复杂度,文献[3]提出将协作通信引入到超宽带系统中.

协作通信技术的基本思想起源于文献[4]所提出的三终端中继信道,在该文献中还得到了中继信道容量的上下限,文献[5]则在文献[4]的基础上分析了中继信道的信息论特性.但是由于中继信道在信息论方面难于得到新的和更好的结论,同时实现中继的过程中也存在着许多技术难题,因此对于协作通信的研究在上世纪80年代初期进入了瓶颈期.近些年来,由于文献[6-7]的杰出工作,协作通信技术再一次受到了研究人员的广泛关注,在这两篇文献中,作者提出了一个在上行链路的条件下以分集形式建立的用户协作模型,并采用多种方法验证了所提模型的有效性.

通过将协作技术引入到超宽带系统中,利用

收稿日期: 2009-07-14.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2007CB310601); 新一代宽带无线移动通信网科技重大专项(2009ZX03004-001); 哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划资助(HITQNS.2009.061).

作者简介: 吴宣利(1980—),男,讲师.

协作技术既可以提高接收信号的质量,同时还可以降低超宽带发射机的发射功率,从而延长节点的待机时间.但是由于超宽带接收机的复杂度限制以及超宽带信道的密集多径特性所导致的长时延扩展,使得超宽带接收机难于实现有效的分集合并,因此在协作超宽带系统中,一般仅仅选择一个中继节点,即仅仅建立一条有效的中继路由来实现对于发射信号的中继.由于每一个节点周围都存在着多个可能的中继节点,因此如何选择有效的中继节点便成为一个必须解决的问题,现有很多文献所提出的反馈式中继节点选择方法,或者是同步的中继节点选择方法仅仅考虑了在 Ad hoc 网络条件下的中继节点选择问题,而并没有考虑超宽带系统对于中继节点选择方法的简单化、实时化等特殊要求,因此不适合于直接应用到协作超宽带系统中.当采用反馈式的中继节点选择方法时,反馈的信息需要额外的发射能量,即使很少比特数的反馈信息也将耗费大量的节点能量,因此为了保证中继节点选择方法的简单化和实时化等要求,协作超宽带系统中的中继节点选择方法应该是异步无反馈的,但是这样带来的问题就是如何保证多个异步中继节点的转发信号到达接收端的冲突最小化.文献[3]介绍了采用 RTS/CTS 的中继转发时延分配方法,在这种方法中,中继节点根据两条子链路信道增益计算出由源节点到目的节点的信道增益,并将转发时延设置为同该信道增益成反比的形式.文献[8]指出,RTS/CTS 中继转发时延分配方法中采用信道的增益来决定转发时间 T_1 是不合适的,因为信道的增益并不能完全反应实际链路的质量.基于此,文献[9]提出了一种采用误码率来评价信道质量的方法,将转发时延设置为同误码率成正比的形式.然而,上述文献中的方法对应的中继转发信号到达接收端时的冲突概率都较大,从而使得系统的性能有所下降.基于以上问题,本文提出了一种新的非线性转发时延分配方法,利用这一方法可以有效地降低中继转发信号在接收端的冲突概率,从而保证协作超宽带系统的性能增益.

1 协作超宽带系统模型

在协作超宽带系统中,为了降低系统复杂度和系统开销,采用无中心节点的 Ad hoc 网络模型.在这种网络模型中,每个节点既可以是信息的源节点(S 节点),也可以是目的节点(D 节点),还可以是源信息的中继转发节点(R 节点).但在一次通信过程中,每一个节点只是源节点、目的节

点和中继转发节点其中的一种.因此,在一次通信过程中,协作超宽带系统由一对源节点和目的节点以及 M 个中继节点组成,模型示意图如图 1 所示.

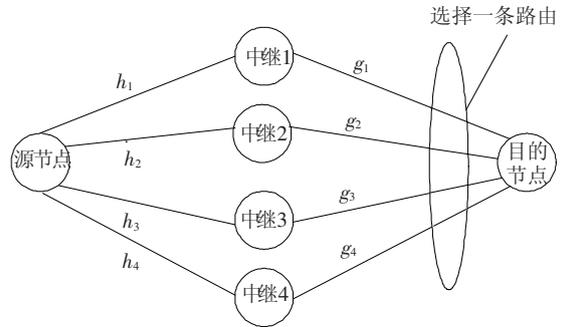


图1 协作超宽带系统模型示意图

虽然每次源节点发出请求,应答的中继节点可能多于1个,但是为了节省超宽带中继节点的能耗,降低整个网络的复杂度,每次通信的过程中只选取一个节点作为源节点和目的节点之间的中继,因此超宽带协作通信可以分为两个步骤:1) 首先源节点发出导频信号以确定这次通信过程中选取的中继节点,从而确定通信的路由;2) 确定选取的路由后,源节点再发送数据信息信号,该数据信息信号通过中继节点到达目的节点.

由图1可知,在路由选择阶段,模型中 M 个中继节点为源节点到目的节点的通信提供了 M 条路由,这 M 条路由对应的信道增益有所不同,则源节点选择不同的路由通信时信号到达目的节点的衰减程度也不同,从而对应的接收端的性能增益也会有所不同.因此,需要通过一定的算法从这 M 条路由中选择性能增益最好的一条,在本文中采用误码率作为衡量性能增益的标准.

路由选择的过程主要分为以下3个步骤:首先,源节点发出导频信号,并选择若干个可行的中继节点对导频信号进行转发;其次,各个中继节点转发来自源节点的信号,并将接收到的源节点信号的信噪比也传输给目的节点;最后,目的节点计算出源信号通过各个中继转发节点到达目的节点时对应的误码率,并选择误码率最小的路由对应的中继节点作为转发数据信息信号的中继节点,并将选择情况以广播的方式通知源节点和中继节点.在上述步骤中,最为关键的一个步骤就是中继节点对源节点发送的导频信号进行转发.为了避免各个中继节点转发的信号到达目的节点时产生冲突,造成接收到的多个信号相互干扰,必须有效地对中继节点的转发时延进行合理的分配.下面对现有的线性转发时延分配方法进行介绍.

2 线性转发时延分配方法

为了有效地降低各个中继转发信号到达目的节点时彼此之间的冲突,在现有的中继转发时延分配方法中,往往将各个中继节点对应的信道质量同此中继节点转发的时延之间建立一定的映射关系,尽管衡量信道质量优劣的标准有所不同,但对于不同的信道质量都采用线性的映射方式来得到中继的转发时延.因而,把他们统称为线性转发时延分配方法.

文献[3]中介绍了采用 RTS/CTS 的中继转发时延分配方法.在这种方法中,目的节点和源节点分别发送导频信号给各个中继节点,中继节点 l 得到源节点到中继节点以及中继节点到目的节点这两条子链路信道增益 X_l 和 Y_l .中继节点根据 X_l 和 Y_l 计算出由源节点到目的节点的信道增益 S_l ,计算的方法有两种,一种方法采用 X_l 和 Y_l 中较小的值作为源节点到目的节点的信道增益 S_l ,表达式如下:

$$S_l = \min \{ |X_l|, |Y_l| \}.$$

另外一种方法采用 X_l 和 Y_l 的调和平均值作为由源节点到目的节点的信道增益 S_l ,表达式为

$$S_l = \frac{2 |X_l| |Y_l|}{|X_l| + |Y_l|}.$$

此时,中继节点 l 的转发时延 T_l 可以表示为

$$T_l = \frac{\beta}{S_l}. \quad (1)$$

其中, β 是一个常数.

然后,各个中继节点根据式(1)算出的中继转发时延将信号转发给目的节点,从而由目的节点选择最先到达的信号对应的中继节点转发数据.可以看到,在 RTS/CTS 的中继转发时延分配方法中,中继节点 l 的转发时延 T_l 是根据信道增益的大小来决定的,即信道的增益越大,转发时间越小.但是信道的增益并不能完全反应实际链路的质量,因此文献[9]提出利用误码率来评价信道质量的方法,并将中继转发时延设置为下面的式子

$$T_l = \beta \cdot B_{\text{BER}}.$$

其中: B_{BER} 为误码率.即信道的误码率越大,信道的质量越差,从而相应的中继转发时延也就越长.

由此可知,以上两种方法在单径信道中能够有效地降低中继转发信号到达接收端冲突的概率.然而,室内超宽带通信往往处于密集的多径环境中,且信道增益以 dB 为单位时呈现正态分布.因而,信道增益往往集中在正态分布的均值附近,

两个中继节点的转发时延相隔较短,当这个时间间隔小于信道的多径时延扩展时,两个中继转发的信号就会在目的节点处相互干扰,从而造成目的节点难以对信号进行解调.因此,有必要提出一种适合室内超宽带密集多径环境下的中继转发时延分配方法.

3 非线性转发时延分配方法

3.1 转发时延与信道增益的映射关系

在线性中继转发时延分配方法中,对于不同的信道增益采用线性的映射方式来得到中继的转发时延.而超宽带室内密集多径信道中,信道的增益以 dB 为单位时,呈现正态分布^[10],图 2 表示的是均值为 -20 dB,方差为 3 dB 的信道增益分布情况.对于相同长度的信道增益区间,越接近正态分布的均值时对应的概率越大,越远离均值时对应的概率越小.因此,大量的集中在均值附近的信道增益对应的中继转发时延必然会导致转发信号之间存在较大的干扰.传统的线性中继转发时延分配方法如图 3 所示,每一段区间的长度均为 2Δ .为了避免均值附近的信道增益对应的中继转发信号之间的干扰,提出了一种采用非线性的中继转发时延的分配方法,即对于均值附近的信道增益区间“细分”,对于远离均值的信道增益区间“粗分”,并保证信道增益落入每一段区间的概率是相同的.然后,再将这些概率相同的区间分别映射到中继转发的时延上,并且相邻两个区间对应的时延差大于多径信道的最大时延扩展,从而能够降低各个中继转发信号到达目的节点时的冲突.本文所提出的非线性中继转发时延分配方法如图 4 所示.由图中可以看到,每一段区间的长度各不相同,但是信道增益的值落入每一段区间的概率是相同的,这样就可以有效保证在均值附近的信道增益对应的转发时延能够得到有效区分.

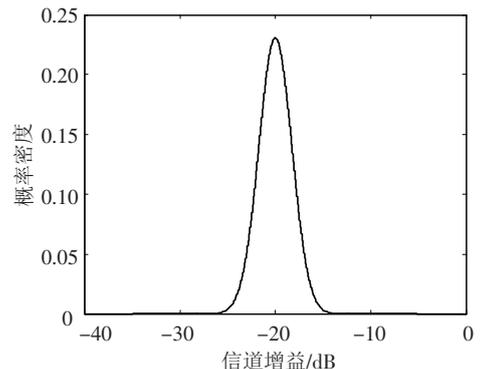


图2 信道增益的概率分布

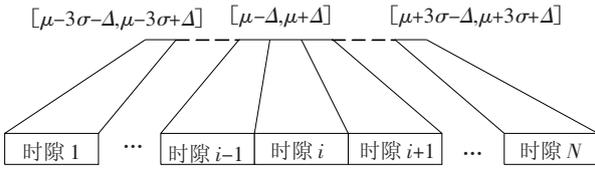


图3 线性的中继转发时延分配方法

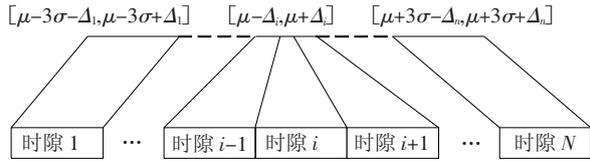


图4 非线性的中继转发时延分配方法

3.2 转发信号冲突概率

基于以上的分析,接下来计算分别采用线性和非线性转发方法时对应的目的节点处不同中继转发信号冲突的概率.由于以 dB 为单位的信道增益 X 呈现正态分布,即 X 的概率密度函数为

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

根据正态分布的特性, X 在 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 内的概率达到 99.7%,因而,这里近似的认为 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 这一区间内涵盖了所有信道增益 X 的情况.

对于线性的中继转发方法,整个区间 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 线性的分成 N 份,每一段区间长度为 $\Delta = 6\sigma/N$.因而,设信道增益 X 落入第 i ($i = 1, 2, \dots, N - 1$) 段区间的概率为 p_i ,则 k ($k < N$) 个中继转发信号中至少存在两个在同一时隙内到达的概率 p ,表达式如下:

$$p = 1 - (k!) \times \sum_{i_m(i_m < i_n \text{ 且 } i_m, i_n = 1, 2, \dots, N)} p_{i_1} p_{i_2} \dots p_{i_k} \quad (2)$$

其中,对于每一个转发信号落入第 i ($i = 1, 2, \dots, N - 1$) 段区间的概率 p_i 可以表示为

$$p_i = \int_{\mu-3\sigma+(2i-3)\Delta}^{\mu-3\sigma+(2i-1)\Delta} f(X) dX$$

对于线性的中继转发方法,每个区间的概率 p_i 是确定的,然而此时对应的中继转发信号冲突概率并不是最小的.在所提的非线性转发方法中,为了求解得到最小的转发信号冲突概率,下面将每一个转发信号落入第 i ($i = 1, 2, \dots, N - 1$) 段区间的概率 p_i 视为变量,且它们满足之和为 1 的约束条件.从而,求概率 p 的最小值问题可以归结为一个存在约束条件的非线性规划问题,即

$$\min p = 1 - (k!) \times \sum_{i_m(i_m < i_n \text{ 且 } i_m, i_n = 1, 2, \dots, N)} p_{i_1} p_{i_2} \dots p_{i_k}$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^N p_i = 1 \text{ 且 } 0 \leq p_i \leq 1 (i = 1, 2, \dots, N).$$

据非线性规划中的 Karush-Kuhn-Tucker 最优优化条件^[11]为

$$S = p + \lambda(1 - \sum_{i=1}^N p_i), \lambda \geq 0.$$

其中: λ 为一常数; p 由式(2)表示.令 S 对 p_i 求偏导为 0,即

$$\frac{\partial S}{\partial p_i} = 0, i = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

由式(3)计算可得 $p_1 = p_2 = \dots = p_N$,再根据约束条件,可得 $p_1 = p_2 = \dots = p_N = 1/N$.此时, $p = 1 - N!/((N - k)!N^k)$,达到了冲突概率的最小化.因此,本文中提出的将每段区间的概率调整为相同时,采用的非线性中继转发时延分配方法可以最有效地避免转发信号到达目的节点时相互之间的冲突.

4 数值计算结果分析与比较

图5给出了中继数 $k = 5$,采用线性和非线性中继转发时延分配方法对应的目的节点处各个中继转发信号冲突的概率与区间划分数 N 的关系.

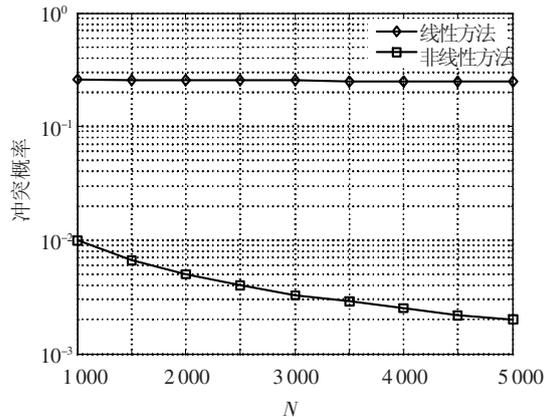


图5 中继转发信号冲突的概率与区间划分数 N 的关系

由图5可见,随着区间划分数 N 的增加,线性与非线性转发时延分配方法中各个中继转发信号冲突的概率都会有所减小,但是本文所提出的非线性转发时延分配方法下降的速度更快一些,当 $N = 5000$ 时,本文所提方法将冲突概率降低为原有方法的 1%.

图6给出了区间划分数 $N = 5000$ 时,采用线性和非线性中继转发时延分配方法对应的目的节点处各个中继转发信号冲突的概率与中继数 k 的关系.

由图6可得,随着中继数 k 的减小,虽然两种方法的冲突概率均有所下降,但是本文所提方法的冲突概率下降得比较快,这样意味着本文所提

方法在中继数比较小的时候其性能更好一些。

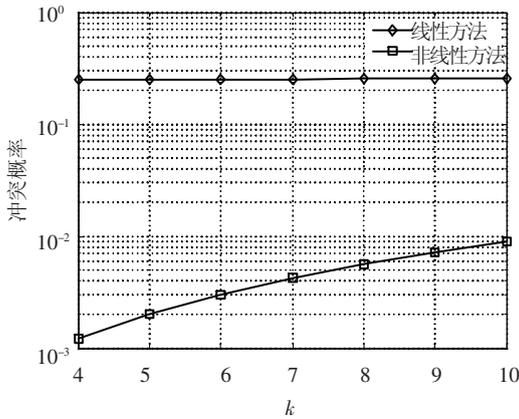


图6 中继转发信号冲突的概率与中继数 k 的关系

因此,本文提出的非线性中继转发时延分配方法可以有效地降低各个中继转发信号到达目的节点时相互之间发生冲突的概率;同时,针对不同的冲突概率要求,可以通过适当地选择中继数 k 以及区间划分数 N 的值来实现. 因此,本文所提的中继转发时延分配方法具有更大的适应性,同时也可以有效保证协作超宽带系统的性能增益。

5 结论

将协作技术引入到超宽带系统中可以有效地提高超宽带系统的性能,本文在 Ad hoc 方式的协作超宽带系统下,研究了中继转发的中继选择过程中的时延分配方法,针对现有线性转发时延分配方法所存在的冲突概率比较高的问题,提出了一种非线性的转发时延分配方法,并通过将其转化为非线性规划的问题,利用 Karush-Kuhn-Tucker 最优化条件得到了等概率的分配方法所得到的转发信号冲突概率是最小的这一结论. 此外,本文还针对不同的参数,比较了原有方法和本文所提方法的冲突概率,结果表明所提方法的转发信号冲突概率随着划分区间数 N 的增大以及中继数的减小而显著降低,而原有方法则基本保持不变,在中继数为 5,划分区间数为 5 000 时,所提方法可将冲突概率降低为原有方法的百分之一. 在不同的系统中,可以根据对于冲突概率的要求来调整中继数以及划分区间,从而实现满足要求的中继选择,进而保证协作超宽带系统的性能增益。

近些年来,超宽带技术在无线传感器网络中也受到了广泛的关注,但是无线传感器网络的信道模型同本文所采用的信道模型有较大差异,因

此,在后续的研究工作中,将针对其它的信道模型,寻找到最优的中继转发时延分配方法以保证协作超宽带系统的性能。

参考文献:

- [1] SHENG H, ORLIK P, ALEXANDER M, *et al.* On the spectral and power requirements for ultra-wideband transmission [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. Anchorage: IEEE, 2003: 738 - 742.
- [2] WIN M Z, SCHOLTZ R A. Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(4): 679 - 691.
- [3] ZHU S, LEUNG K. Distributed cooperative routing for UWB ad-hoc networks [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. Glasgow: IEEE, 2007: 3339 - 3344.
- [4] Van D N. Three-terminal communication channels [J]. Advanced Applied Probability, 1971, 3: 120 - 154.
- [5] COVER T, GAMAL A E. Capacity theorems for the relay channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1979, 25(5): 572 - 584.
- [6] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity-part 1: system description [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1927 - 1938.
- [7] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity-part 2: implementation aspects and performance analysis [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1939 - 1948.
- [8] CEMAL A, NABAR R U, LEUNG K K. A PHY/MAC approach to wireless routing [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. Istanbul: IEEE, 2006: 4474 - 4478.
- [9] BLETSAS A, KHISTI A, DAVID P R, *et al.* A simple cooperative diversity method based on network path selection [J]. IEEE Journal on Selected Areas of Communications, 2006, 24(3): 659 - 672.
- [10] 葛利嘉, 朱林, 袁晓芳, 等. 超宽带无线电基础 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [11] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

(编辑 张宏)