

有效利用协同空间复用的“绿色”资源分配策略

李建东, 张 琰, 盛 敏, 田 野, 姚俊良

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 信息科学研究所, 陕西西安 710071)

摘要: 构建绿色环保的移动通信网络已成为构建和谐社会的一个组成部分. 针对未来通信系统的节能问题, 提出了一种有效利用协同空间复用的资源分配策略. 该策略通过动态调整源节点的发送功率和协作水平来控制参与协同的节点数, 从而能够很好地为不同业务提供 QoS 保证, 并且最大限度地节约系统资源的消耗. 通过仿真验证了该算法在中断概率和节约系统资源方面的良好性能.

关键词: 绿色通信; 编码协同; 资源分配; 服务质量

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A

A green resource allocation strategy for utilizing cooperative spatial multiplexing

LI Jian-dong, ZHANG Yan, SHENG Min, TIAN Ye, YAO Jun-liang

(The State Key Lab of ISN, and Information Science Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Building green communication systems is a part of building the harmonious society. A novel resource allocation algorithm was proposed to reduce the energy consumption of future communication systems by utilizing cooperative spatial multiplexing. In this algorithm, the number of cooperative nodes was determined by source power control and level of cooperation (LOC) adjustment to minimize the energy consumption of the system under the QoS constrains. Simulation results show that the performance of the scheme is superior to those of existing algorithms.

Key words: green communication; coded cooperation; resource allocation; quality of service

0 引言

当前我国已经成为世界通信第一大国, 移动用户高达 5 亿多. 那么由于移动通信网络庞大的规模所带来的能耗、辐射、站址等问题就成为我们设计通信系统以及设备时必须重点考虑的问题. 根据能耗的高低, 我们可以将通信网络分为三个部分, 即接入部分、核心部分及传送部分^[1]. 其中, 接入部分的能

耗占到整个通信系统能耗的 50%~70%, 因此降低接入部分的能耗是通信系统节能的重点, 也是构建绿色环保移动通信网络的基础.

另一方面, 随着通信系统的发展, 一些新技术也不断涌现. 这也为设计绿色通信系统带来了契机, 协同通信技术就是其中的重要组成部分. 协同通信技术充分利用了无线电波的全向传播特性, 使无线网络中的节点相互协作从而达到节点间的资源(天线、

收稿日期: 2009-05-11; 修回日期: 2009-05-28

基金项目: 国家杰出青年科学基金(60725105), 国家重点基础研究发展(973)计划(2009CB320404), 教育部长江学者和创新团队发展计划, 中国高技术研究发展(863)计划(2007AA01Z217), 国家自然科学基金(60972048), 国家重点实验室专项基金(ISN01080301), 教育部新世纪优秀人才支持计划, 高等学校创新引智计划(B08038)和教育部科学技术研究重点项目(107103)资助.

作者简介: 李建东(通讯作者), 男, 1962年生, 博士/教授. 研究方向: 宽带无线通信技术、移动通信、软件无线电、ad hoc 网络等.
E-mail: jdli@mail.xidian.edu.cn

频谱、功率等)的充分共享^[2,3]. 这样,协作通信技术可以有效降低整个系统的功耗,增加用户的吞吐量,增强对小区边缘用户的覆盖. 因此,在现有蜂窝架构下引入协作已经成为未来 B3G 以及 4G 通信系统中接入部分的重要解决方案. 当前协同通信的主要方式有:放大中继(amplify-and-forward, AF),解码中继(decoded-and-forward, DF),编码协同(coded cooperation, CC)等方式^[2,4]. 相对于其他协同方式,编码协同方式将协同通信技术和信道编码技术相结合,在不消耗更多系统资源(带宽等)的前提下获得增益^[5],从而得到了人们的广泛关注和认同.

以往的研究中,大都通过利用协同空间分集增益(如分布式空时编码、选择分集等)来提高传输的可靠性. 然而在 B3G 或 4G 系统中基站是多天线的,并且中继协作节点到基站的链路条件往往比较理想,所以在该场景下如何充分利用协同带来的复用增益来提高上行链路的性能成了当前研究的热点^[6,7]. 文献[6]给出了在 AF 协作方式下协作复用的基本工作模式. 文献[7]研究了在 DF 协作方式下,考虑协作复用后如何对协作节点进行选择的问题. 然而在这些研究中并没有考虑节点的功率控制以及协同比例的调整这些重要的资源分配问题. 因此在本文中我们研究了基站为多天线、采用编码协同方式下,如何高效地利用系统资源、更好地利用协作复用来提高系统的性能. 我们建立了在保证业务 QoS 条件下以最小化系统能耗为目标的最优化模型并得到相应的优化策略. 该策略通过动态调整源节点的发送功率和协作水平,从而控制参与协同的节点,进而在为业务提供 QoS 保证的条件下最大限度地节约了资源的消耗. 仿真结果表明该算法在中断概率和节约系统资源方面均有良好性能.

1 系统模型及相关定义

我们构建如图 1 所示的网络,其中有 U 个单天线的用户(UE)、 V 个单天线的中继节点(Relay)以及 1 个有 M_r 根天线的基站(BS). 从实际角度出发,我们假定每个 UE 和 Relay 均有单独的功率约束. 另外,不失一般性我们假定 UE 和 Relay 的传输功率在 0 和 P_{\max} 之间并且每个 UE 承载着不同 QoS 需求的业务. 我们这里假定 BS 能够获得 UE 到 Relay 和 Relay 到 BS 的信道信息. 另外系统的接入方式可以为 TDD 和 FDD,这里我们以 TDD 为例来进行分析,即每一时刻仅有一个 UE 和 BS 进行通

信称其为源节点,所有源节点可达的中继节点在当前时刻均可以为该源节点提供协作.

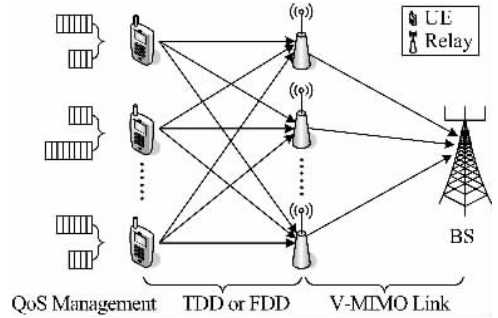


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

1.1 编码协同

在编码协同方式中,源节点将经过编码(rate-compatible punctured convolutional codes, RCPC)后的 N 个符号分为两个阶段进行传输. 在第一个阶段,源节点发送 N_1 个符号, $N_1 = \alpha N$. 这里, α 定义为协同水平, $\alpha = N_1/N$,其中包含原始信息和部分校验码. 第二个阶段为协作阶段,只有能够正确接收源节点信息的中继节点才能够参与到第二阶段,这些中继节点对收到的信息进行重新编码得到剩余的校验码字并发送给目的节点. 正确解码第一个阶段信息的条件为

$$I(S; k) = \alpha \log_2(1 + \gamma_{S,k}) = \alpha \log_2 \left(1 + \frac{P_S |h_{S,k}|^2}{N_{S,k}} \right) \geq R, k \in V \quad (1)$$

即当前信道的瞬时互信息量要大于源节点的信息传输速率 $R/(\text{bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1})$. 其中 P_S 为源节点在第一阶段的发射功率; $h_{S,k}$ 表示源节点到中继节点 k 的信道增益. 我们假设信道为准静态信道,即在一次传输过程中信道条件不发生变化. 噪声为服从 $CN(0, N_{S,k})$ 分布的加性高斯白噪声. 我们将这些中继节点的集合记为

$$\Omega_S = \{R_i \mid I(S; k) \geq R, k \in V\} \quad (2)$$

令 $M_i = |\Omega_S|$, 即正确解码的中继节点个数. 根据第二阶段中继节点的传输方式不同可以分为协同分集和协同复用两种模式,如下所述.

1.2 协同分集

如果中继节点以协同分集方式进行传输,那么在第二阶段,每个正确收到源节点信息的中继通过编码得到 N_2 个校验信息,并且一起将这 N_2 个校验信息传送给 BS,如图 2 所示. 我们假设信道为准静态信道,即在一次传输过程中信道条件不发生变化. 协

同的两个阶段的信道可看作有条件的高斯平行信道^[5],那么协同分集模式的瞬时互信息量可以表示为

$$I_{SD}(\Omega_S; D) = \alpha \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{N_0} \sum_{j=1}^{M_r} |h_{S,D}|_j^2 \right) + (1 - \alpha) \log_2 \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{N_0} \lambda_i \right) \quad (3)$$

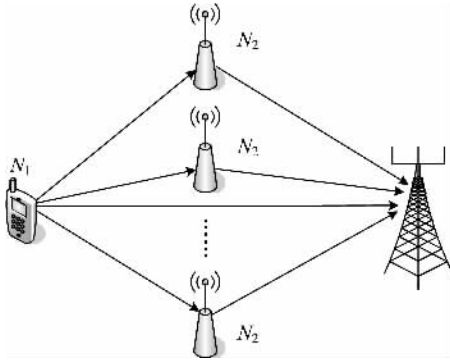


图 2 协同分集

Fig. 2 Cooperative diversity

其中, P_S 为源节点在第一阶段的发射功率; $|h_{S,D}|_j^2$ 表示源节点到目的节点第 j 根接收天线的信道增益模值的平方. 系统相应信道上的噪声均为服从 $CN(0, N_0)$ 分布的加性高斯白噪声. $n = \min(M_t, M_r)$, 为中继节点到基站这一虚拟 MIMO 信道的秩. P_i 为每个子信道上的发送功率, λ_i 为矩阵 \mathbf{W} 的特征值.

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \mathbf{H}\mathbf{H}^*, & M_t > M_r \\ \mathbf{H}^* \mathbf{H}, & M_t < M_r \end{cases} \quad (4)$$

协同分集方式能够获得全分集增益, 提高传输可靠性, 却损失系统容量.

1.3 协同复用

如果中继节点以协同复用方式进行传输, 那么在第二阶段, 每个正确收到源节点信息的中继通过编码得到 N_2 个校验信息, 但每个中继节点仅传输其中的一部分信息, 如图 3 所示. 其中

$$\sum_{i \in \Omega_S} N_{2,i} = N_2 \quad (5)$$

值得注意的是中继节点传输的独立信息流的个数不应超过 BS 的接收天线数, 这就需要对参与协同的中继进行选择. 协同复用方式获得了由多中继带来的复用增益, 提高了系统的容量. 与协同分集相同, 协同的两个阶段的信道可看作有条件的高斯平行信道, 那么协同复用模式的瞬时互信息量可以表示为

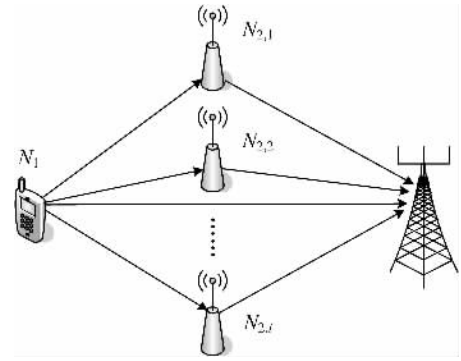


图 3 协同复用

Fig. 3 Cooperative multiplexing

$$I_{SM}(\Omega_S; D) = \alpha \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{N_0} \sum_{j=1}^{M_r} |h_{S,D}|_j^2 \right) + (1 - \alpha) \sum_{i=1}^n \log_2 \left(1 + \frac{P_i}{N_0} \lambda_i \right) \quad (6)$$

我们可以看出协同复用方式中第二阶段的信道互信息量是和独立子信道数成线性增加的, 因此可以承载更高速率的业务. 接下来我们将进一步讨论如何更好地利用协同复用来提高系统性能、降低系统能耗.

2 “绿色”资源分配策略

在保证业务服务质量的条件下尽可能地减少系统资源的消耗是我们“绿色”资源分配策略的目标, 因此我们可以建立如下的最优化模型:

$$\min E_{S-\text{cons}} + \sum_{k \in \Omega_S} \mu_k(P_S) E_{k-\text{cons}} \quad (7)$$

s. t.

$$(I) \mu_k(P_S) = \begin{cases} 1, & P_S \geq \frac{(2^{R/\alpha} - 1)N_{S,k}}{|h_{S,k}|^2} \\ 0, & P_S < \frac{(2^{R/\alpha} - 1)N_{S,k}}{|h_{S,k}|^2} \end{cases}$$

$$(II) I_{SM}(\Omega_S; D) \geq R$$

$$(III) 0 \leq P_S \leq P_{\max}$$

$$(IV) 0 \leq P_k \leq P_{\max}, k \in \Psi.$$

我们设一个数据块的总传输时间为 T , 那么式(7)中 $E_{S-\text{cons}}$ 和 $E_{k-\text{cons}}$ 分别为编码协同第一阶段源节点所消耗的能量以及第二阶段参与协同的中继节点 k 所消耗的能量, 因而, $E_{S-\text{cons}} = \alpha TP_S$, $E_{k-\text{cons}} = (1 - \alpha) TP_k$. 最优化问题(7)的约束条件(I)表示只有在第一阶段正确解码的节点才能进入第二阶段的协同; 约束条件(II)表示必须满足业务传输速率的要求, 为业务提供 QoS 保障; 约束条件(III)和(IV)为节

点本身的功率受限情况,在实际应用中,节点功率不仅仅要大于零并且应该受到峰值功率 P_{\max} 的限制.

通过分析我们可以很容易发现,在信道条件给定时随着第一阶段源节点功率 P_s 和协同水平 α 的变化,集合 Ω_s 中元素的个数在不断变化,随之优化问题(7)的目标函数也在改变,这大大增加了我们分析和求解的难度.因此,我们分别讨论源节点功率和协同水平对整个系统的影响.

2.1 源节点功率调整

在给定协同水平和信道条件下,源节点功率决定了能够参与协同的中继节点集合 Ω_s ,由于所有节点均受到独立的功率约束,因此参与协作的中继节点个数越多能够使用的资源也就越多.我们根据业务的 QoS 需求不同,通过调整源节点的功率,来获得合适的协同节点集合,进而为该业务的 QoS 提供保障.例如,对于某一固定协同水平 $\alpha = 0.75^{[5]}$,在信道条件给定时能够参与协同的节点个数仅和源节点的发射功率相关,我们按照源节点到各个中继节点的信道条件对这些中继节点降序排列,那么源节点使各个中继节点恰好正确解码所需要的发送功率门限分别为 $TH(j)$.我们将这些功率门限构成的集合记为 Θ_{P_s} .

$$\Theta_{P_s} = \left\{ TH(j) \mid TH(j) = \frac{(2^{R\alpha} - 1)N_{s,k}}{|h_{s,k}|^2}, \right. \\ \left. 0 \leq P_s \leq P_{\max}, k \in \Omega_s \right\} \quad (8)$$

因而,源节点的功率 P_s 的变化范围被分为了若干区域,如图 4 所示,在每个区域 $[TH(j), TH(j+1)]$ 能够参与协同的节点个数不发生改变,此时与之对应的协同节点集合为 $\Omega_{TH(j)}$.由此可以看出,我们通过调整源节点的发送功率就可以获得能够满足业务速率要求并且使用中继节点个数最少的集合 Ω_{best} .

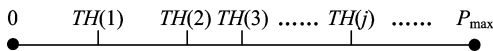


图 4 P_s 取值区域的划分

Fig. 4 Division of P_s 's range

我们可以进一步对 Ω_{best} 中协作中继节点的功率进行优化,典型的算法为注水法.为了降低系统复杂度和反馈开销,我们假定中继节点一旦被选中就以最大功率进行发送.本小节中我们通过调整源节点的发送功率从而获得合适的中继节点集合,那么如何通过协同水平的调整获得更高的系统增益将在接下来的小节中进一步讨论.

2.2 协同水平分配

协同水平是协同系统的重要参数,如图 5,图 6 所示.我们通过调整协同第一阶段和第二阶段的比例,可以在保证中继节点正确解码的条件下尽量提高第二阶段高速链路占用的比例,从而进一步优化系统的性能.但是,当协作水平 α 可变时,原优化问题(7)为非凸优化问题,因此很难找到很好的求解方法.值得庆幸的是 α 的取值和编码方式相关,通常为若干个离散值,我们可以通过简单的一维搜索即可以得到切实有效的次最优值.算法的具体执行过程将在下一节中给出.

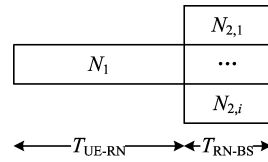


图 5 协同复用的协同水平

Fig. 5 Cooperative multiplexing's LOC

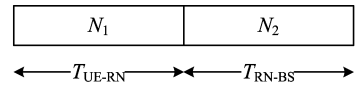


图 6 协同分集的协同水平

Fig. 6 Cooperative diversity's LOC

2.3 算法描述

联合源节点功率调整和协同水平分配这两维的优化过程,我们给出算法的具体过程如下.

Step 1 协同水平 α 的变化范围为 $(0, 1)$, 给定 α 的初值 α_0 及变化步长 Δ . 当然对于不同编码方式 α_0 和 Δ 的取值各不相同,不失一般性,本文中我们令 $\alpha_0 = 0.4, \Delta = 0.05$.

Step 2 对于给定的 α , 根据源节点到协作中继节点的信道状态信息来确定集合 Θ_{P_s} .

Step 3 调整源节点的发送功率,从而获得最合适的协作中继节点集合 Ω_{best} . 如果源节点功率调整到 P_{\max} 仍不能找到合适的协作中继节点集合来满足业务速率的要求,则记为对于该 α 传输中断.

Step 4 对所有给定 α 的分配结果进行比较,从而得到最优的分配方案,即获得源节点的发送功率、参与到第二阶段协同的节点集合以及最优的协同水平这些系统资源分配参数. 如果对于 α 的所有取值均无法满足速率要求则认为中断.

Step 5 将最优的协同分配方案和直接传输进行比较,选择优者:

$$\min\{\min\{\alpha P_s + (1-\alpha) \sum_{k \in \Omega_{\text{best}}} P_k\}, P_{S-\text{direct}}\} \quad (9)$$

3 性能仿真

我们对所提算法和其他协同方式进行了仿真比较. 首先构建一个无线网络, 其中包括 1 个有 M_r ($M_r=4$) 根天线的目的节点, U ($U=8$) 个源节点和 V ($V=8$) 个中继节点, 源节点和中继节点均匀分布在半径为 1 的圆形区域内, 目的节点处于半径为 1.5 的圆上. 该场景可以看作对热点覆盖区域的建模. 信道模型假定为随距离变化的瑞利衰落信道, 两点之间的信道 $h_{i,j}$ 服从 $CN(0, 1/d^\nu)$, d 为两节点之间的距离, ν 为自由空间衰落因子 ($\nu=2.5$), 我们将节点的最大传输功率归一化为单位 1. 这里信噪比 SNR 规定为 $1/N_0$ (SNR=10 dB). 我们假定网络接入方式为 TDMA, 在某一时刻仅有一个节点向目的节点传输信息. 在该场景下我们仿真了随着业务期望的传输速率 R 的不断加不同协作方式以及动态资源分配的性能.

图 7 表明了随着业务速率的增加不同传输方式的中断性能. 可以看出协同分集和协同复用方式通过节点间的相互协作使得其性能均远远优于直接传输方式, 然而协同复用方式充分利用了信道容量, 相对于协同分集方式有更高的增益, 对高速率业务有更好的支持. 另外通过动态调整协同水平, 即调整协同两个阶段的比例, 从而在保证中继节点正确解码的条件下提高了第二阶段高速链路占用的比例, 使得系统的性能得到了进一步优化.

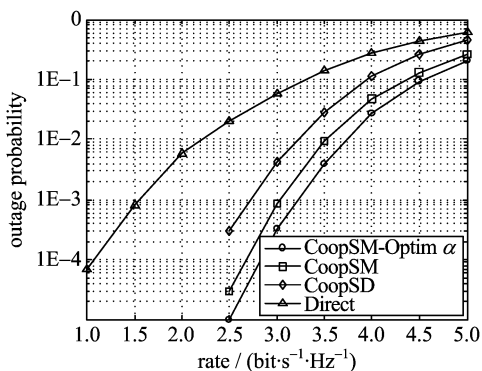


图 7 不同业务速率下不同传输方式的中断概率比较

Fig. 7 Outage probability vs rate

图 8 给出了随着业务速率的增加, 不同策略参与协同的中继节点个数的变化. 协同分集方式相对于协同复用方式在相同的业务速率要求下使用了更多的中继节点, 即占用了更多的系统资源. 令人振奋

的是通过调整协同水平使得参与协同的节点数大大减少. 综合图 6 和图 7 我们可以得出协同复用方式在消耗更少的系统资源的条件下提供了更高的 QoS 保障, 而我们通过协同水平调整以及功率分配进一步提高了协同系统性能并且节约了更多的资源.

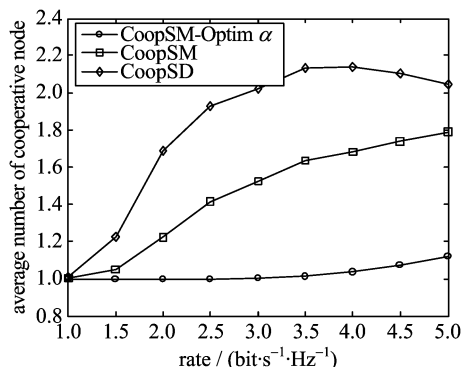


图 8 不同业务速率下不同传输方式中继节点个数比较

Fig. 8 Number of cooperative node vs rate

图 9 我们给出了随着业务速率的增加, 不同策略成功传输 1 000 个分组所消耗能量的比较. 由此可以看出: 业务速率越高我们的策略对能量的节约越明显. 这是由于我们的策略能够支持更高 QoS 的业务, 大大减少了由不成功传输带来的能量浪费. 另外, 我们这里是让中继节点以最大功率进行传输. 正如我们前文提到的, 我们可以利用注水法来进一步提高我们策略的性能.

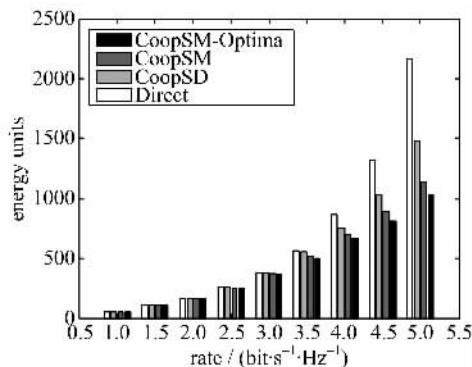


图 9 不同业务速率下不同传输方式能耗的比较

Fig. 9 Energy consumption vs rate

4 结论

节能降耗已经成为未来移动通信系统的一个重要目标. 本文针对编码协同网络, 提出了一种“绿色”的资源分配策略. 该策略充分利用了协同复用带来的增益, 提高了系统的容量, 进而可以支持更高

(下转第 1 033 页)