

一种5G网络协同

通信自适应中继选择方案

An Adaptive Relay Selection
Scheme for Cooperative
Communication in 5G Networks

孙磊¹, 丁茂¹, 尹以雁¹, 幸锋¹, 李治文¹, 张婧¹, 郭建军², 刘莞健² (1. 中国移动通信集团云南有限公司, 云南昆明 650228; 2. 南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子学院, 江苏南京 210023)

Sun Lei¹, Ding Mao¹, Yin Yiyang¹, Xing Feng¹, Li Zhiwen¹, Zhang Jing¹, Guo Jianjun², Liu Yuanjian² (1. China Mobile Communications Group Yunnan Co. Ltd., Kunming 650228, China; 2. College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

摘要:

针对协作通信网的中继选择问题,提出了一种基于贝叶斯推理的自适应中继选择方案。该方案拓展地运用了放大转发协议的原理,准确地分析了中继节点后验概率,并以此选取最优的中继节点进行信息传输。实验仿真结果表明,该方案在信噪比恒定的情况下,显著地提高了网络性能。

关键词:

协作网络; 5G; 放大转发; 中继选择; 贝叶斯推理
doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2024.01.016
文章编号: 1007-3043(2024)01-0074-05
中图分类号: TN929.5
文献标识码: A
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Aiming at the relay selection problem in collaborative communication networks, a Bayesian inference-based relay selection scheme is proposed. The scheme extends the principle of amplify-and-forward protocol, and accurately calculates the posterior probability of the relay node. Then the optimal relay node for information transmission is selected. The simulation results show that the proposed scheme significantly improves the network performance in the case of constant signal-to-noise ratio.

Keywords:

Cooperative network; 5G; Amplify-and-forward; Relay selection; Bayesian inference

引用格式: 孙磊, 丁茂, 尹以雁, 等. 一种5G网络协同通信自适应中继选择方案[J]. 邮电设计技术, 2024(1): 74-78.

0 引言

协作通信因其在终端节点之间能提供协作的潜在应用而受到广泛关注。此外,由于数据应用的大幅增长,频谱资源出现了短缺问题。为了解决这个问题,需要协作通信通过节点间的协作,有效地利用资源,以提高信道的容量^[1]。协作通信表明,多用户状态下的单天线可以共享,构成虚拟的多天线发射机,使其能够完成发射分集功能^[2]。在基于中继的通信系统中,如何有效地使用中继节点以及如何使系统性能最大化是一个非常具有挑战性的问题。对此,学术界和研究人员提出了不同的技术方案来优化网络性能。

基于概率的中继选择方案是指利用贝叶斯理论计算选择中继节点的概率。该方案将可达的数据速率量化为选择中继节点的先验概率和后验概率,进而最大化网络的数据速率^[3]。虽然多输入多输出(MIMO)技术已经能够提高容量和频谱效率(spectrum efficiency, SE)^[4],但发射端和接收端天线的倍频需要更多的电路能量。为了克服这种现象,文献[5]根据信道状态信息(channel state information, CSI)提出了一种基于功率控制门限的中继选择方案。文献[6]在蚁群算法的基础上,提出了一种基于功率分配和蚁群优化的中继选择(RS-PA-PSACO)方案。该方案可以在总功率固定的情况下,能同时获得最小化误比特率(SER)的中继选择和功率分配的最优解。此外,CSI作为中继节点位置选择的参考标准,可以通过调整所选

收稿日期: 2023-11-03

中继的发射功率来最大化信噪比,从而显著提高信噪比,降低误比特率^[7]。与基于平均功率的分配方案^[8]相比,该方案提高了接收信噪比,降低了误比特率。为了提高协作网络的能量效率,文献[9]提出了一种基于竞争的选择方案。该方案的信源将以最小的发射功率发送数据,中继也可能消耗最小的能量,这能一定程度上提高整个网络的能量效率。

此外,文献[10]提出了一种基于门限的中继选择方案,该方案结合了确定性中继和概率中继的优点,可以选择任意的数量作为中继。文献[11]提出在布置固定的中继节点时,可以充分考虑路径损耗以进一步提高无线网络的能量效率。文献[12]研究了所选中继具有实质性的端到端的中继路径,它实现了最优的性能,并确保完全分集数量等于中继的数量。文献[13]从中继节点选择和功率分配2个方面进行了讨论,在有效利用带宽的同时最小化网络的总功率。文献[14]采用解码转发(decode-and-forward, DF)协议对源节点和中继节点进行协作通信功率分配,以优化功率消耗,同时保持服务质量。文献[15]研究了一种分散的中继选择方案,即一个客户端根据瞬时信道估计从众多中继中选择端到端的最佳路由。

针对以上各方法所存在的不足,本文首先对多跳蜂窝网络中的协作通信进行了系统建模,然后提出了一种基于贝叶斯推理的中继选择方案,最后通过仿真实验证明了方案的可行性。

1 系统模型

蜂窝网络中协作通信的系统模型如图1所示。该模型由源(S)、中继(R)和信宿(D)构成,其中信源可以是基站或带包等待传输的用户,而中继在发送端和目的端都被认为是用户设备(UE)。

图1中的通信可以通过直接路径或中继的协助2种路径进行,或者两者兼而有之。通过直接路径通信时,其接收信号可以描述为:

$$Y_{SD} = h_{SD}x + N_{SD} \quad (1)$$

式中:

h_{SD} ——信源到信宿的信道状态信息

x ——发射信号

N_{SD} ——信源到信宿的信道噪声

当通过中继进行通信时,其过程可分为2个阶段进行。在第1阶段,信号从信源发送到中继,在中继处接收的信号 Y_{SR} 可描述为:

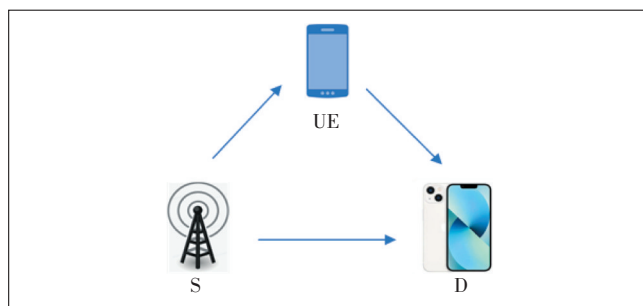


图1 蜂窝网络中的协作通信

$$Y_{SR} = h_{SR}x + N_{SR} \quad (2)$$

式中:

h_{SR} ——信源到中继的信道状态信息

x ——发射信号

N_{SR} ——信源到中继的信道噪声

在第2个阶段,信号通过AF协议从中继发送到信宿,信宿接收到的信号 Y_{RD} 可描述为:

$$Y_{RD} = \alpha h_{RD}Y_{SR} + N_{RD} \quad (3)$$

式中:

h_{RD} ——中继到信宿的信道状态信息

α ——传播系数

Y_{SR} ——中继接收到的信号

N_{RD} ——中继到目的端的信道噪声

由文献[16]可知,放大转发(AF)场景下,中继路径(S到R再到D)和直接路径(S到D)上的信噪比可以描述为:

$$\text{SNR}_{SR\&RD} = \frac{g\partial_1\partial_2P_T}{g\partial_2N_1 + N_2} \quad (4)$$

$$\text{SNR}_{SD} = \frac{\partial_d P_T}{N_2} \quad (5)$$

式中:

g ——放大增益

$\partial_1, \partial_2, \partial_d$ ——S到R、R到D、S到D的信道状态信息

N_1, N_2 ——中继接收机噪声和目的接收机噪声

中继路径和直接路径上的协作增益(CG)可以表示为:

$$\text{CG}_{SD} = \frac{\varepsilon_0}{\beta_0} \quad (6)$$

$$\text{CG}_{SR\&RD} = \frac{\varepsilon_1 / \beta_0}{\varepsilon_0 / \beta_0} \quad (7)$$

式中:

ε_0 和 ε_1 ——通过直接路径和中继路径传输的比特数误差

β_0 ——信源发送的总比特数

中继路径和直接路径上的信道增益(CHG)可表示为:

$$\text{CHG}_{\text{SR\&RD}} = \text{abs} \left\{ \min \left[\text{mean}(\alpha_1), \text{mean}(\alpha_2) \right] \right\} \quad (8)$$

$$\text{CHG}_{\text{SD}} = \text{abs} \left\{ \min \left[\text{mean}(\alpha_d) \right] \right\} \quad (9)$$

式中:

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_d$ ——S到R、R到D、S到D的传播系数

2 贝叶斯决策与中继选择方案

贝叶斯决策理论是解决分类问题的一种基本统计方法。从本质上讲,该方法就是利用已知的不完全状态信息,对未知状态进行主观概率估计^[17]。基于贝叶斯机器学习算法的朴素贝叶斯分类器被广泛应用于电信数据挖掘、移动通信等领域。在本章中,首先讨论贝叶斯规则的制定,接下来在贝叶斯理论的基础上,解决最优中继选择问题。

2.1 贝叶斯理论

贝叶斯理论是一种利用统计学来描述问题的方法,即从2个已知概率(即先验概率和条件概率)推导出问题的后验概率。先验概率显示了当前收集到的关于问题证据的估计,以 $P(S_n)$ 来表示源节点的先验概率。而条件概率是根据观察到的证据对某个未知变量 X 发生的估计,本文以 $P(X|S_n)$ 来表示源节点 S_n 选择中继节点 X 的概率。当先验概率和条件概率都已知时, N 个中继节点的后验概率可以描述为:

$$P(S_n|X) = \frac{P(X|S_n)P(S_n)}{P(X)} \quad (10)$$

其中:

$$P(X) = \sum_{n=1}^N P(X|S_n)P(S_n) \quad (11)$$

2.2 基于贝叶斯理论的自适应中继选择

针对协作通信中的最佳中继选择问题,本文提出了一种基于贝叶斯推理的自适应解决方案。

已知直接路径和中继路径的SNR、CG、CHG,则源节点 S_n 的先验概率为:

$$P_{\text{SNR}}(S_n) = \frac{\text{SNR}_{\text{SD}_n}}{\sum_{i=1}^N \text{SNR}_{\text{SD}_i}} \quad (12)$$

$$P_{\text{CG}}(S_n) = \frac{\text{CG}_{\text{SD}_n}}{\sum_{i=1}^N \text{CG}_{\text{SD}_i}} \quad (13)$$

$$P_{\text{CHG}}(S_n) = \frac{\text{CHG}_{\text{SD}_n}}{\sum_{i=1}^N \text{CHG}_{\text{SD}_i}} \quad (14)$$

其中, N_s 为源的个数,中继节点 R_m 的条件概率为:

$$P_{\text{SNR}}(R_m|S_n) = \frac{\text{SNR}_{\text{SR\&RD}_m}}{\sum_{n=1}^{N_s} \text{SNR}_{\text{SR\&RD}_m}} \quad (15)$$

$$P_{\text{CG}}(R_m|S_n) = \frac{\text{CG}_{\text{SR\&RD}_m}}{\sum_{n=1}^{N_s} \text{CG}_{\text{SR\&RD}_m}} \quad (16)$$

$$P_{\text{CHG}}(R_m|S_n) = \frac{\text{CHG}_{\text{SR\&RD}_m}}{\sum_{n=1}^{N_s} \text{CHG}_{\text{SR\&RD}_m}} \quad (17)$$

其中, N_r 表示可用的中继节点总数。根据贝叶斯准则,后验概率可描述为:

$$P_{\text{SNR}}(S_n|R_m) = \frac{P_{\text{SNR}}(R_m|S_n)P_{\text{SNR}}(S_n)}{\sum_{n=1}^{N_s} P_{\text{SNR}}(R_m|S_n)P_{\text{SNR}}(S_n)} \quad (18)$$

$$P_{\text{CG}}(S_n|R_m) = \frac{P_{\text{CG}}(R_m|S_n)P_{\text{CG}}(S_n)}{\sum_{n=1}^{N_s} P_{\text{CG}}(R_m|S_n)P_{\text{CG}}(S_n)} \quad (19)$$

$$P_{\text{CHG}}(S_n|R_m) = \frac{P_{\text{CHG}}(R_m|S_n)P_{\text{CHG}}(S_n)}{\sum_{n=1}^{N_s} P_{\text{CHG}}(R_m|S_n)P_{\text{CHG}}(S_n)} \quad (20)$$

在计算所有因素的后验概率后,源节点 S_n 所选择的中继节点为:

$$R_m = \arg \max \left[P_{\text{SNR}}(S_n|R_m) + P_{\text{CG}}(S_n|R_m) + P_{\text{CHG}}(S_n|R_m) \right] \quad (21)$$

s.t. $0 \leq m \leq N_r$

根据式(21),对于源节点 S_n ,选择综合后验概率最大的中继节点 R_m 进行通信,以提升系统性能。

3 实验与分析

3.1 仿真环境

本次实验在 Matlab 2017a 软件开发平台上进行,并建立了如图2所示协作通信模型。定义了2个源 S_1 和 S_2 ,并提供2个中继节点 R_1 和 R_2 。源端可以选择这些中继节点中的任意一个与目的端进行通信,也可以直接与目的端进行通信。从图2中可以看出,2个源都有3条可用路径进行传输,第1个是直接路径,即 S_1D

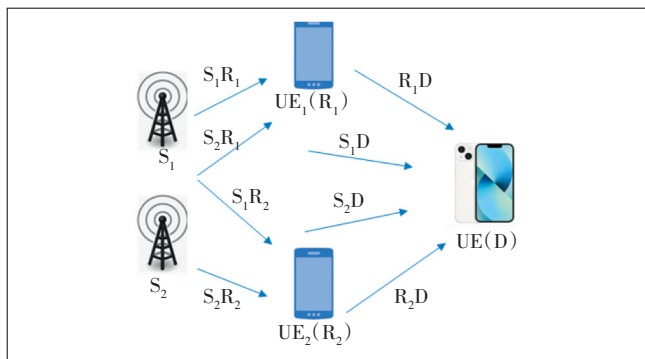


图2 协作通信仿真模型

和 S_2D ,第2个是中继路径,即 S_1R_1 、 S_1R_2 、 S_2R_1 和 S_2R_2 。

使用瑞利衰落信道调用AF中继协议。信号从信源出发,通过中继或直接到达信宿的信噪比、协同增益、信道增益分别如表1~表3所示。

表1 直接路径和中继路径上的信噪比

S	SNR_{SD}	SNR_{SR1}	SNR_{SR2}
S_1	0.001 3	0.000 4	0.000 5
S_2	0.001 1	0.000 7	0.000 8

表2 直接路径和中继路径上的协同增益

S	CG_{SD}	CG_{SR1}	CG_{SR2}
S_1	0.16	0.65	0.56
S_2	0.14	0.44	0.72

表3 直接路径和中继路径上的信道增益

S	CHG_{SD}	CHG_{SR1}	CHG_{SR2}
S_1	0.79	0.000 5	0.000 1
S_2	0.88	0.000 6	0.000 2

当直接路径和中继路径上的SNR、CG和CHG已知时,根据式(12)、式(13)和式(14)可以计算出每个信源的先验概率,根据式(15)、式(16)和式(17)可以计算出每个中继节点的条件概率,具体结果如表4~表6所示。

3.2 实验结果

仿真考虑了4条中继路径和2条直接路径,使得每个源节点可以获得2条中继路径和1条直接路径。使用二进制相移键控(BPSK)调制发送了 10^4 个符号。在接收端采用直接路径接收信号,并通过选定的中继进行最大比合并(MRC),将所有6条路径的结果组合起来进行比较,仿真结果如图3所示。

从图3可以看出,源 S_1 选择的中继 R_1 与源 S_1 拒绝的中继 R_2 相比,降低了误比特率,源 S_2 选择的中继 R_2 与源 S_2 拒绝的中继 R_1 相比,降低了误比特率,中继路

表4 由SNR计算出的先验概率和条件概率

S	$P_{SNR}(S_n)$	$P_{SNR}(R_1 S_n)$	$P_{SNR}(R_2 S_n)$
S_1	0.54	0.36	0.38
S_2	0.46	0.67	0.62

表5 由CG计算出的先验概率和条件概率

S	$P_{CG}(S_n)$	$P_{CG}(R_1 S_n)$	$P_{CG}(R_2 S_n)$
S_1	0.53	0.6	0.44
S_2	0.47	0.4	0.56

表6 由CHG计算出的先验概率和条件概率

S	$P_{CHG}(S_n)$	$P_{CHG}(R_1 S_n)$	$P_{CHG}(R_2 S_n)$
S_1	0.47	0.45	0.44
S_2	0.53	0.55	0.56

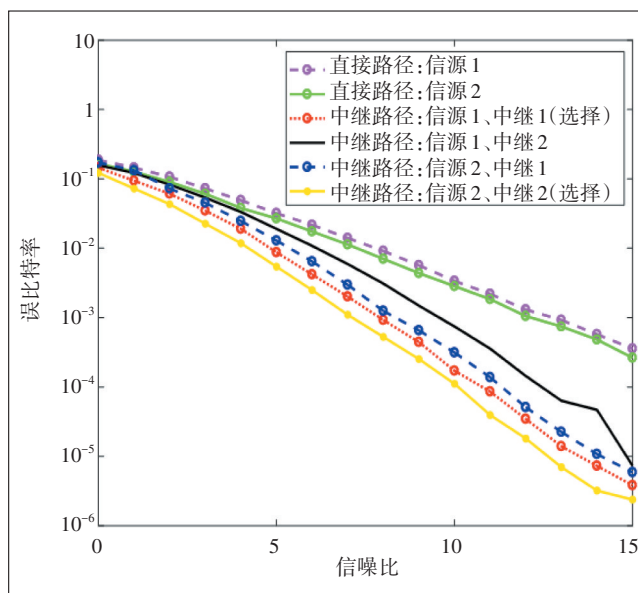


图3 系统中各传输路径的性能分析

径的误比特率也优于直接路径。结果表明,本文提出的算法提高了中继节点的决策能力,降低了误比特率,通过选择更好的中继节点,实现了高效可靠的通信。

3.3 与其他算法的比较

为进一步分析中继选择算法对通信系统性能的影响,将所提出的算法与随机选择中继方法和所有中继循环转发方法进行了对比,结果如图4所示。

从图4可以看出,随着信噪比的增大,误比特率呈现下降趋势,且本文提出的中继选择算法的误比特率要优于另外2种经典的中继选择算法。

结合图3和图4可以看出,本文所提算法有效降低了通信的误比特率,提高了通信质量。这是由于本

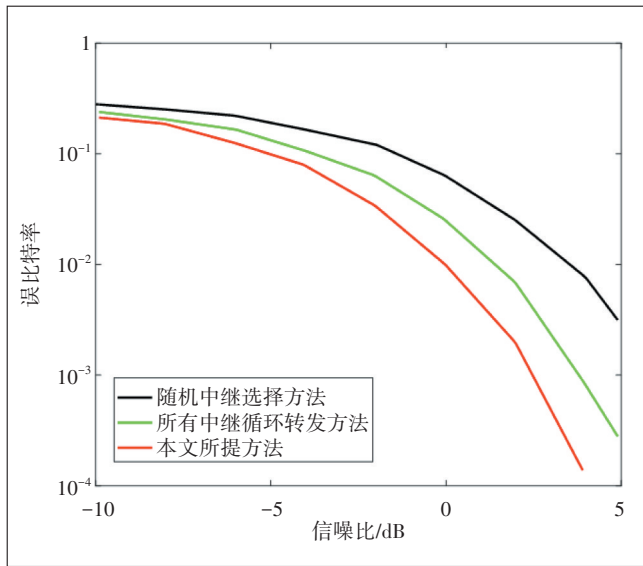


图4 各方案的系统性能比较

文所提算法能根据中继节点的状态信息和信道信息,自适应地选择通信路径,提高了通信系统中继节点和信道环境变差等情况下的容错性,而随机中继选择算法仅仅是对所需要的中继节点进行随机分类和选择,没有对信息的收发环境进行分析,故通信网络的性能不够稳定。

4 总结

本文提出了一种自适应的中继选择方案,该方案根据后验概率自适应地选择可用的中继节点进行协作。在蜂窝网络的协作通信中,中继是有效地选择用户设备的关键,根据不同的信道条件进行中继选择是最关键的。因此,本文的目标是有效地使用中继节点,以增加网络的可靠性,从而通过减少错误来改善接收信号的质量。将SNR、CG、CHG 3种信道条件作为先验知识,计算后验概率,选择到达目的节点的最佳可用中继。最后,本文给出了所提算法的仿真结果,并与2种常见的中继选择算法进行了对比,从而验证了本文所提算法的有效性。

参考文献:

[1] 张语昕. 移动通信网络中的协作通信[J]. 通信电源技术, 2020, 37(7): 225-7.
 [2] 肖海林,左清念,朱丹,等. 基于D2D的C-V2V车载协作通信资源分配算法[J]. 电子科技大学学报, 2021, 50(5): 689-696.
 [3] 亓凯梁,刘超,包建荣. 多中继选择极化译码转发及优化功率分配[J]. 电子学报, 2022, 50(5): 1167-73.
 [4] 张宇策,张果,陈佳丽. Massive MIMO中的波束算法及方案研究

[J]. 邮电设计技术, 2021, (8): 43-50.
 [5] XU J, NIU H, ZHAO T, et al. Robust Optimal Power Control and Sub-carrier Allocation in Uplink OFDMA Network With Assistance of Mobile Relay[J]. IEEE access, 2021(9): 57475-85.
 [6] SHARMA A S, KIM D S. Energy efficient multipath ant colony based routing algorithm for mobile ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2021(113): 102396.
 [7] WAQAS S A, JAWAD M, KHAN I, et al. Path (s) Finding and Selection Technique for Multi-Hop Mesh Cooperative Networks[J]. 2013, 6(1): 50.
 [8] LI Y, LIAO C, WANG Y, et al. Energy-efficient optimal relay selection in cooperative cellular networks based on double auction [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(8): 4093-104.
 [9] 蒋华,王瑶,王慧娇,等. 基于模糊逻辑的WSNs能量高效分簇路由算法[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(7): 25-30.
 [10] EL-ZAHR S, ABOU-RJEILY C. Threshold based relay selection for buffer-aided cooperative relaying systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(9): 6210-6223.
 [11] 任静,姚远程,秦明伟,等. 一种复杂环境下的无线应急通信中继节点快速布点方法[J]. 宇航计测技术, 2022, 42(1): 45-50.
 [12] ZARIN N, MAHMUD S A, KHAN I. Relay based cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks over rayleigh fading channel with path loss effects[C]//proceedings of the 2012 15th International Multitopic Conference (INMIC). 2012.
 [13] NING Q, YANG T, CHEN B, et al. Cooperative Transmission of Wireless Information and Energy in Anti-Eavesdropping UAV Relay Network[J]. IEEE Transactions on Green Communications, 2021, 5(3): 1283-1292.
 [14] WANG X, ZHANG P, SHU F, et al. Power Allocation for IRS-aided Two-way Decode-and-Forward Relay Wireless Network [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022: 1-6.
 [15] CHEN G, TIAN Z, GONG Y, et al. Max-ratio relay selection in secure buffer-aided cooperative wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2014, 9(4): 719-729.
 [16] DAN C, HONG J, XI L, et al. Optimal joint relay selection and resource allocation with QoS constraints in multiuser OFDM-based cellular networks[J]. High Technology Letters, 2021, 17(3): 305-310.
 [17] 张云飞. 基于贝叶斯决策的无人机飞行路径自动规划方法[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 196-200.

作者简介:

孙磊,工程师,学士,主要从事移动增值业务相关咨询设计工作;丁茂,工程师,学士,主要从事移动增值业务相关咨询设计工作;尹以雁,工程师,学士,主要从事移动增值业务相关咨询设计工作;幸锋,工程师,学士,主要从事移动增值业务相关咨询设计工作;李治文,工程师,学士,主要从事移动增值业务相关咨询设计工作;张婧,工程师,学士,主要从事移动增值业务相关咨询设计工作;郭建军,硕士,主要研究方向为视觉定位、机器学习;刘莞健,教授,博士,主要研究方向为下一代无线通信系统网络规划与优化、射线跟踪方法及其工程应用、室内短距离电波传播等。