



文章编号:1671-251X(2015)11-0021-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.11.006

翟文艳,孙彦景,李松,等.隧道多中继协作通信系统功率分配与容量优化[J].工矿自动化,2015,41(11):21-25.

隧道多中继协作通信系统功率分配与容量优化

翟文艳^{1,2}, 孙彦景^{1,2}, 李松^{1,2}, 梁迪慧^{1,2}

(1. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 江苏省煤矿电气与自动化工程实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:基于多波模信道模型建立了矩形隧道多中继协作通信系统模型,给出了放大转发和译码转发协作模式下多中继协作通信系统的信道容量计算公式。在系统总功率受限的情况下,提出了基于遗传算法的隧道多中继放大转发协作通信系统优化功率分配方法和隧道多中继译码转发协作通信系统多重KKT优化功率分配方法,以优化系统的信道容量。仿真结果表明,隧道多中继协作通信系统优化功率分配方法可提升系统的信道容量。

关键词:矩形隧道;协作通信;放大转发;译码转发;信道容量;功率分配

中图分类号:TD655

文献标志码:A

网络出版时间:2015-11-02 14:50

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20151102.1450.006.html>

Power allocation and capacity optimization of multi-relay cooperative communication system in tunnel

ZHAI Wenyan^{1,2}, SUN Yanjing^{1,2}, LI Song^{1,2}, LIANG Dihui^{1,2}

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Province Laboratory of Electrical and Automation Engineering for Coal Mining, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The multi-relay cooperative communication system model in rectangular tunnel based on multimode channel model was established, and the channel capacity calculation formulas of multi-relay cooperative communication system in amplify and forward mode and decode and forward mode were given. Under the circumstance of limited power in tunnel, optimal power allocation method of amplify and forward multi-relay cooperative communication system based on genetic algorithm and multiple KKT optimal power allocation method of multi-relay cooperative communication system in decode and forward were proposed to optimize the channel capacity. Simulation results show that the proposed optimal power allocation methods can improve channel capacity of the tunnel multi-relay cooperative communication system.

收稿日期:2015-08-20;**修回日期:**2015-09-15;**责任编辑:**胡娴。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51274202);国家自然科学基金青年项目(51504214,51504255);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013RC11);江苏省科技成果转化项目(子课题)(BA2012068);江苏省自然科学基金面上项目(BK20130199,BK20131124);江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2014028-01);中国矿业大学重大项目培育专项项目(2014ZDPY16)。

作者简介:翟文艳(1983—),女,江苏无锡人,博士研究生,研究方向为挑战环境下电磁波传播特性、协作通信等,E-mail:zhaiwenyan@cumt.edu.cn。通信作者:孙彦景(1977—),男,山东滕州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为挑战环境下的嵌入式实时系统、无线传感器网络、协作通信等,E-mail:yjsun@cumt.edu.cn。

Key words: rectangular tunnel; cooperative communication; amplify and forward; decode and forward; channel capacity; power allocation

0 引言

在矿井隧道、地下隧道等受限隧道空间,受隧道壁反射等因素的影响,电磁波传播频繁发生反射和散射,多径效应严重^[1],制约了隧道无线通信系统性能的提高。协作通信允许多个节点共享天线,构成虚拟 MIMO^[2],在不增加天线的前提下,利用隧道内的多径衰落特性,提升隧道无线通信系统性能。

资源配置策略在很大程度上决定隧道协作通信系统性能的提升,功率分配是资源配置的重要内容,如何有效、合理地对源节点和各中继节点进行功率分配,具有重要意义。本文基于多波模信道模型,建立矩形隧道多中继协作通信系统模型,针对系统总功率受限情况,提出不同协作模式下的功率分配方法,以优化系统的信道容量。

1 矩形隧道多中继协作通信系统模型及信道容量

建立的矩形隧道多中继协作通信系统模型如图 1 所示。模型由源节点 S、K 个中继节点 R_k ($k=1,2,\dots,K$) 和目的节点 D 组成。每个节点均配置单根天线,系统采用半双工工作模式。

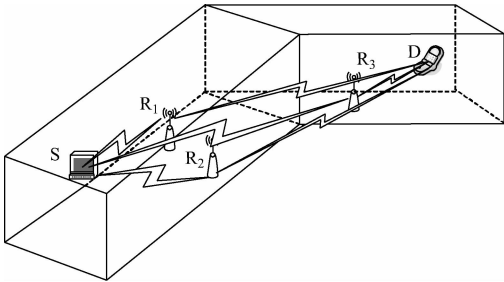


图 1 矩形隧道多中继协作通信系统模型

由于源节点 S 与目的节点 D 之间距离较长或隧道中存在分支、弯道和坡道等复杂情况,不失一般性,可认为源节点 S 和目的节点 D 之间无视距信道,通过中继协作方式实现隧道复杂情况下节点间的有效信息传输。

协作通信基本的协作模式包括放大转发 (Amplify and Forward, AF) 模式和译码转发 (Decode and Forward, DF) 模式。DF 模式又包括固定 DF 和选择性 DF 模式,其中选择性 DF 模式可克服固定 DF 模式可能转发错误信号和信道容量受限于源节点到中继节点和中继节点到目的节点中较差信道的问题^[3]。下文中的 DF 模式是指选择性 DF 模式。

AF 模式和 DF 模式下矩形隧道多中继协作通

信系统的信道容量 C_{AF} 、 C_{DF} 分别为^[4]

$$C_{AF} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \sum_{k=1}^K \frac{\rho_S |h_{SR_k}|^2 \rho_{R_k} |h_{R_k D}|^2}{1 + \rho_S |h_{SR_k}|^2 + \rho_{R_k} |h_{R_k D}|^2} \right) \quad (1)$$

$$C_{DF} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \sum_{k=1}^K \rho_{R_k} |h_{R_k D}|^2 \right) (\rho_S |h_{SR_k}|^2 \geq \zeta) \quad (2)$$

式中: ρ_S 为源节点 S 的发送信噪比; h_{SR_k} 和 $h_{R_k D}$ 分别表示源节点 S 和中继节点 R_k 、中继节点 R_k 和目的节点 D 间的信道增益; ρ_{R_k} 为中继节点 R_k 的发送信噪比; ζ 为中继节点接收信号信噪比的设定门限,需根据具体情况设定。

若中继节点接收信号的信噪比超过设定门限,中继节点对接收信号进行解码和重新编码,并将信号转发给目的节点;若源节点和中继节点之间发生了深度衰落,使得中继节点的接收信噪比低于设定门限,则中继节点不进行任何操作。将噪声信号建模为方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。

采用多波模信道模型,信道增益为^[5]

$$h_{TxRx} = \sqrt{G_{Tx} G_{Rx}} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn, Tx} E_{mn} (x_{Rx}, y_{Rx}) \times \exp(-(\alpha_{mn} + j\beta_{mn}) Z_{TxRx}) \quad (3)$$

式中: G_{Tx} 和 G_{Rx} 分别为发射天线 Tx 和接收天线 Rx 的增益; $C_{mn, Tx}$ 为发射天线 Tx 处 (m, n) 阶波模的强度; $E_{mn} (x_{Rx}, y_{Rx})$ 为接收天线 Rx 处 (m, n) 阶波模的场分布; α_{mn} 和 β_{mn} 是波模的衰减系数和相位系数; Z_{TxRx} 为发射天线 Tx 和接收天线 Rx 之间的距离。

将相关参数代入式(3),即可求得 h_{SR_k} 和 $h_{R_k D}$ 。

2 功率受限时 AF 模式下多中继协作通信系统的优化功率分配

在 AF 模式下,总功率 P 和节点功率 P_0 均受限,为实现信道容量优化,源节点 S 和中继节点 R_k 的功率分配应满足式(4):

$$\begin{cases} \max (C_{AF}) \\ P_S, P_{R_k} \\ \text{st. } P_S + \sum_{k=1}^K P_{R_k} \leq P \\ 0 \leq P_S \leq P_0 \\ 0 \leq P_{R_k} \leq P_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_S 为源节点 S 的功率; P_{R_k} 为中继节点 R_k 的功率。

结合式(1),式(4)可等效为

$$\begin{cases} \max_{P_S, P_{R_k}} \left(\sum_{k=1}^K \frac{P_S |h_{SR_k}|^2 P_{R_k} |h_{R_k D}|^2}{\sigma^2 + P_S |h_{SR_k}|^2 + P_{R_k} |h_{R_k D}|^2} \right) \\ \text{st. } P_S + \sum_{k=1}^K P_{R_k} \leq P \\ 0 \leq P_S \leq P_0 \\ 0 \leq P_{R_k} \leq P_0 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)是典型的带有约束条件的非线性优化问题。遗传算法是一种基于生物遗传和进化机制的自适应概率优化技术,在非线形优化问题求解方面有广泛的应用^[6]。下面,提出基于遗传算法的隧道多中继 AF 协作通信系统优化功率分配方法,求解式(5),具体程序如下:

PowerAllocationAF

- ① initialization
- ② define target function
- ③ For each P
- ④ While conditions are satisfied
- ⑤ fitness evaluation
- ⑥ selection
- ⑦ crossover
- ⑧ mutation
- ⑨ reins
- ⑩ End while

程序解释:① 定义遗传算法的相关参数,如个体数目、最大遗传代数等。② 定义目标函数。③ 针对不同的系统总功率进行计算。④ 判断是否满足循环条件,若满足,则进入循环。⑤ 计算适应度值。⑥ 选择操作,随机遍历采样选择方式,代沟为 0.9。⑦ 交叉操作,采用单点交叉方式。⑧ 变异操作。⑨ 重插操作。⑩ 结束循环。

3 功率受限时 DF 模式下多中继协作通信系统的优化功率分配

在 DF 模式下,总功率 P 和节点功率 P_0 均受限,为实现信道容量优化,源节点 S 和中继节点 R_k 的功率分配应满足式(6):

$$\begin{cases} \max_{P_S, P_{R_k}} (C_{DF}) \\ \text{st. } P_S + \sum_{k=1}^K P_{R_k} \leq P \\ 0 \leq P_S \leq P_0 \\ 0 \leq P_{R_k} \leq P_0 \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(2)可得

$$\begin{cases} \max_{P_S, P_{R_k}} \left(\sum_{k=1}^K P_{R_k} |h_{R_k D}|^2 \right) \\ \text{st. } P_S + \sum_{k=1}^K P_{R_k} \leq P \\ \frac{\zeta \sigma^2}{|h_{SR_k}|^2} \leq P_S \leq P_0 \\ 0 \leq P_{R_k} \leq P_0 \end{cases} \quad (7)$$

式(8)保证了参与协作的中继节点接收信号的信噪比超过设定门限:

$$\frac{\zeta \sigma^2}{|h_{SR_k}|^2} \leq P_S \leq P_0 \quad (8)$$

采用遍历法处理式(8),对于每种情况,式(8)为带约束条件的线性规划问题,可采用 KKT 优化方法求解。隧道多中继 DF 模式下多重 KKT 优化功率分配程序如下:

PowerAllocationDF

- ① For each P
- ② For $i=1$ to K
- ③ set $P_S = P_i$
- ④ KKT
- ⑤ set flag(i) = 1
- ⑥ For $j=1$ to K (except i)
- ⑦ If $(P_{R_j} > 0) \&\& (P_j > P_S)$
- ⑧ flag(i) = 0
- ⑨ End if
- ⑩ End for
- ⑪ If flag(i) = 1
- ⑫ calculate channel capacity $C_{DF}(i)$
- ⑬ End if
- ⑭ End for
- ⑮ get maximum C_{DF}
- ⑯ get corresponding $P_S, P_{R_1}, P_{R_2}, \dots, P_{R_K}$
- ⑰ End for

程序解释:① 针对不同的系统总功率进行计算。② 采用遍历法处理式(8),分别针对每种情况进行求解。③ 设置 P_S 的值。④ 利用 KKT 方法求解优化功率分配 $P_{R_1}, P_{R_2}, \dots, P_{R_K}$ 。⑤ 设置标志位 flag。⑥—⑩ 判断 P_S 是否满足所有参与协作中继节点的门限要求,若满足,则令 flag = 1,若不满足,则令 flag = 0。⑪—⑬ 若 P_S 满足所有参与协作中继节点的门限要求,则计算当前功率分配下的信

道容量。⑭ 结束遍历法。⑮ 通过比较获得最大的信道容量。⑯ 最大信道容量所对应的功率分配,即为式(6)所求解的功率受限时隧道多中继 DF 协作通信系统的优化功率分配方法。

4 仿真与分析

在功率受限的条件下,对基于遗传算法的隧道多中继 AF 协作通信系统优化功率分配方法和隧道多中继 DF 协作通信系统多重 KKT 优化功率分配方法进行仿真。工作频率、矩形隧道侧壁和顶底壁的相对介电常数、电导率和隧道横截面尺寸等参数见参考文献[7]。设置有 4 个中继节点的场景:源节点 S、中继节点 $R_k(k=1,2,3,4)$ 和目的节点 D 的位置坐标分别为(0,0,0),(0,0,220),(0,0,400),(0,0,550),(0,0,650)和(0,0,700),节点的功率限制为 $P_0=5\text{ W}$ (36.989 7 dB·m)。

4.1 AF 模式

利用基于遗传算法的隧道多中继 AF 协作通信系统优化功率分配方法求解 AF 模式下的优化功率分配,结果见表 1。需要注意的是,该方法所求得的是近似解,存在较小误差。

表 1 AF 模式下,矩形隧道多中继协作通信系统优化功率分配 dB·m

P	P_S	P_{R_1}	P_{R_2}	P_{R_3}	P_{R_4}
30	25.750 3	8.712 6	21.919 2	25.646 6	17.585 9
31	26.517 6	5.335 5	23.009 1	27.150 1	18.428 1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
42	36.988 6	29.152 0	36.953 3	36.943 0	18.012 6
43	36.989 7	36.843 6	36.944 3	36.977 1	22.046 6
44	36.989 7	36.943 7	36.980 7	36.986 3	36.681 4
45	36.986 8	36.974 4	36.974 1	36.984 6	36.752 3

仿真功率受限时,AF 模式下,不同功率分配方法对矩形隧道多中继协作通信系统信道容量的影响,仿真结果如图 2 所示。从图 2 可看出,当总功率 $P<5P_0$ (约 44 dB·m)时,与等功率分配方法相比,优化功率分配方法能提高矩形隧道多中继协作通信

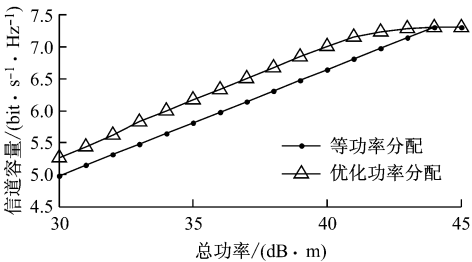
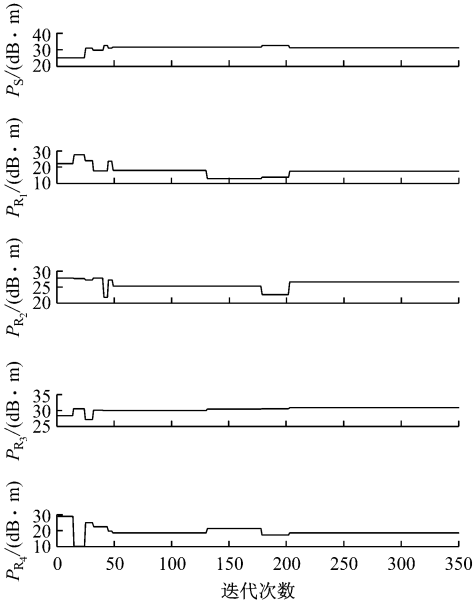


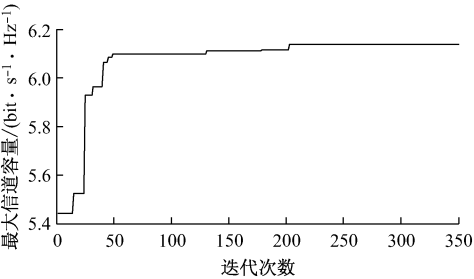
图 2 矩形隧道多中继 AF 协作通信系统不同功率分配方法信道容量的比较

系统的信道容量。当总功率 $P>44\text{ dB}\cdot\text{m}$ 时,由于节点功率限制,信道容量不再增加。

当总功率 $P=35\text{ dB}\cdot\text{m}$ 时,基于遗传算法的隧道多中继 AF 协作通信系统优化功率分配方法的收敛性能如图 3 所示。图 3 可看出,迭代次数对优化功率分配和最大信道容量的影响。经过 131 次迭代,信道容量可达到 6.112 bit/s/Hz。



(a) 优化功率分配



(b) 最大信道容量

图 3 经过不同遗传迭代次数的优化功率分配和最大信道容量

4.2 DF 模式

在同样的场景下,利用所提出的隧道多中继 DF 协作通信系统多重 KKT 优化功率分配方法求解 DF 模式下的优化功率分配,结果见表 2。

由表 2 可以看出,当总功率 $P\leqslant 37\text{ dB}\cdot\text{m}$ 时,只对 4 个中继节点中的 R_3 分配功率,即只有 R_3 参与协作,当总功率 $P\geqslant 42\text{ dB}\cdot\text{m}$ 时,中继节点 R_1, R_2, R_3 和 R_4 均参加协作。这是因为中继节点 R_3 与目的节点 D 之间的信道增益大,信道特性好。

仿真功率受限时,DF 模式下,不同功率分配方法对矩形隧道多中继协作通信系统信道容量的影响,仿真结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,当总功率 $P<44\text{ dB}\cdot\text{m}$ 时,与采用等功率分配方法相比,

采用优化功率分配方法能明显提高矩形隧道 DF 协作通信系统的信道容量。当总功率 $P > 44 \text{ dB} \cdot \text{m}$ 时,由于节点功率限制,信道容量不再增加。

表 2 DF 模式下,矩形隧道多中继协作通信系统优化功率分配 $\text{dB} \cdot \text{m}$

P	P_S	P_{R_1}	P_{R_2}	P_{R_3}	P_{R_4}
30	9.918 4	0	0	29.957 2	0
31	9.918 4	0	0	30.966 0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
37	13.228 9	0	0	36.981 7	0
38	13.228 9	0	31.101 0	36.989 7	0
39	13.228 9	0	34.657 2	36.989 7	0
40	13.228 9	0	36.971 4	36.989 7	0
41	13.228 9	34.096 3	36.989 7	36.989 7	0
42	13.228 9	36.989 7	36.989 7	36.989 7	29.179 8
43	13.228 9	36.989 7	36.989 7	36.989 7	36.929 9
44	29.668 8	36.989 7	36.989 7	36.989 7	36.989 7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

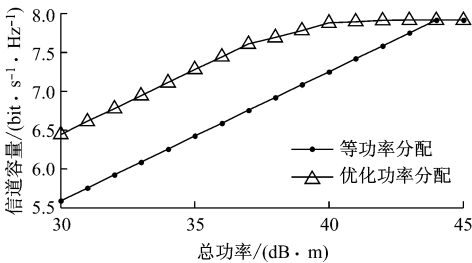


图 4 矩形隧道多中继 DF 协作通信系统不同功率分配方法信道容量的比较

定义信道容量优化增量 Δ_{DF} 为采用优化功率分配方法的信道容量 C_{opt} 与非优化功率分配方法情况下信道容量 $C_{\text{non_opt}}$ 之差。DF 模式下,信道容量优化增量变化曲线如图 5 所示。

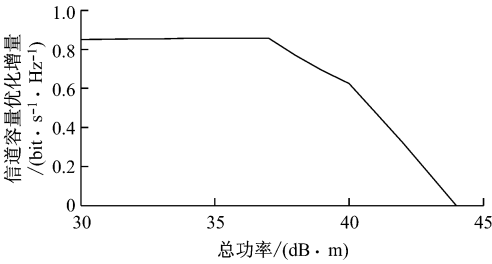


图 5 DF 模式下,信道容量优化增量变化曲线

当总功率 $P \leq 37 \text{ dB} \cdot \text{m}$ 时,信道容量优化增量基本保持不变,这是因为在总功率 $P \leq 37 \text{ dB} \cdot \text{m}$ 时,只有信道性能最优的中继节点 R_3 参与协作,由于信道容量较大,且源节点所分配的 P_S 较小,可得式(9)。信道容量优化增量与中继节点的信道参数

有关,信道确定时,信道容量优化增量保持不变。

$$\Delta_{\text{DF}} = C_{\text{opt}} - C_{\text{non_opt}} = \frac{1}{2} \{ \log_2 (1 + \frac{P - P_S}{\sigma^2} |h_{R_3D}|^2) - \log_2 [1 + \frac{P}{5\sigma^2} (|h_{R_1D}|^2 + |h_{R_2D}|^2 + |h_{R_3D}|^2 + |h_{R_4D}|^2)] \} \approx \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{5 |h_{R_3D}|^2}{|h_{R_1D}|^2 + |h_{R_2D}|^2 + |h_{R_3D}|^2 + |h_{R_4D}|^2} \right) \quad (9)$$

5 结语

基于多波模信道模型建立了矩形隧道多中继协作通信系统模型,并给出 AF 和 DF 模式下的信道容量计算公式。以信道容量为优化准则,在系统总功率和节点功率受限的情况下,对于隧道多中继 AF 协作通信系统提出了基于遗传算法的优化功率分配方法;对于隧道多中继 DF 协作通信系统提出了多重 KKT 优化功率分配方法。理论分析和仿真结果表明,利用所提出的优化功率分配方法,可提升系统的信道容量;当信道容量较大且源节点所分配的功率较小时,在 DF 模式下,若只有一个中继节点参与协作,则矩形隧道多中继协作通信系统的信道容量优化增量基本保持不变。

参考文献:

[1] 彭霞. 矿井电磁波传输路径损耗改进模型[J]. 工矿自动化,2013,39(6):36-39.

[2] JONG-MOON C, JOONHYUNG K, DONGHYUK H. Multihop hybrid virtual MIMO scheme for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(9):4069-4078.

[3] 刘瑞. 协作通信及网络[M]. 任品毅, 廖学文, 高贞贞, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010.

[4] 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.

[5] ZHI S, AKYILDIZ I, HANCKE G P. Capacity and outage analysis of MIMO and cooperative communication systems in underground tunnels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(11):3793-3803.

[6] 袁建国, 王琳, 黄胜, 等. 基于遗传算法的概率译码算法[J]. 北京邮电大学学报, 2012(5):98-101.

[7] LIENARD M, DEGAUQUE P. Natural wave propagation in mine environments [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(9):1326-1339.