

协作通信系统中能效优化的中继分配算法

曹 宾¹, 段海霞¹, 朱德利², 王 勇³, 李 云¹, 苏开荣¹

(1. 重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 南岸区 400065; 2. 重庆师范大学计算机与信息科学学院 重庆 沙坪坝区 400047;
3. 重庆第二师范学院数学与信息工程系 重庆 南岸区 400065;)

【摘要】在协作通信系统中, 中继节点的合理分配对于系统性能提升具有重要的意义。然而, 现有的方法往往只从系统容量最大化或者功率最小化单方面研究中继节点分配, 缺乏对两者的综合考虑以致最终的中继分配结果不是最优。通过对基于能效(容量/发送功率)的中继分配进行研究, 提出一种能效最大化为目标的中继分配算法(EERAA)。该算法首先优化各协作链路能效, 然后通过最大权重匹配方法为各源移动终端进行中继节点的分配, 从而有效地提高系统能效。经仿真验证, 该算法跟现有的算法相比, 能得到更高的系统能效。

关 键 词 协作通信; 能效; 最大权重匹配; 中继分配

中图分类号 TN915

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.05.002

Relay Assignment Algorithm Based on Energy Efficiency Optimization in Cooperative Communication Systems

CAO Bin¹, DUAN Hai-xia¹, ZHU De-li², WANG Yong³, LI Yun¹, and SU Kai-rong¹

(1. Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications Nan'an Chongqing 400065;
2. Department of Computer and Information Science, Chongqing Normal University Shapingba Chongqing 400047;
3. Department of Mathematics and Information Engineering, Chongqing University of Education Nan'an Chongqing 400065)

Abstract In cooperative communications systems, allocating relay rationally is significant to promote the performance. However, the existing relay assignment methods only trend to maximize the capacity or the minimum transmission power, lack the comprehensive consideration of both capacity and transmission power so that the result of assignment is not the optimal. A relay allocation algorithm, called energy efficiency aware relay assignment algorithm (EERAA), is proposed with the objective of maximizing energy efficiency (ratio of capacity and transmission power). Firstly, EERAA algorithm optimizes the energy efficiency of collaboration link. Then, according to the result of maximum weight matching method. The base station allocates the optimal relay to source node, or source node communicating with base station directly. The simulation results verify that the energy efficiency of the proposed algorithm achieves a significant improvement compared with the existing methods.

Key words cooperative communication; energy efficiency; maximum weight matching; relay assignment

协作通信是指中继站提供可选路径帮助基站与移动终端之间的数据传输, 使接收信号功率更强、更稳定, 从而提高通信系统的性能, 增加小区覆盖范围, 提高平均用户吞吐量和小区边缘用户吞吐量^[1]。近年, 协作通信的研究吸引了大量的研究者。根据中继节点对源节点信息处理方式的不同, 协作通信方式主要包括放大转发(amplify and forward, AF)和译码转发(decode and forward, DF)。AF方式指中继节点直接放大并转发从源节点收到的信号; DF方式指中继节点对接收到的信号进行译码, 并转发

译码后的再生符号信息给目的节点^[2]。协作通信中合理分配中继节点和发送功率, 将大大提高系统能效。因此, 基于能效优化的中继节点分配算法研究成为了一个值得关注的问题。

目前已提出多种中继分配算法, 算法中涉及的中继分配指标主要有最小化发射功率^[3-5]、最大化容量^[6-7]。文献[3]提出一种AF模式中继分配方法, 该方法在收发端目标信噪比限制下研究了两个场景: 第一个场景旨在最小化总发送功率; 第二个场景旨在最小化中继节点功率。文献[4]提出了一种节能中

收稿日期: 2013-06-08; 修回日期: 2014-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(61071118, 60702055); 重庆市杰出青年科学基金(CQCSTC); 重庆市科委重点实验室专项经费

作者简介: 曹宾(1974-), 男, 博士, 主要从事无线移动通信方面的研究。

继分配方法,该方法基于每个时隙的信道信息和剩余能量信息选择最好的中继,以达到最小化功耗和延长网络寿命的目标。文献[5]提出了一种单中继分配和功率分配算法,该算法通过最小化总发送功率来选择最好的中继节点。文献[6]综合考虑了中继分配和信道分配,研究了认知无线网中容量最大化问题。文献[7]提出MIMO(multiple-input multiple-output)协作系统信道容量全局优化方法,以凸集作为约束条件,有关信道容量的凸函数为目标函数,寻求信道容量全局最优解。

然而,上述中继选择方法均缺乏对功率和容量的综合考虑。因此,文献[8]提出一种AF模式能效优化的功率分配算法,并提出了能效的概念,将单位吞吐量的发送功率作为能效定义,并针对单个用户,考虑功率和容量限制以能效作为优化目标函数求解最优功率分配。文献[9]提出了一种无线传感网能效单中继选择算法,该算法基于MAC(media access control)层RTS-CTS(request to send/clear to send)信号和功率控制。一方面最小化单位数据包的能耗;另一方面最大化网络寿命。尽管如此,文献[8]仅仅从协作链路的角度考虑能效,并没有从系统的角度思考如何以系统能效最大化为目标来分配中继节点。文献[9]将能效作为中继选择的参考指标,但考虑的是分布式传感网络。

针对现有工作没有从系统角度考虑协作通信能效的缺陷,本文以源移动终端(MT)一定范围内的空闲MT作为中继节点^[10],提出了一种DF模式下系统能效最大化的单中继分配算法(EERAA)。该算法首先根据系统信道质量要求从空闲MT中搜寻各源MT的候选中继集合;然后为候选中继节点的协作链路建立能效目标函数,求解该目标函数得到每个源MT协作链路最大能效及对应的发送功率,同时计算直传链路能效;最后以能效作为权值,采用最大权重匹配(maximum weighted matching, MWM)方法^[11],为各源MT进行中继节点的分配。

1 系统模型和问题描述

1.1 系统模型

本文考虑一个单小区上行多用户协作通信系统。假设一个小区内有一个空闲MT,集合为 $Z = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, m 个源MT,集合为 $M = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$,采取直传的MT集合为 $X = \{s_{d_1}, s_{d_2}, \dots, s_{d_x}\}$,采取中继协作的MT集合为 $Y = \{s_{c_1}, s_{c_2}, \dots, s_{c_y}\}$, $x + y = m$ 。让 T^{s_i} 表示源MT,

$s_i \in Y, i = 1, 2, \dots, y$ 的候选中继集合。相应地,整个系统的中继集合可表示为 $Z_1 = \{T^{s_1} \cup T^{s_2} \cup \dots \cup T^{s_y}\}$, $Z_1 \subset Z$ 。

直传通信信道容量为:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P_s |h_{sd}|^2}{N} \right) \quad (1)$$

协作通信DF模式下的中继信道容量为:

$$C = \frac{B}{2} \min \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{P_s |h_{sr}|^2}{N_1} \right), \log_2 \left(1 + \frac{P_s |h_{sd}|^2 + P_r |h_{rd}|^2}{N} \right) \right\} \quad (2)$$

式中, B 为子信道带宽, $1/2$ 取决于通信模式下两个时隙各占的时间; N 和 N_1 分别为中继节点和基站的高斯白噪声,均服从正态分布。假设在系统中任意两个节点之间的信道相互独立且在信号持续时间内是恒定的。 $|h_{sd}|^2$ 是源MT与基站之间的信道增益; $|h_{rd}|^2$ 是中继节点与基站之间的信道增益; $|h_{sr}|^2$ 是源MT与中继节点之间的信道增益,它们都是相互独立的零均值循环对称复高斯随机变量。根据现有的信道估计方法^[12],可以得到各节点之间的信道增益。

1.2 问题描述

综合考虑容量与发送功率之间的关系,设计出一种协作通信系统能效最大化的中继分配算法。该分配算法从候选中继集合中选择最优的中继节点帮助源MT的通信,最终提高系统能效。在单小区协作通信系统中,能效指标定义为单位发送功率的系统容量,如 $\eta = C/P$,其中 C 表示容量, P 表示发送功率。本文的目标是最优化系统能效,因此,首先定义系统能效为:

$$\eta = \sum_{i=1}^x \frac{C_{s_{d_i}}}{P_{s_{d_i}}} + \sum_{j=1}^y \frac{C_{s_{c_j}}}{(P_{s_{c_j}} + P_{r_j})} \quad (3)$$

式中, $C_{s_{d_i}}$ 表示第 i 个直传链路的容量; $C_{s_{c_j}}$ 表示第 j 个协作链路容量; $P_{s_{d_i}}$ 、 $P_{s_{c_j}}$ 和 P_{r_j} 分别表示第 i 个直传链路源MT发送功率、第 j 个协作链路源MT和中继节点发送功率。从单个源MT角度出发实现系统能效最大化的目标。

系统能效最大化问题可以描述为如下约束条件的最大化问题P1。

1) 目标函数

$$P1: \max \eta = \sum_{s_i \in M} \sum_{r_j \in Z_1} \left[x_{r_j}^{s_i} \eta_{(s_i, r_j, d)}^{\max} + (1 - x_{r_j}^{s_i}) \eta_{(s_i, d)} \right]$$

约束条件:

- ① $0 < P_{s_i} \leq P_{\max}, 0 < P_{r_j} \leq P_{\max}$
- ② $aP_{s_i} \geq \rho_{\min}, bP_{s_i} + cP_{r_j} \geq \rho_{\min}$
- ③ $\sum_{s_i \in M} x_{r_j}^{s_i} \leq 1, r_j \in Z_1; \sum_{r_j \in Z_1} x_{r_j}^{s_i} \leq 1, s_i \in M$
- ④ $x_{r_j}^{s_i} \in \{0, 1\}, s_i \in M, r_j \in Z_1$

假设 $\rho_{\min}$ 是基站成功接收数据所需的最低信噪比。所有节点的最大发送功率 $P_{\max}$ 受节点本身电池电量的限制。约束条件①指所有源MT和中继节点的发送功率为正且不能超过最大发送功率; 条件②分别表示中继节点、基站端信噪比满足最低信噪比要求, 其中变量 $a = |h_{s_i r_j}|^2 / N_1$, $b = |h_{s_i d}|^2 / N$, $c = |h_{r_j d}|^2 / N$; 条件③表示每个中继节点可以分配给最多一个源MT, 每个源MT最多请求一个中继节点为其转发数据; 条件④表示如果中继节点 r_j 被分配给 s_i , 则 $x_{r_j}^{s_i} = 1, s_i \in M, r_j \in Z_1$, 否则 $x_{r_j}^{s_i} = 0$ 。

分析目标函数可知, 其包括直传链路能效和协作链路能效。如果中继节点 r_j 被分配给 s_i , 则需要求解协作链路能效最优值, 协作链路能效 $\eta_{(s_i, r_j, d)}(P_{s_i}, P_{r_j})$ 是一个二元变量的函数, 在容量和发送功率约束条件下可以求解最优能效值, 描述为如下最大化问题P2。

2) 目标函数

$$P2: \eta_{(s_i, r_j, d)}^{\max} = \max_{(P_{s_i}, P_{r_j})} \eta_{(s_i, r_j, d)}(P_{s_i}, P_{r_j})$$

约束条件: (a)和(b)。

如果没有中继被分配给 s_i , 源MT通过直传方式与基站通信, 直传链路能效值为:

$$\eta_{(s_i, d)}(P_{s_i}) = \frac{B \log_2(1 + \rho_{\min}) |h_{s_i d}|^2}{\rho_{\min} N} \quad (4)$$

2 中继分配算法

本文提出一种EERAA算法解决系统能效最大化问题。算法分3步执行: 1) 根据现有信道估计方法可以得到各节点之间的信道增益, 如果源MT与中继之间、中继与基站之间的信道质量均满足要求, 可以得到各源MT的候选中继集合。具体的信道估计方法并不是本文重点, 所以不再赘述, 参考文献[12]。2) 利用信道增益值, 通过式(4)计算得到直传链路能效值, 根据文献[13]中的能效优化功率注水思想求解最大化问题P2, 得到源MT协作链路最大能效值 $\eta_{(s_i, r_j, d)}$ 及对应的发射功率。3) 以此能效值作为权值, 通过最大权重匹配方法得到系统中各个源MT的最优传输路径, 达到最大化系统能效的目标。

协作通信系统中, 每一个源MT可以借助中继节

点协作传输数据或者直接与基站传输数据。受源MT与中继节点、基站之间的一对一匹配关系启发, 可以将P2转换成最大权重匹配问题, 并通过匈牙利算法求解。

基于以上分析, 构建最大权重匹配问题图 $G = (U, V, w)$ 。顶点集 $U = \{s_1, s_2, \dots, s_y, s_{y+1}, \dots, s_m\}$ 代表源MT集合, $V = Z_1 \cup D$ 表示中继集合与虚拟基站集合的并集, 其中 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 表示虚拟基站集合。如果 $s_i \in U, d_i \in D$, 则 $w(s_i, d_i) = \eta_{(s_i, d)}$, 如果 $s_i \in U, r_j \in Z$, 则 $w(s_i, r_j) = \eta_{(s_i, r_j, d)}^{\max}$ 。以直传链路能效和协作链路最大能效为权值, 通过MWM方法找到每个源MT与基站的最佳传输路径。

算法1 能效优化的中继分配算法(EERAA)

输入: $M = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}, Z = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}, D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}, Z_1 = \emptyset$;

输出: $(s_i, v) \quad v = d_i \text{ or } v \in Z_1, \eta$ 。

1) for to m do

2) $|h_{s_i r_j}|^2, |h_{s_i d}|^2$;

3) if $r_j \in Z \&\& |h_{s_i r_j}|^2 \geq h_{\min}$

4) T'_{s_i} ;

5) if $r_j \in T'_{s_i} \&\& |h_{r_j d}|^2 \geq h_{\min}$

6) T_{s_i} ;

7) $Z_1 = T_{s_i} \cup Z_1$;

8) $\eta_{(s_i, d)}$;

9) $w(s_i, d_i) = \eta_{(s_i, d)}$;

10) for $j = 1$ to sizeof(T_{s_i})

11) $\eta_{(s_i, r_j, d)}^{\max}$;

12) $w(s_i, r_j) = \eta_{(s_i, r_j, d)}^{\max}$

13) end

14) end

15) end

16)end

17) $G = (U, V, w), U = M, V = Z_1 \cup D$;

18) 最大权重匹配 G^* and return η ;

19) if $((s_i, v) \in G^*)$

20) return $v \quad (v = d_i \text{ or } v \in Z_1)$;

21) end

算法1给出了详细的中继分配算法步骤。其中, 步骤1)~步骤6)是接收端根据信道质量是否满足要求构建各源MT的候选中继集合; 步骤8)计算各源MT直传链路能效; 步骤10)~步骤11)计算源MT与其

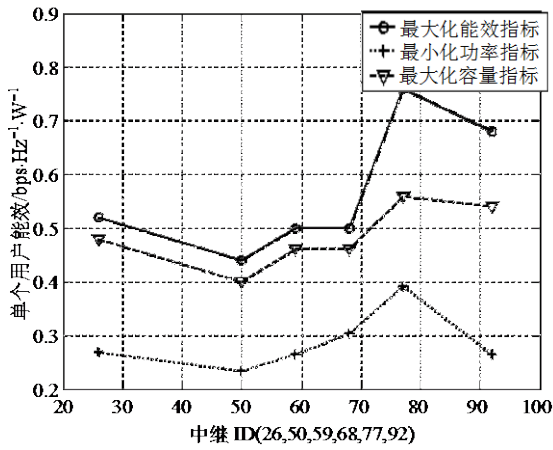


图3 源MT ID=2能效曲线图

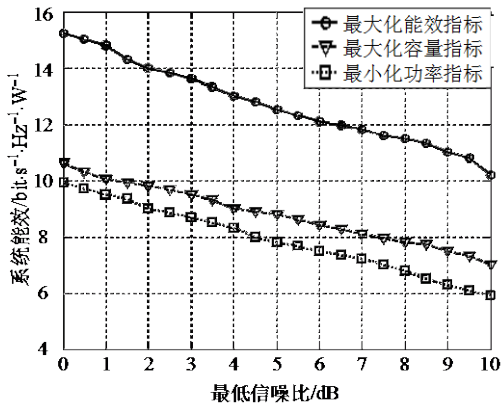


图4 系统能效随最低信噪比门限变化的曲线图

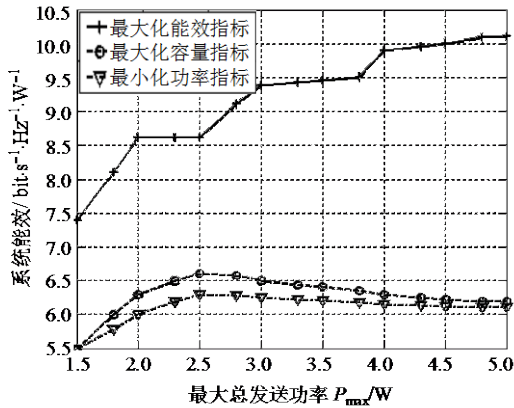


图5 系统能效随最大发送功率变化的曲线图

在最低信噪比 $\rho_{\min}$ 一定的条件下, 系统能效随着最大发送功率 $P_{\max}$ 变化而变化的曲线如图5所示。随着 $P_{\max}$ 的变化, 最大化问题P1在限制条件下的最优解也会变化, 甚至出现由无最优解变为有最优解的情况。如果 $P_{\max}$ 的值太小, 则达不到节点之间发送功率的要求, 最大化问题P1在限制条件下无最优解, 那么源MT就找不到中继节点为其转发数据; 反之源MT可以找到协作通信的中继节点。如图中 $P_{\max}$ 由1.5 W增加到2 W时, 可以达到部分距离较近节点

之间发送功率要求; 由2 W增加到2.5 W时, 源MT协作链路无法找到能效更大的中继节点, 经过EERAA算法系统能效没有增加; 但是 $P_{\max}$ 由2.5 W增加到3 W时, $P_{\max}$ 的值能够满足距离更远的节点发送功率要求, 经过EERAA算法系统能效明显增加。

数据率 $R=1.02$ bit/s/Hz时, 系统能效会随着用户数的增加而增加, 如图6所示。如果固定源MT个数, 系统能效则会随着最低信噪比门限增加而减少。这是因为信噪比的增加是以增加发送功率为代价的, 而功率的增加比容量要快。

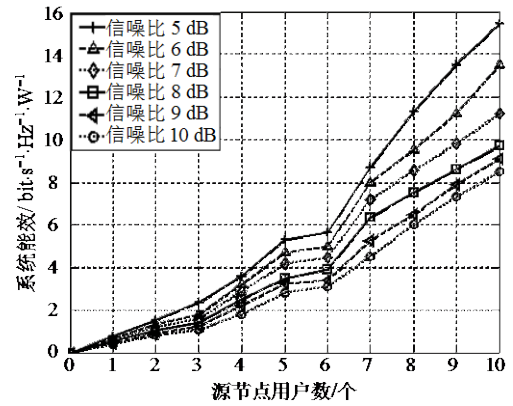


图6 系统能效随源MT数变化的曲线图

经过本文提出的最大权重匹配后的系统最大化能效与未经匹配的最大化能效对比如图7所示。未经匹配的最大化能效方法是各源MT从所有为自己转发数据的候选中继集合中选择能效最大的节点作为最佳中继, 如图2中源 s_6 和 s_7 能效最大的中继节点都是 r_{96} , 如果 s_6 先选择 r_{96} 作为自己的最佳中继, s_7 则只能选择 r_{54} , 此时两者能效和为3.2 bit/s/Hz/W, 然而经过最大权重匹配后能效和为3.26 bit/s/Hz/W。针对多个源MT竞争一个中继节点的情况, 经过系统全局匹配有序地分配中继节点, 有利于系统总能效的提高。从上述仿真结果可以看出, 本文的EERAA算法能够找到一个容量和发送功率之间的平衡, 对协作通信系统能效的提升有很大的意义。

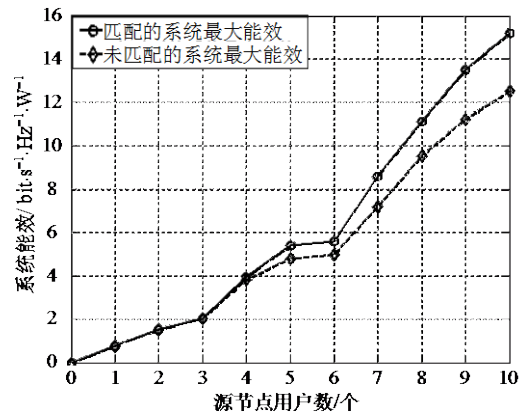


图7 系统能效随系统源MT变化的曲线图

4 结束语

本文针对上行多用户协作通信系统,以空闲MT作为中继节点,对能效优化的中继分配算法进行了研究。本文的EERAA算法在满足实际传输性能需求的前提下,以最大化系统能效为目标建立优化模型,借助最大权重匹配方法为各源MT分配最优中继,有效地提高了系统能效。仿真结果表明,该算法在能量使用效率方面比现有算法有显著提高。

参考文献

- [1] HANG T Z, HAO S Z, CUTHBERT L, et al. Energy-efficient cooperative relay selection scheme in MIMO relay cellular networks[C]//Proceeding of the 2010 IEEE International Conference on Communication Systems(ICC). Singapore: IEEE, 2010: 269-273.
- [2] 彭木根, 王文博. 协同无线通信原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
PENG Mu-gen, WANG Wen-bo. Principles and applications of collaborative wireless communication[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2008.
- [3] QI Sun, LI Li-hua, LEI Song. Energy efficient relay selection for two-way relay system[C]//2012 IEEE Vehicular Technology Conference(VTC). Japan: IEEE, 2012, 75: 1-5.
- [4] WEI Yi-fei, TENG Ying-lei, WANG Li, et al. Energy saving cooperative communication over fading channels with relay selection and power control[J]. China Communications, 2012, 9(6): 124-134.
- [5] MIN Zhou, CUI Qi-mei, RIKU J. Energy-efficient relay selection and power allocation for two-way relay channel with analog network coding[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(6): 816-819.
- [6] LI Peng, GUO Song, ZHUANG Wei-hua. Capacity maximization in cooperative CRNs: Joint relay assignment and channel allocation[C]//2012 IEEE International Conference on Communications(ICC). Canada: IEEE, 2012: 5097-5101.
- [7] PARK W, JEONG S, SONG H Y. The global optimality of the MIMO cooperative system with source and relay precoders for capacity maximization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(10): 2886-2892.
- [8] PHUYAL U, JHA S C, BHARGAVA V K. Green resource allocation with QoS provisioning for cooperative cellular network[C]//Canadian Workshop on Information Theory (CWIT). Canadian: IEEE, 2011: 206-210.
- [9] ZHOU Z, ZHOU S, CUI J, et al. Energy-efficient cooperative communications based on power control and selective single-relay in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(8): 3066-3078.
- [10] VANGANURU K, FERRANTE S, STERNBERG G. System capacity and coverage of a cellular network with D2D mobile relays[C]//2012 Military Communications Conference (MILCOM). Florida: IEEE, 2012: 1-6.
- [11] YANG De-jun, XI Fang, XUE Guo-liang. OPRA: Optimal relay assignment for capacity maximization in cooperative networks[C]//2011 IEEE International Conference on Communications(ICC). Kyoto: IEEE, 2011: 1-6.
- [12] BERTRAND P. Channel gain estimation from sounding reference signal in LTE[C]//2011 IEEE Vehicular Technology Conference(VTC Spring). Budapest: IEEE, 2011: 1-5.
- [13] 许杰. 基于能量效率的自适应多天线传输技术研究[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2012.
XU Jie. Multi-antenna transmission technology based on the energy efficiency of the adaptive[D]. Anhui: China University of Science and Technology, 2012.
- [14] WANG Wen-yi, WU Ren-biao. Capacity maximization for OFDM two-hop relay system with separate power constraints[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 4943-4954.

编辑 张俊