

多源多中继协同通信的快速中继选择算法

汪汉新,汪玉明

(中南民族大学 智能无线通信湖北省重点实验室,武汉 430074)

摘要 针对多源多中继协同通信系统的中继节点分配算法(ORA)复杂度较高和带宽消耗较大的问题,通过构建增益函数降序排列的候选中继集合降低检索次数,提出了一种快速中继分配算法(FRA)。同时为了提高系统总容量,通过中继节点之间选择性的再转发信号进一步优化接收端的信噪比,给出了一种优化系统容量的方法(OCA)。仿真结果表明:FRA可以降低中继选择的复杂度和带宽消耗,同时OCA可以提高系统的总容量。

关键词 协同通信;中继选择;系统容量;复杂度

中图分类号 TN911 文献标识码 A 文章编号 1672-4321(2018)01-0080-05

Fast Relay-Nodes Assignment Scheme in Cooperative MSMR System

Wang Hanxin, Wang Yuming

(Hubei Key Laboratory of Intelligent Wireless Communications, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

Abstract This paper presented a fast relay-node assignment (FRA) scheme with low complexity and low bandwidth consumption in multiple-source and multiple-relay (MSMR) cooperative communication system. The FRA algorithm was implemented by the constructed descending set according gain function. It also proposed an optimal capacity algorithm (OCA) to improve system capacity through the signal re-forward between relay-nodes. The simulation results show that FRA algorithm can reduce the complexity and bandwidth consumption, and OCA algorithm can further improve capacity for whole system.

Keywords cooperative communication; relay-node selection; capacity; complexity

无线传感网络中需要大量具有感知能力的节点相互协作共同完成通信任务。根据通信环境和通信要求的不同,选择合适的中继选择算法可以提高通信质量和系统性能。如何选择中继节点以降低中断概率^[1]、传输时延和能量消耗^[2]、提高频谱利用率^[3]以及系统容量^[4,5]和增设中继节点内存^[6]是无线传感网络的研究热点。中继节点的转发方式有放大转发 AF、解码转发 DF 和编码转发 CC^[7,8],其中 AF 转发方式最为简单且应用广泛,只需要将接收到的信号进行功率放大再转发即可^[9-11]。文献[1]中的基于最陡下降法在分配功率之后再进行中继选择的算法,虽然在一定程度上降低了中断概率,但需要进行二次功率分配。文献[4]提出了一种中继节点的 ORA 全局最优搜索算法,但当中继节点数量增加时,算法的复杂度呈指数增长,导致额外的能量消耗和带宽消耗。文献[5]提出了一种基于最大和最小准则的多中继选择

算法,但该算法不适用于源节点到目的节点之间有多个中继节点转发信息的情况。本文从降低算法复杂度和带宽消耗以及提升系统容量的角度出发,提出一种基于增益函数降序排列的候选中继集合的快速中继分配算法(FRA)和优化系统容量的方法(OCA)。首先,每个源节点到目的节点对 $S_i - D_i$ 对候选中继集合 T_i 中的元素构造一个增益函数 h_{ik} 并对其进行降序排列,其次 $S_i - D_i$ 从 T_i 中选择中继节点并在中继冲突时选择对应 T_i 中的下一个中继节点,然后 $S_i - D_i$ 从候选集合中选择出 m 个中继节点,最后,在 OCA 方法中通过中继节点之间选择性再转发一次信号来提升系统的总容量。

1 系统模型

n 个源节点到目的节点对 $\{(S_1, D_1), (S_2, D_2), \dots, (S_n, D_n)\}$ 且每一对 $S_i - D_i$ 分配 m 个中继

收稿日期 2017-10-23

作者简介 汪汉新(1966-)男,副教授,研究方向:信息与编码,E-mail:wanghx8888@163.com

基金项目 国家自然科学基金资助项目(61671483);湖北省自然科学基金重点项目(2016CFA089);中央高校基本科研业务费专项(CZP17003)

节点 $\{R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{im}\}$ 的多源多中继(MSMR)协同通信系统模型如图 1 所示。

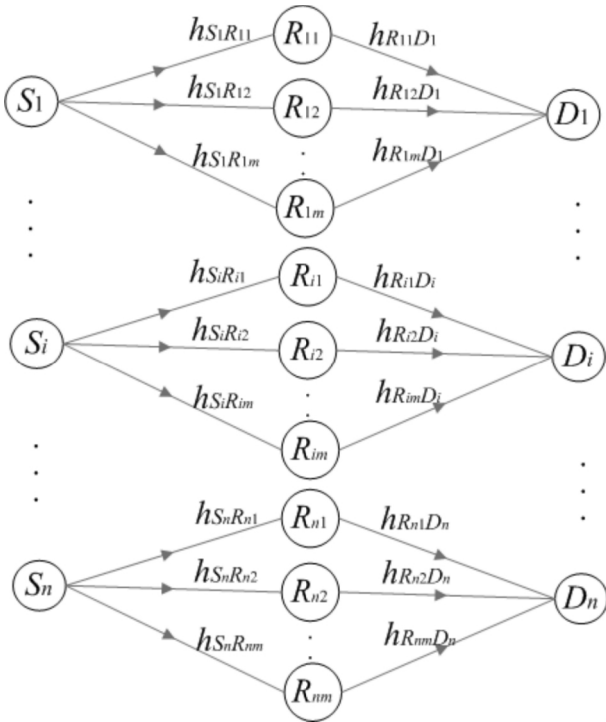


图 1 MSMR 协同通信系统

Fig.1 MSMR Cooperative communication System

其中 $h_{s_i R_{ij}}$ 和 $h_{R_{ij} D_i}$ 分别表示源节点 S_i 到中继节点 R_{ij} 以及 R_{ij} 到目的节点 D_i 之间的瞬时信道状态系数 (ICSI) 且所有的 ICSI 服从均值为 0, 方差为 N_0 的复高斯分布 所有链路噪声服从均值为 0, 方差为 N_0 的加性高斯白噪声 S_i 到 R_{ij} 以及 R_{ij} 到 D_i 之间的噪声分别用 $N_{s_{ij}}$ 和 $N_{R_{ij}}$ 表示. 为方便分析, 可以将 MSMR 系统拆分成 n 个单源多中继 (SSMR) 协同通信系统 在第 i 个 SSMR 系统采用 AF 方式进行中继转发, 中继节点 R_{ij} 和目的节点 D_i 接收到的信息分别表示为 $y_{s_i R_{ij}}$ 和 y_i :

$$y_{s_i R_{ij}} = \sqrt{\alpha_i P_i} h_{s_i R_{ij}} x_i + N_{s_{ij}}, \quad (1)$$

$$y_i = \sum_{j=1}^m \sqrt{\eta_{ij} P_j} h_{R_{ij} D_i} \beta_{ij} y_{s_i R_{ij}} + N_{R_{ij}}, \quad (2)$$

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{\eta_{ij} P_i}{\alpha_i P_i |h_{s_i R_{ij}}|^2 + N_0}}, \quad (3)$$

其中 x_i 表示 S_i 发送的原始信息 α_i 和 η_{ij} 分别为 S_i 和 R_{ij} 的功率分配系数 P_i 为第 i 个 SSMR 系统的总功率, β_{ij} 为 AF 转发方式下的放大系数.

第 i 个 SSMR 系统的容量 C_i 为:

$$C_i = \frac{W_i}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_{s_i D_i} |h_{s_i D_i}|}{N_0} \right) +$$

$$\sum_{j=1}^m \frac{\frac{P_{s_i R_{ij}} |h_{s_i R_{ij}}|^2}{N_0} \frac{P_{R_{ij} D_i} |h_{R_{ij} D_i}|^2}{N_0}}{\frac{P_{s_i R_{ij}} |h_{s_i R_{ij}}|^2}{N_0} + \frac{P_{R_{ij} D_i} |h_{R_{ij} D_i}|^2}{N_0}}, \quad (4)$$

其中 W_i 为带宽 $P_{s_i D_i}$ 和 $P_{s_i R_{ij}}$ 表示源节点 S_i 的发射功率 $P_{R_{ij} D_i}$ 表示中继节点 R_{ij} 的发射功率.

2 算法描述

文献 [4] 的优化中继分配算法 ORA 对每个源节点到目的节点对 (S_i, D_i) 仅分配一个中继节点的情况下得到最佳的中继分配, 然而, 一个中继节点带来的系统容量增益非常有限, 当 $S_i - D_i$ 分配多个中继节点时, ORA 算法的复杂度呈指数增长且带宽消耗较大. 本文提出一种基于增益函数降序排列的候选中继集合的快速中继分配算法 FRA 和通过中继节点之间选择性再转发的优化系统容量的方法 OCA, 在几乎不损失系统容量的情况下 FRA 算法可以有效地降低中继分配算法复杂度和带宽消耗, 且 OCA 可以改善系统的容量.

2.1 FRA 描述

在 MSMR 系统中, 有 n 个源节点到目的节点对 (S_i, D_i) 和 M 个潜在中继节点 $R_l (l = 1, 2, \dots, M)$ 且为每个节点对 (S_i, D_i) 分配 m 个中继节点, 每个中继节点转发一个 S_i 的信息.

首先 S_i 广播 RTS 信号给 R_l 和 D_i , D_i 反馈 CTS 信号给 S_i 和 R_l , R_l 根据接收到的 RTS 和 CTS 信号计算其到 S_i 和 D_i 之间的 ICSI 值 $h_{s_i R_l}$ 和 $h_{R_l D_i}$ 并根据 ICSI 值设置定时器 S_i 将前 $n \times m (n \times m \leq M)$ 个完成定时的 R_l 构造成自身的候选中继集合 T_i .

然后在第 i 个 SSMR 系统中构造 S_i 对 T_i 中的中继节点 $R_{ik} (k = 1, 2, \dots, n \times m)$ 的增益函数 h_{ik} :

$$h_{ik} = \frac{\frac{P_{S_i R_{ik}} |h_{S_i R_{ik}}|^2}{N_0} \cdot \frac{P_{R_{ik} D_i} |h_{R_{ik} D_i}|^2}{N_0}}{\frac{P_{S_i R_{ik}} |h_{S_i R_{ik}}|^2}{N_0} + \frac{P_{R_{ik} D_i} |h_{R_{ik} D_i}|^2}{N_0} + 1}, \quad (5)$$

其中 $h_{s_i R_{ik}}$ 和 $h_{R_{ik} D_i}$ 分别表示 S_i 到 R_{ik} 和 R_{ik} 到 D_i 的 ICSI. 令 $P_{s_i R_{ik}} = P_{R_{ik} D_i} = 1$ 以及 $N_0 = 1$ 此时 h_{ik} 可以表示为:

$$h_{ik} = \frac{|h_{s_i R_{ik}}|^2 \cdot |h_{R_{ik} D_i}|^2}{|h_{s_i R_{ik}}|^2 + |h_{R_{ik} D_i}|^2 + 1}. \quad (6)$$

再将 T_i 中的 R_{ik} 根据 h_{ik} 进行降序排列.

最后, 各 (S_i, D_i) 分别执行 m 轮从而选择出 m 个中继节点, 当选择第 j 个中继节点 R_{ij} 时, S_i 选择 T_i 中的第 1 个中继节点 R_{i1} , 若各 T_i 中的 R_{i1} 的下标不重

复 则 (S_i, D_i) 的第 j 个中继节点选择完成;若存在部分 T_i 中的 R_{i1} 的下标重合, 则将该重复的 R_{i1} 分配给 h_{ik} 最大的 (S_i, D_i) , 其余未选择到其对应 T_i 中 R_{i1} 的 (S_i, D_i) 将考虑选择 T_i 中的第二个中继节点 R_{i2} . 若各 R_{i2} 的下标不重复, 则 (S_i, D_i) 的第 j 个中继节点选择完成. 若存在部分 R_{i2} 的下标重复, 则将 R_{i2} 分配给对应 h_{ik} 最大的 (S_i, D_i) , 其余未选择 R_{i2} 的 (S_i, D_i) 考虑选择与其对应 T_i 中的第三个中继节点 R_{i3} , 以此类推, 直至每个 (S_i, D_i) 均选择到第 j 个中继节点. 然后从各 T_i 中清除掉本轮被选择的 n 个中继节点 R_{ij} 后再进行下一轮选择. 最终, 为每对 (S_i, D_i) 确定中继集合 $Q_i = \{R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{ij}, \dots, R_{im}\}$.

2.2 OCA 描述

传统协同通信的过程分为两个时隙^[12], 而 OCA 方法在传统方案的第一和第二时隙的中间增加了一个优化时隙. 在第 i 个 SSMR 系统中:

第一时隙: S_i 广播发送自身信息 x_i , 中继节点 R_{ij} 接受到的信号为 $y_{s_i R_{ij}}$.

第二时隙: 在 (S_i, D_i) 的 m 个中继节点中, 最优的中继节点 R_{opt} ($R_{opt} \subseteq Q_i$) 将自身的信号转发给其他中继节点 R_{ij} ($R_{ij} \subseteq Q_i, R_{ij} \neq R_{opt}$). R_{ij} 的接收信号 y_{opt-ij} ($opt \neq ij$) 为:

$$y_{opt-ij} = \sqrt{P_{R_{ij}}} h_{R_{ij}R_{ik}} y_{S_i R_{ij}} + N_{R_{ij}R_{ik}} \quad (7)$$

其中 $\sqrt{P_{R_{ij}}}$ 为中继节点 R_{ij} 的发射功率, $h_{R_{ij}R_{ik}}$ 和 $N_{R_{ij}R_{ik}}$ 分别表示中继节点 R_{ij} 到 R_{ik} 的 ICSI 和噪声.

若信号 y_{opt-ij} 优于 $y_{s_i R_{ij}}$, 则将 R_{ij} 的信号替换为 y_{opt-ij} , 否则 R_{ij} 的信号仍然为 $y_{s_i R_{ij}}$.

第三时隙: 各中继节点 R_{ij} 将最终接收到的信号转发给 D_i , 至此, 完成信号在一个周期内的传输.

3 性能分析

3.1 复杂度分析

在文献[4]提出的 ORA 算法中, 若为 (S_i, D_i) 初始化分配 m 个可用的中继节点且设 $M = mn^2$:

当 S_i 从初始化节点开始搜索时, 则 $n \times m$ 个中继节点优化一轮的计算复杂度 O_{ORA} 为:

$$O_{ORA} = \frac{m^2 n (m-1)}{2} + \mu_0 n_0 m^2 n^2 + mn^2 - mn, \quad (8)$$

其中 μ_0 表示主动搜索的源节点 S_i 占总源节点的百分比, n_0 表示进行主动搜索的源节点 S_i 在搜索到可替换中继节点前搜索其他源节点 S_j ($i \neq j$) 的个数.

当 S_i 从空闲节点搜索时, 则计算复杂度 O_{ORA} 为:

$$O_{ORA} = \frac{nm^2(n^2 + m - n - 1) + mn}{2} + mn(n-1). \quad (9)$$

文献[4]中, 当 $n = 40, m = 1$ 迭代 15 次之后得到了最优的中继分配, 其迭代次数近似为 $mn/3$, 因此, 我们假设为每个 (S_i, D_i) 分配 m 个中继节点时, 当迭代次数为 $mn/3$ 时, 其能获得最佳的中继分配, 于是, ORA 算法的总计算复杂度 O_{ORA}^{total} 为:

$$O_{ORA}^{total} = \begin{cases} \frac{1}{6} [2\mu_0 n_0 m^3 n^3 + m^4 n^2 - m^3 n^2 + 2m^2 n^3 - 2m^2 n^2] \\ \frac{1}{6} [m^3 n^5 + m^4 n^3 - 2m^3 n^4 + 2m^2 n^4 - m^4 n^2 + \\ m^3 n^2 - 3m^2 n^3 + m^2 n^2] \end{cases} \quad (10)$$

因此, 文献[4]中的 ORA 算法的复杂度为 $O(m^3 n^3 + m^4 n^2)$ 或 $O(m^3 n^5)$.

对于本文提出的 FRA 算法, 首先 n 个候选中继集合 T_i 需要根据 h_{ik} 的值进行降序排列, 比较运算的复杂度 O_{FRA1} 为:

$$O_{FRA1} = n \cdot \frac{n \cdot m (n \cdot m - 1)}{2} = \frac{1}{2} (m^2 n^3 - mn^2), \quad (11)$$

其次 n 个 S_i 选择 T_i 中的第一个中继节点 R_{i1} 作为 S_i 的第 1 个中继节点, 在第 1 轮选择中, 若有 $n/2$ 个 T_i 的 R_{i1} 相同, 将该重复的 R_{i1} 分配给 h_{ik} 最大的 $S_i - D_i$ 后, 余下没有选择到对应 T_i 中 R_{i1} 的 S_i 将选择对应 T_i 中的 R_{i2} . 此时, 有 $n/4$ 个 T_i 的 R_{i2} 相同. 以此类推, 直至每个 S_i 均完成选择第 1 个中继节点为止. 此过程的比较运算复杂度 O_{FRA2} 为:

$$O_{FRA2} = \sum_{\delta=1}^{t_0} \frac{n - \sum_{c=1}^{\delta} 2^c}{2^{\delta}}, \quad (n - \sum_{c=1}^{\delta} 2^c > 0), \quad (12)$$

其中 t_0 表示中继节点的重复次数, 若考虑平均复杂度, 则 $t_0 = \lceil \log_2 n \rceil$.

因此, 当每个 S_i 分配 m 个中继节点时, 比较运算的复杂度 O_{ORA}^{total} 为:

$$O_{ORA}^{total} = O_{FRA1} + m O_{FRA2} = \frac{1}{2} (m^2 n^3 - mn^2) + \sum_{\delta}^{t_0} \frac{m \cdot n - m \cdot \sum_{c=1}^{\delta} 2^c}{2^{\delta}}. \quad (13)$$

即 FRA 算法的复杂度为 $O(m^2 n^3)$. 需要特别指出的是, 当 R_{ix} ($x = 1, 2, \dots, t_0$) 存在多组重复时, FRA 算法的复杂度还要低于 $O(m^2 n^3)$.

综上所述, 在 MSMR 协同通信系统中, 若有 n 个 $S_i - D_i$ 节点对和 M 个潜在中继节点, 并且每个 $S_i - D_i$

分配 m 个中继节点,现有的 ORA 中继节点选择算法的复杂度为 $O(m^3 n^3 + m^4 n^2)$ 或 $O(m^3 n^5)$,而本文提出的快速中继节点选择算法 FRA 的复杂度仅为 $O(m^2 n^3)$,FRA 的复杂度得到明显地降低.

3.2 带宽消耗分析

当 ICSI 以 10MHz 带宽在 2.4GHz 频谱上且信道至少有 300ms 稳定时间的情况下,且设每条链路信道的信道状态值为 $32\text{bit}^{[13]}$.对于 ORA 算法,在不考虑直传链路的情况下,每对 $S_i - D_i$ 要获取 M 个中继节点的链路状态值,其总带宽消耗 BW_{ORA} 为:

$$BW_{ORA} = \frac{N_r \cdot A_r + N_d \cdot A_d}{0.3} = \frac{M \cdot (n \times 32) + n \cdot (M \times 32)}{0.3} = \frac{640}{3} Mn, \quad (14)$$

其中 N_r 和 N_d 分别表示中继节点 R_{ij} 和目的节点 D_i 的数量, A_r 和 A_d 分别表示每个中继节点 R_{ij} 和每个目的节点 D_i 接收到的链路状态信息的数量.

而对于 FRA 算法下,其总带宽消耗 BW_{FRA} 可表示为:

$$BW_{FRA} = \frac{N_r \cdot A_r + N_d \cdot A_d}{0.3} = \frac{nm \cdot (1 \times 32) + n \cdot (nm \times 32)}{0.3} = \frac{320}{3} mn(n + 1), \quad (15)$$

显然,当 $M = nm$ 时,

$$BW_{ORA} \approx 2BW_{FRA}, \quad (16)$$

而当 $M = nm^2$ 或者 $M = mn^2$ 时

$$BW_{ORA} \approx 2m \cdot BW_{FRA}, \quad (17)$$

$$BW_{ORA} \approx 2n \cdot BW_{FRA}, \quad (18)$$

因此, FRA 算法比 ORA 至少节省了一半的带宽消耗.

4 仿真实验

采用蒙特卡洛分析方法对本文提出的 FRA 和 OCA 进行仿真实验,所有的瞬时信道系数均服从均值为 0,方差为 1 的复高斯分布,所有链路的噪声为均值为 0,方差为 1 的加性高斯白噪声,所有节点的工作功率 $P=2W$ 且中继节点的总数量 $M=40$.

为验证本文提出的 FRA 算法在有效地减小复杂度的情况下不降低系统容量,对 FRA 算法和文献 [4] 的 ORA 算法进行了仿真实验对比.图 2 给出了当 $n = 2$, m 分别为 3, 5, 7, 9 时, FRA 和 ORA 算法的系统容量在信噪比 SNR 为 0 到 20 的实验结果.可以看出, FRA 和 ORA 算法的系统容量基本保持一致.

为了验证 FRA 和 ORA 算法的源节点优化选择

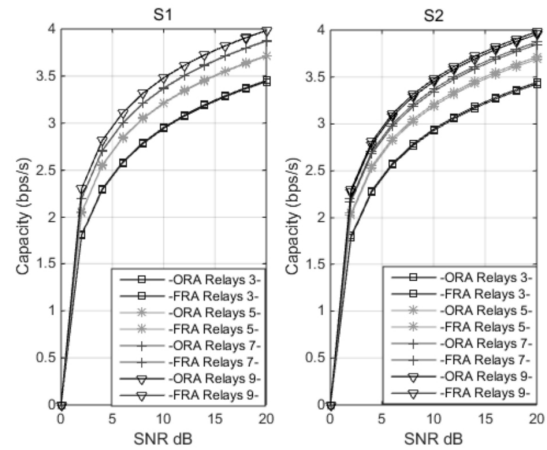


图 2 ORA 和 FRA 系统容量比较

Fig.2 Comparison of Capacity under FRA and ORA

中继节点的结果,表 1 给出了源节点 S_1, S_2 在 FRA 和 ORA 下,中继数量 m 为 3, 5, 7, 9 时的中继节点的下标信息,可以看出, S_1 和 S_2 在两种算法下仅存在一对不同的中继节点.

表 1 S_1 和 S_2 中继节点的下标信息

Tab.1 Relay-node index of S_1 and S_2 under ORA and FRA

ORA		FRA	
S_1	S_2	S_1	S_2
13	27	13	27
11	8	36	8
36	22	10	22
10	21	35	21
35	18	28	18
28	33	4	33
4	20	19	20
19	2	16	11
16	5	23	2

表 2 给出了 FRA 和 ORA 算法下源节点 S_1 分配 3, 5, 7, 9 个中继节点时的运行时间,可以看出, FRA 算法的快速中继节点选择的时间要远小于 ORA.表中的数据未呈现指数性倍数的规律,其原因是在仿真时进行了中继节点的过滤.

表 2 FRA 和 ORA 运行时间对比

Tab.2 Comparison of runtime under FRA and ORA

m	FRA	ORA
	S_1	S_1
3	0.5867s	7.9552s
5	0.6092s	8.1227s
7	0.6352s	8.4306s
9	0.6531s	8.8025s

为验证 OCA 方法能够提高系统的总容量,图 3 给出了 FRA 结合 OCA 算法与 ORA 算法在源节点 S_1, S_2 的中继节点数分别为 3, 5, 7, 9 时的系统容量对比.可以看出, FRA 结合 OCA 算法较 ORA 算法能够在一定的程度上提升整个系统的总容量.而 OCA 方

法最大的计算复杂度为 $n(m-1)$ 相对于文献 [4] 中

的 ORA 和本文的 FRA 算法可忽略不计。

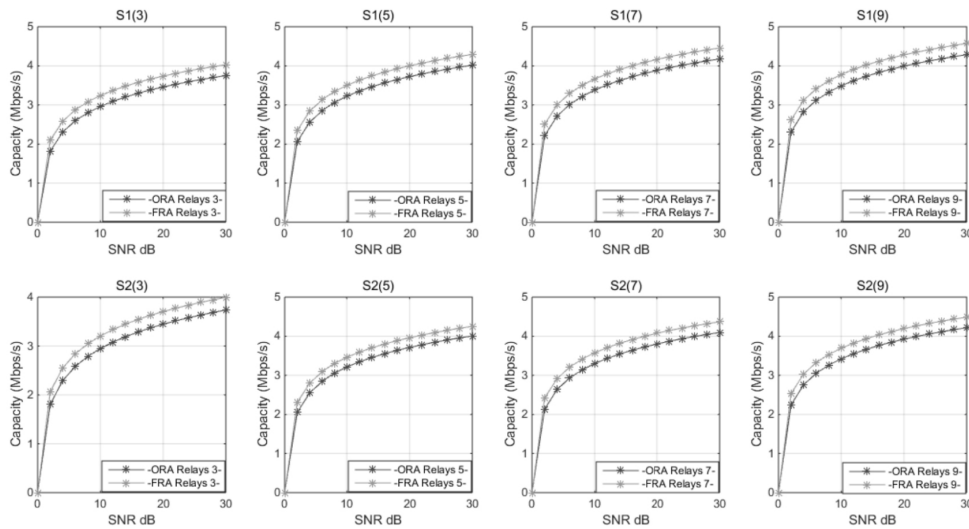


图 3 FRA 结合 OCA 算法与 ORA 算法的系统容量对比

Fig.3 Comparison of capacity under FRA+OCA and ORA algorithm

5 结束语

针对多源多中继协同通信系统提出了低复杂度的中继选择算法 FRA 和优化系统容量的方法 OCA. 通过 FRA 构建的中继节点集合可以在保证不降低系统容量的情况下减小源节点搜索中继节点的范围, 从而降低中继选择的复杂度和带宽消耗; 同时通过 OCA 在中继节点接收源节点后的再次优化, 从而提升整体的系统容量. 仿真实验证明了 FRA 可以有效降低系统复杂度和带宽消耗以及 OCA 可以提升系统的总容量.

参 考 文 献

- [1] 孙立悦 赵晓晖 毓 明. 基于中断概率的协作通信中继选择和功率分配算法[J]. 通信学报, 2013, 34(10): 84-91.
- [2] 罗梦麟 陈 勇 张建照 等. 协同认知无线网络中自适应中继节点选择算法[J]. 通信技术, 2015, 48(3): 318-324.
- [3] 仲福建 赵永驰. 全双工中继选择策略的性能研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 50(5): 912-916.
- [4] Sushant Sharma, Yi Shi, Y. Thomas Hou, et al. An optimal algorithm for relay node assignment in cooperative Ad Hoc networks [J]. IEEE/ACM Transactions on networking, 2011, 19(3): 879-892.
- [5] Minayi Jalil Amir, Meghdadi Vahid, Ghayeb Ali, et al. A simple optimal solution for relay assignment in cooperative systems based on the max-min criterion [C]//IEEE. 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Toronto: IEEE, 2011: 1768-1772.
- [6] 唐玄玄 杨文东 蔡跃明 等. 协同通信中的缓存辅助中继选择方案综述[J]. 军事通信技术, 2017, 38(1): 35-40.
- [7] Karunya Ch, Aloob.T, Kishore chavali Nanda, et al. A new amplify-and-forward relay based OFDM cooperative communication system [C]//IEEE. 2017 twenty-third National Conference on Communications (NCC). Chennai: IEEE, 2017: 1-6.
- [8] Mohammad R, Javan Nader Mokari, et al. Resource allocation in decode-and-forward cooperative communication networks with limited rate feedback channel [J]. IEEE Transaction on vehicular technology, 2017, 66(1): 256-267.
- [9] Aggelos Bletsas. A simple cooperative diversity method based on network path selection [J]. IEEE Journal on selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 659-672.
- [10] 吴素文 王 振 朱近康. 基于信道特性的中继选择协作通信方法的研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(11): 1136-1140.
- [11] 汪汉新 罗 霞. 基于信道统计平均的中继选择与功率优化算法[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 76-80.
- [12] Yazid M, Khattabi, Mustafa M, et al. Performance analysis of multiple-relay AF cooperative systems over rayleigh time-selective fading channels with imperfect channel estimation [J]. IEEE Transactions on vehicular technology, 2016, 65(1): 427-434.
- [13] Mandke K, Daniels RC, Choi SH, et al. Physical concerns for crosslayer prototyping and wireless network experimentation [C]//ACM. ACM Workshop Wireless Network. Canada: ACM, 2007: 11-18.

(责任编辑 颜昌学)