

# 复杂环境下双向协作通信研究

耿珂 胡坤 高强 熊华钢

(北京航空航天大学 电子信息工程学院 北京 100191)

**摘要:** 双向协作通信应用于航空自组网、车联网等未来无线通信,面临着高速运动环境下信道状态变化导致通信质量大幅下降问题。利用随机信道建模方式,考虑通信过程前后子阶段信道状态信息相关性,推导了信道状态联合概率密度闭式表达式;提出了以最小化系统中断概率为目标的最优功率分配策略以改善双向协作通信系统的中断性能。蒙特卡罗仿真结果表明在不同的系统平均信噪比、信道相关系数(与通信节点运动速度相关)下最优功率分配相比于等功率分配可有效提高系统中断性能。基于最优功率分配的双向协作通信能克服高速运动环境下信道状态变化问题,具有高可靠高速率特点,能为航空自组网、车联网等未来无线通信应用提供技术支撑。

**关键词:** 双向协作通信;中断概率;最优功率分配;时变信道

**中图分类号:** TN911 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Research on bidirectional cooperative communication in complex environment

Geng Ke Hu Kun Gao Qiang Xiong Huagang

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Two-way relaying (TWR) will be faced with the problem of QoS degradation because of time-varying channel when it is applied to the future applications such as aeronautical ad-hoc network and vehicle ad-hoc network. The channel model has been built which consider the correlation between two data transmission phases. The optimal power allocation (OPA) strategy to improve system performance is proposed, where minimizing the system outage probability is used as the optimization objective. The results produced by the Monte-Carlo simulation show that the proposed OPA strategy can enhance the system outage performance efficiently compared with equal power allocation (EPA) strategy under different signal-to-noise ratio (SNR) and different channel correlation coefficient, and more performance enhancement can be obtained with smaller channel fluctuation. Therefore the two-way relaying with OPA can be deployed in the high-speed motion environment such as aeronautical ad-hoc network and vehicle ad-hoc network.

**Keywords:** bidirectional cooperative communication; outage probability; optimal power allocation; time varying channel

## 0 引言

双向协作通信是近年发展起来的一种新型高效无线通信技术<sup>[1-2]</sup>,它采用协作节点作为中继转发两端节点传来的数据,从而实现两端节点之间同时通信,具有高可靠高速率的特点。当两端节点需要发送信息给对方时,两端节点同时将自身信息发送给各中继节点,而后各中继节点将接收到的混合信息转发给两端节点,这样两端节点消除掉自身发送信息便可检测出对方发送信息。由于两端节点接收到的是经过多个中继转发即多条独立正交信道的相同信息副本,所以虽然单个信道上传的信息可能经历恶劣的信道

衰落,但多个信道上传的信息同时经历恶劣衰落的可能性大大降低,因而相比传统单输入单输出(single-input single-output, SISO)通信大幅提高了可靠性。另外,由于可实现两端节点同时通信,相比单向协作通信可节省时间开销,从而有效提高传输速率。

运动节点的自组织网络通信是未来无线通信的重要方向。例如在航空自组网<sup>[3]</sup>中,一定范围内的航空飞行器之间互相转发控制指令信息,交换各自的飞行状态、感知信息等数据。在该网络中,每个飞行器不仅是收发器,还是路由器,可作为中继将数据转发给更远的飞行器。由于飞行器间一般距离较远,低空环境中又常有山峰或云雾等遮挡,导

致飞行器间无线信道路径损耗极大;环境中气团、云雾、树木等物体也广泛分布,多径散射严重,从而导致无线信道随机衰落也较为严重,使得其通信可靠性大幅下降。而飞行器之间需要实时交换大数据量信息,因此对数据传输速率提出较高的要求。此外,车联网作为一种高速移动的无线分布式网络,通过车与人、车与车、车与路之间的信息交互,能够实现智能交通管理、智能动态信息服务和车辆智能化控制的一体化<sup>[4]</sup>。与航空自组网类似,如何在车辆高速运动情况下实现信息高效可靠传输,成为亟待解决的问题。

一方面,航空自组网和车联网为代表的通信网络均具有多个通信节点,允许其中某些节点作为中继实现协作数据传输,可为双向协作通信的应用提供条件,并且其通信模式恰好与双向协作通信的工作模式相吻合。另一方面,双向协作通信可满足此类通信网络对高可靠高速率的通信要求。因此,双向协作通信对于航空自组网和车联网为代表的节点高速运动的通信环境具有重要的应用价值。

目前,双向协作通信的研究都是基于恒定信道<sup>[5]</sup>,即信道状态保持不变。而航空自组网和车联网等由于通信节点的高速运动和复杂多变的通信环境,导致信道状态可能随时间发生变化。有研究表明,在时变信道中,基于恒定信道的传输策略与机制并不适用,会导致通信质量的大幅下降。目前还没有时变信道下双向协作通信的研究报导。因此有必要研究双向协作通信在时变信道下的通信性能,并且从协作机制设计和中继选择策略等层面出发,研究提升双向协作通信抗时变能力的方法,从而实现节点高速或超高速运动环境下高可靠高速率的信息传输。

## 1 时变信道双向协作通信性能分析

### 1.1 信道建模

时变信道下双向协作通信性能分析需要先进行信道建模,传统对时变信道信道建模的研究大多采用测量的方式建立确定信道模型,如高速铁路通信方面的研究,但是适用场景单一计算量大,而且缺乏时变信道下双向协作通信性能分析所需要的信道概率密度函数表达式,用其求解中断概率、误包率、信道容量等表达式并分析系统性能。针对现有的信道模型不适用于快速时变信道下双向协作通信的问题,研究利用随机信道建模方式构建双向协作通信连续时变信道模型。根据信道快速变化的特性,划分通信过程为若干子阶段,分析当前子阶段的信道状态信息和前面多个子阶段信道状态信息的相关性,构建子阶段间高阶相关系数矩阵,利用该矩阵推导信道状态联合概率密度闭式表达式。

#### 1.1.1 建立信道概率密度函数

根据通信场景将通信过程划分为若干子阶段,子阶段的信道状态具有一定的相关性,进而子阶段信道状态之间的相关性可以量化为相关系数,由相应链路的多普勒频移以及传输阶段之间的时间间隔决定,采用 Jake 模型<sup>[6]</sup>来表

征。相关系数  $\rho$  与信道多普勒频移  $f_D$  和过时的时间间隔  $\tau$  的关系可以表示为  $\rho = J_0(2\pi f_D \tau)$ , 其中  $J_0(\cdot)$  为第一类零阶贝塞尔函数;针对信道变化迅速场景,数据传输时间长,子阶段数目多,各个子阶段之间的信道状态可能发生变化,子阶段内信道状态保持不变;构建多个子阶段相互之间的多阶相关矩阵,即当前子阶段的信道状态信息和前面多个子阶段都有关,建立连续时变模型。对于链路 A-B,  $J$  个信道强度采样值联合概率密度函数表示为:

$$f_{g_{AB}^{(1)}, g_{AB}^{(2)}, \dots, g_{AB}^{(J)}}(x_1, x_2, \dots, x_J) = \frac{1}{(4\pi)^J} |\det(\mathbf{C}^{-1})| \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \dots \int_0^{2\pi} \exp\left(-\frac{\mathbf{xGx}^T}{2}\right) d\theta_1 d\theta_2 \dots d\theta_J \quad (1)$$

式中:  $g_{AB}^{(i)}$  ( $i = 1, 2, \dots, J$ ) 为链路 A-B 第  $i$  个信道强度采样值,矩阵  $\mathbf{C} = (c_{ij})_{J \times J}$  表示  $J$  个信道采样值间相关性强弱,矩阵  $\mathbf{G}$  由矩阵  $\mathbf{C}$  的逆矩阵确定。

#### 1.1.2 迭代求解多重积分

针对根据信道状态概率密度函数产生连续时变信道涉及多重积分求解复杂的问题,由于积分变量多阶相关,需采用以下迭代方法对多阶相关多重积分进行处理:

1) 利用输入随机变量向量的边缘概率分布和相关系数矩阵,将输入随机变量转换成标准正态分布。

2) 利用首个子阶段信道强度和相关系数矩阵计算出一个子阶段的信道强度,采用迭代的方法以此类推,计算出各子阶段的信道强度。

3) 依据计算出的子阶段信道强度,对每重积分函数进行定积分计算,将该重定积分计算结果作为下一重定积分的被积函数,依照上述方法进行迭代,直到最终得到信道状态联合概率密度函数的闭式表达式。

### 1.2 双向协作通信可靠性和有效性分析

基于已建立的连续时变信道模型,推导时变信道下双向协作通信的中断概率<sup>[7-10]</sup>,误包率和信道容量的数学表达式,并给出容量上界。基于推导的公式,结合性能曲线,分析时变信道下各个节点的功率、目标速率、以及中继节点位置等因素对双向协作通信性能的影响。时变信道下先进行信道估计后进行数据传输的传输机制,会造成估计得到的信道状态过时,导致可靠性严重下降。因此,需要根据相应的性能分析结果对协作通信机制进行评判,并进一步研究时变信道下协作通信机制性能下降的原因。时变信道下信道变化导致选择的中继节点很可能不再是数据传输时最优的甚至可能是最差的,进而引起双向协作通信中继选择性能下降。首先需要分析中继选择存在的问题,评估时变信道下双向协作通信的研究价值,量化理论分析和实际仿真的差别,以及性能下降程度。接下来进行双向协作通信决策变量影响分析。

#### 1.2.1 中断概率、误包率和信道容量

假设两个端节点只要有一个通信发生中断则系统中断,即有一个端节点的接收信噪比达不到规定的信噪比阈

值要求时系统中断,则双向系统的中断概率定义为:

$$P_{\text{out}} = Pr\{\gamma_1 < \gamma_{\text{th}1} \text{ or } \gamma_2 < \gamma_{\text{th}2}\} = 1 - Pr\{\gamma_1 \geq \gamma_{\text{th}1}, \gamma_2 \geq \gamma_{\text{th}2}\} \quad (2)$$

式中:  $\gamma_{\text{th}1}$  和  $\gamma_{\text{th}2}$  分别为两个端节点的信噪比阈值。根据斯坦福大学 Cui 等学者提出的协作通信信噪比计算公式,结合全新时变信道模型的信道概率密度函数,可以推导双向协作通信系统中断概率闭式表达式。

在上述信道模型下,任意链路 A-B 上的误包率表示为:

$$p_{e,AB} = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \dots \int_0^{+\infty} \{1 - \prod_{j=1}^J (1 - p_{s,AB}^{(j)})\} \cdot f_{g_1^{(j)}, g_2^{(j)}, \dots, g_J^{(j)}}(x_1, x_2, \dots, x_J) \cdot dx_1 dx_2 \dots dx_J \quad (3)$$

式中:  $p_{s,AB}^{(j)}$  为第  $j$  个符号的误符号率,可根据选用的调制方式利用已有的误符号率计算公式求得。通过各条链路的误包率,利用概率论的相关理论进行数学处理,计算得到双向协作通信系统的误包率。

同理,基于时变信道模型的信道概率密度函数,结合双向协作通信的特征,可推导信道容量的数学表达式,并推导容量上界。

### 1.2.2 时变信道对协作机制性能的影响

利用传统的先进行信道估计后进行数据传输的传输机制,结合上文推导的数学表达式,基于相应的目标函数,可得到传统的传输机制下双向协作通信的表达式。

一方面,将时变信道下速度、频率等因素作为单一自变量的性能指标函数,得到单一自变量影响的性能曲线,分析单一变量对于双向协作通信传输机制可靠性和有效性的影响。

另一方面,考虑速度、频率等因素多变量同时作用,每一条通信链路的信道状态变化情况更加复杂,通过仿真模拟的方法得到联合变量对于双向协作通信中继概率,误码包率以及信道容量的性能曲线,和恒定信道环境下的性能曲线做对比,分析联合变量对于协作机制性能的影响。

## 2 基于最优功率分配的双向协作通信

双向协作通信在时变信道下的中断性能相比恒定信道的会严重恶化,因此有必要研究合适的策略来提高系统在分组衰落信道下的可靠性<sup>[11-13]</sup>。功率分配是一种重要的链路自适应技术,通过对系统中节点的发送功率进行控制,可以有效提高系统性能<sup>[14-17]</sup>。为此提出最优功率分配的双向协作通信技术,以最小化系统中断概率为目标,建立最优化问题并求解。

功率分配问题可以表示成下面的数学优化问题

$$\begin{aligned} & \min_{P_1, P_2, P_R} P_{\text{out}} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} P_1 + P_2 + P_R = P_t \\ 0 \leq P_1, P_2, P_R \leq P_{\text{max}} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $P_t$  表示系统在一轮数据交换过程中所允许消耗的最大发送功率;  $P_{\text{max}}$  表示每个节点所能提供的最大发送功率。

这里  $P_{\text{max}}$  和  $P_t$  之间的关系为  $P_{\text{max}} = KP_t, 1/3 < K < 1$ 。

由于中断概率的渐近表达式与闭式表达式差距不大,而渐近表达式的形式比闭式表达式要简洁的多,可依据中断概率渐近表达式进行功率分配,因此根据两端节点的信噪比阈值之比  $\tau = \gamma_{\text{th}1}/\gamma_{\text{th}2}$  系统中断概率如下分段函数:

当  $\tau \leq P_2\psi_2/P_1\phi_1$  时,

$$P_{\text{out}}^{(1)} = \left( \frac{1-\rho^2}{\rho^2} \left( \frac{P_2\sigma_2^2}{P_1\sigma_1^2} \right) + \frac{\sigma_n^2}{\rho^2 P_R} \left( \frac{P_2}{P_1\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} \right) + \frac{\sigma_n^2}{P_1\sigma_1^2} \right) \gamma_{\text{th}2} \quad (5)$$

当  $P_2\psi_2/P_1\phi_1 < \tau < P_2\psi_1/P_1\phi_2$  时,

$$P_{\text{out}}^{(2)} = \left( \frac{(1-\rho^2)P_1\sigma_1^2}{\rho^2 P_2\sigma_2^2} + \frac{\sigma^2}{P_2\sigma_2^2} + \frac{P_1\sigma_n^2}{\rho^2 P_R P_2\sigma_2^2} \right) \gamma_{\text{th}1} + \left( \frac{(1-\rho^2)P_2\sigma_2^2}{\rho^2 P_1\sigma_1^2} + \frac{\sigma_n^2}{P_1\sigma_1^2} + \frac{P_2\sigma_n^2}{\rho^2 P_R P_1\sigma_1^2} \right) \gamma_{\text{th}2} \quad (6)$$

当  $\tau \geq P_2\psi_1/P_1\phi_2$  时,

$$P_{\text{out}}^{(3)} = \left( \frac{1-\rho^2}{\rho^2} \left( \frac{P_1\sigma_1^2}{P_2\sigma_2^2} + 1 \right) + \frac{\sigma_n^2}{\rho^2 P_R} \left( \frac{P_1}{P_2\sigma_2^2} + \frac{1}{\sigma_1^2} \right) + \frac{\sigma_n^2}{P_2\sigma_2^2} \right) \gamma_{\text{th}1} \quad (7)$$

由于系统中断概率是 3 个区间上的分段函数,故将优化问题分解为 3 个子问题分别求解,最终获得该优化问题的解。对于每个子优化问题,采用黄金分割算法进行求解,以减小数值求解的复杂度。黄金分割算法流程如图 1 所示。

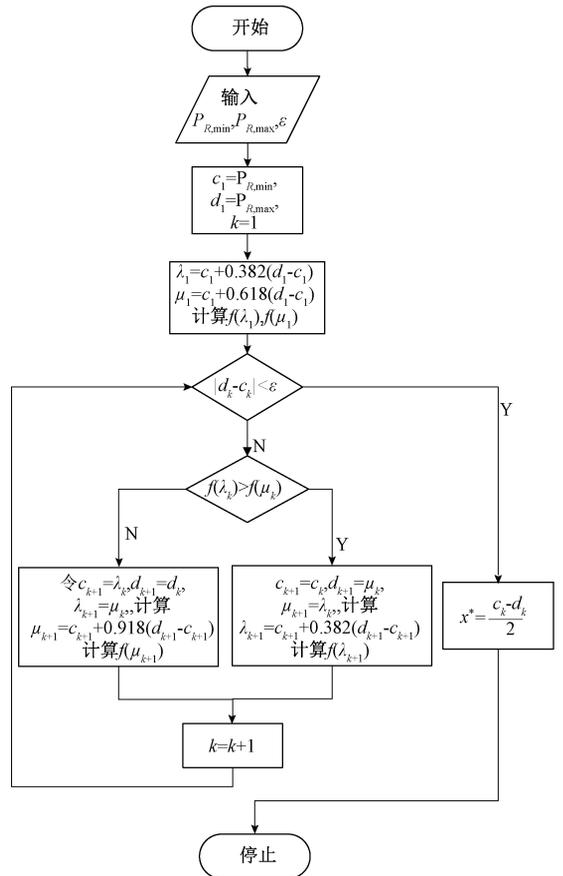


图 1 黄金分割算法流程

### 3 最优功率分配的中断性能

下面对分组衰落信道下采用最优功率分配的双向协作通信系统中断性能进行分析。基于 MATLAB 编程进行数值和仿真计算。数值计算是基于推导的中断概率表达式进行计算。仿真计算采用蒙特卡罗仿真方法,通过多次试验模拟信道随机变化进行统计分析。

考虑一个的 3 节点通信网络,包括 2 个端节点 S1,S2 和一个中继节点 R。2 个端节点要实现同时发送信号给对方。中继节点进行数据转发,帮助两端节点实现同时通信。系统仿真参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

参数	值
链路 S1-R 的信道方差	$\sigma_1^2 = 10$
链路 S1-R 的信道方差	$\sigma_2^2 = 10$
端节点 S1 信噪比阈值/dB	$\gamma_{th1} = -15$
端节点 S2 信噪比阈值/dB	$\gamma_{th2} = -5$
黄金分割算法收敛精度	$\epsilon = 10^{-4}$

信道相关系数  $\rho$  是反映分组衰落信道中 2 个数据阶段间的信道相关程度的,即反映信道随时间变化的快慢程度。图 2 所示给出了不同信道相关系数下,所提出的最优功率分配策略与等功率分配策略的中断概率随平均信噪比的变化情况。从图 2 中可以看出,对于不同的信道相关系数值,所提出的最优功率分配策略在任何平均信噪比下都比等功率分配获得更好的中断性能。图 2 中的 3 组曲线分别是  $\rho=0.9, \rho=0.99$  和  $\rho=1$ ,将  $\rho \neq 1$  与  $\rho=1$  的曲线进行对比可以发现,后者对应的最优功率分配策略对中断性能的改善效果更明显。也就是当信道变化程度比较小的时候,所提出的功率分配策略性能更好。虽然在分组衰落信道下,所提出的功率分配策略仍然会出现高信噪比下的平台现象,但是它相比于等功率分配的中断概率的确有较大幅度的下降,这可以反映出所提策略的有效性。

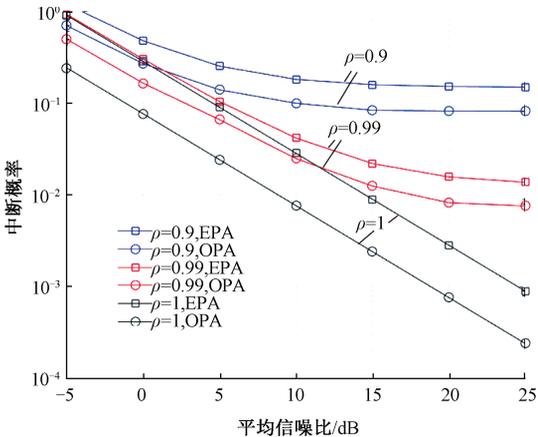


图 2 不同信道相关系数下中断性能

图 3 所示给出了在不同平均信噪比条件下所提出的最优功率分配策略和等功率分配的系统中断概率随信道相关系数的变化情况。从图 3 中可以看出,对于 SNR=0 dB 和 SNR=20 dB,所提的功率分配策略中断性能在不同的信道相关系数下均好于等功率分配。另外,可以看出对于系统平均信噪比较高的情况,最优功率分配对中断性能的改善程度受信道相关系数的影响不大,如图 3 中 SNR=20 dB 的两条曲线。但是信噪比较低的情况如 SNR=0 dB 时,最优功率分配策略对中断性能的改善程度在信道相关系数较小的时候受其影响较大。如  $\rho$  取 0.6~0.75 的范围,中断概率改善程度随信道相关系数变化变化较快。这说明在信道变化较快时,需要尽可能增大发送功率来提高功率分配的效果。但是在信道变化较慢的情况下,即使系统信噪比较低,采用最优功率分配也可以获得比较好的效果。

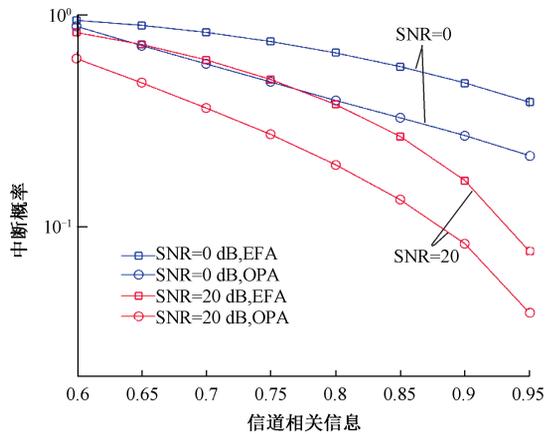


图 3 不同平均信噪比下中断性能

### 4 结 论

双向协作通信是近年发展起来的高效无线通信技术,它采用协作节点作为中继转发两端节点传来的数据,从而实现两端节点之间同时通信,具有高可靠、高速率的特点,对以航空自组网、车联网为代表的节点高速运动环境下无线通信具有重要应用价值。然而通信节点的高速运动和复杂的通信环境会导致信道状态随时间发生变化,基于恒定信道的传输策略与机制并不适用,使得双向协作通信质量大幅下降。

对复杂环境下的双向协作通信的性能进行研究,结合具体应用场景提出了提高系统性能的解决方案。首先,建立了时变信道模型,在此基础上进行双向协作通信性能分析。其次,提出了基于最优功率分配的双向协作通信机制,以最小化系统中断概率为目标建立最优化问题,采用黄金分割算法获得优化问题的最优解。最后,对所提出的最优功率分配策略的性能进行分析,蒙特卡罗仿真结果表明最优功率分配相比于等功率分配可以有效提高系统的中断性

能,并且在信道变化较慢的情况下改善效果更明显。

## 参考文献

- [1] KIM S J, MITRAN P, JOHN C, et al. Coded bi-directional relaying in combat scenarios [C]. Military Communications Conference, IEEE, 2007:1-7.
- [2] POPOVSKI P, YOMO H. Wireless network coding by amplify-and-forward for bi-directional traffic flows[J]. IEEE Communications Letters, 2007, 11(1):16-18.
- [3] 郑博,张衡阳,王宝良,等. 航空自组网负载均衡地理路由策略[J]. 通信学报, 2016(12):67-76.
- [4] 彭军,马东,刘凯阳,等. 基于 LTE D2D 技术的车联网通信架构与数据分发策略研究[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 62-70.
- [5] JANG S, AHN M, LEE H, et al. Antenna selection schemes in bi-directional full-duplex MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12):10097-10100.
- [6] VAN TREES, HARRY L. Detection, Estimation, and Modulation Theory: Part 1[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [7] SHIM Y, PARK H. A closed-form expression of optimal time for two-way relay using DF MABC protocol[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(5):721-724.
- [8] YADAV S, CHAWLA R, UPADHYAY P K. Outage performance and location optimization for traffic-aware two-way relaying with direct link [C]. International Conference on Signal Processing & Communications, IEEE, 2016:1-5.
- [9] LI Q, TING S H, PANDHARIPANDE A, et al. Adaptive two-way relaying and outage analysis [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(6):3288-3299.
- [10] VICARIO, BEL, MORELL, et al. A robust relay selection strategy for cooperative systems with outdated CSI [C]. IEEE Vehicular Technology Conference, 2009:1-5.
- [11] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex Optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [12] JOSÉ LÓPEZ VICARIO, BEL A, JOSÉ A LOPEZ-SALCEDO, et al. Opportunistic relay selection with outdated CSI: Outage probability and diversity analysis[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(6):2872-2876.
- [13] YI Z, JU M C, KIM I M. Outage probability and optimum power allocation for analog network coding [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(2):407-412.
- [14] GUO H, GE J H. Outage probability of two-way opportunistic amplify-and-forward relaying [J]. Electronics Letters, 2010, 46(13):918-919.
- [15] JI X, ZHU W P, MASSICOTTE D. Transmit power minimization for two-way amplify-and-forward relaying with asymmetric traffic requirements [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 9687-9702.
- [16] UPADHYAY, PRAKRIYA. Performance of analog network coding with asymmetric traffic requirements[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(6):647-649.
- [17] JI X, ZHU W P, MASSICOTTE D. Adaptive power control for asymmetric two-way amplify-and-forward relaying with individual power constraints [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(9): 4315-4333.

## 作者简介

**耿珂**,1987 年出生,博士、工程师,主要研究方向为协作通信。

E-mail:gkbuaaee@163.com

**胡坤**,1992 年出生,硕士研究生,主要研究方向为协作通信。

**高强**,1971 年出生,博士、教授,主要研究方向为无线通信与网络。

**熊华钢**,1961 年出生,博士、教授,主要研究方向为通信网络理论与技术。