

基于 QoS 要求的全双工中继多载波安全系统的功率分配研究

马丕明^{*①} 梁 绥^① 马艳波^② 熊海良^① 杨 阳^①

^①(山东大学信息科学与工程学院 济南 250100)

^②(山东财经大学管理科学与工程学院 济南 250014)

摘 要: 针对采用非理想干扰消除的全双工中继的多载波安全通信系统, 借助安全有效容量引入时延服务质量(Quality-of-Service, QoS)限制, 该文提出一种满足统计时延 QoS 要求的功率分配策略。在对中继干扰功率和总功率进行限制的条件下, 考虑统计时延 QoS 要求, 以最大化系统的安全有效容量为目标, 建立优化问题, 研究系统的功率分配策略。进一步, 通过泰勒近似方法, 简化原凸优化问题, 并基于拉格朗日对偶方法和卡罗需-库恩-塔克(Karush-Kuhn-Tucker, KKT) 条件, 采用子梯度迭代法得到最优解并进行仿真验证。仿真结果表明, 提出的最优功率分配策略可以获得最大的安全有效容量, 同时可以满足时延 QoS 要求。

关键词: 全双工中继; 安全有效容量; 功率分配; 拉格朗日对偶方法; 子梯度迭代方法

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)04-0860-06

DOI: 10.11999/JEIT160461

QoS-driven Power Allocation over Multicarrier Full-duplex-Relay Secure Communication System

MA Piming^① LIANG Sui^① MA Yanbo^② XIONG Hailiang^① YANG Yang^①

^①(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

^②(School of Management Science and Engineering, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China)

Abstract: For a multicarrier full-duplex-relay secure communication system with imperfect loop-interference cancelations, an optimal power allocation strategy with the statistical delay Quality-of-Service (QoS) guarantees is proposed, by using the delay QoS constraint with the concept of the secure effective capacity. Considering the statistical delay QoS guarantees and aiming to maximize the secure effective capacity, an optimization problem is formulated with the constraints of powers of both the whole system and the loop-interference of full-duplex relay. Then, in order to study the power allocation strategy, the original optimization problem is simplified by Taylor approximation and the problem is solved based on Lagrangian dual method and Karush-Kuhn-Tucker conditions. Therefore, the optimal solution is obtained by the sub-gradient iterative algorithm and simulation results are presented. The results show that the proposed optimal power allocation strategy can not only get the largest secure effective capacity but also satisfy the upper layer delay QoS requirement.

Key words: Full-duplex relay; Secure effective capacity; Power allocation; Lagrangian dual method; Sub-gradient iterative algorithm

1 引言

无线传输媒介的开放性使得无线通信网络的安全性问题越来越重要, 利用物理层资源获得信息安全传输的物理层信息安全技术, 成为研究热点。为提高安全系统的性能和资源利用率, 以 Wyner 提出的保密速率为基础、基于信息论角度的安全通信系统的资源分配问题获得了广泛关注^[1,2]。同时, 采用

干扰消除技术的全双工中继无线通信系统, 比半双工系统具有更高的频谱资源利用率^[3]。以正交频分复用为代表的多载波技术, 资源利用灵活, 抗衰落能力强, 在无线通信系统中得到广泛应用^[4-6]。针对单用户多载波的全双工中继安全系统, 文献[6]以最大化安全速率为目标, 研究信源和中继节点的功率分配问题。

另一方面, 在时延敏感的网络应用环境中, 时延服务质量(Quality-of-Service, QoS)是无线网络重要的性能指标^[7,8]。事实上, 由于衰落信道具有时变性, 满足严格的时延 QoS 约束很难。因此, 转化为研究满足统计时延 QoS 的问题。所谓的统计时延

收稿日期: 2016-05-09; 改回日期: 2016-12-02; 网络出版: 2017-01-22

*通信作者: 马丕明 mapiming@sdu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61571272, 61401253)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61571272, 61401253)

QoS 要求指的是对于给定的时延界限, 系统能够保证的时延违约概率, 其中时延违约概率也就是系统超出给定时延界限的概率。文献[7]提出有效容量的概念, 描述了在保证一定的统计时延 QoS 要求的情况下, 系统可以获得的最大的传输速率, 表征系统的吞吐量与统计时延 QoS 的关系, 在资源分配方面的研究中得到广泛应用^[9,10]。进一步, 针对安全通信系统, 文献[11]和文献[12]采用无线网络的跨层联合优化思想, 将保密速率与有效容量联系在一起, 给出安全有效容量的定义, 建立物理层机制(如功率分配和子载波分配等)与数据链路层的队列缓存间的联系。安全有效容量体现安全系统中的容量与统计时延 QoS 要求的关系, 表征了安全系统的性能。以此概念为基础, 文献[11]和文献[12]进行了通信系统资源分配的研究。但是, 针对全双工多载波的安全系统, 这方面研究还有待展开。

因此, 为弥补现有研究的不足, 本文针对采用非理想干扰消除的全双工中继的多载波安全通信系统, 在对中继干扰功率和总功率进行限制的条件下, 考虑统计时延 QoS 要求, 以最大化系统的安全有效容量为目标, 研究系统的功率分配策略, 建立优化问题。进一步, 采用泰勒近似^[13]方法, 简化原凸优化问题, 并基于拉格朗日对偶方法求解^[14], 得到最优解并进行仿真验证。

2 系统模型和安全有效容量

2.1 系统模型

考虑包含一个窃听节点的点到点安全通信系统, 单天线的信源节点 S 和信宿节点 D 之间距离较远, 二者由全双工工作的中继节点 R 进行连接, 如图 1 所示。窃听节点 E 也配置一根天线, 只能接收到中继节点的信息。中继节点配置一根接收天线和一根发送天线, 采用解码转发(Decode and Forward, DF)模式, 可以在接收信源节点信息的同时, 向信宿节点发送信息。

同时, 为克服无线信道的频率选择性衰落, 系统采用多载波技术, 将整个信道分成 K 个相互正交

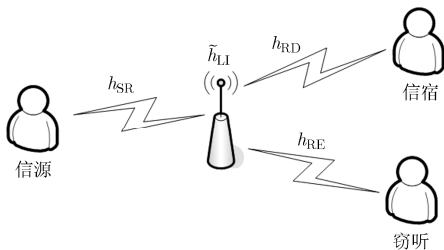


图1 全双工中继多载波安全系统模型

的子信道, 共有 K 个子载波。对第 k 个子载波, 设信源节点和中继节点的发送信号分别为 $x_S^{(k)}$ 和 $x_R^{(k)}$, 相应的信号的平均功率为 $p_S^{(k)}$ 和 $p_R^{(k)}$ 。同时, 对第 k 个子载波, 信源节点到中继节点、中继节点到信宿节点、中继节点到窃听节点的 3 个链路的信道响应分别表示为 $h_{SR}^{(k)}$, $h_{RD}^{(k)}$, $h_{RE}^{(k)}$, 则信宿节点和窃听节点的接收信号分别表示为

$$y_D^{(k)} = h_{RD}^{(k)} x_R^{(k)} + n_D^{(k)} \quad (1)$$

$$y_E^{(k)} = h_{RE}^{(k)} x_R^{(k)} + n_E^{(k)} \quad (2)$$

其中, $n_D^{(k)}$ 和 $n_E^{(k)}$ 为信宿节点和窃听节点的加性噪声, 噪声功率为 σ_D^2 和 σ_E^2 。

由于非理想干扰消除, 中继节点会产生环路的自干扰, 第 k 个子载波上的中继节点的自干扰链路的信道响应表示为 $\tilde{h}_{LI}^{(k)}$, 则在第 k 个子载波上中继节点的接收信号为

$$y_R^{(k)} = h_{SR}^{(k)} x_S^{(k)} + \tilde{h}_{LI}^{(k)} x_R^{(k)} + n_R^{(k)} \quad (3)$$

其中, $n_R^{(k)}$ 为中继节点的功率为 σ_R^2 的噪声。

相应地, 对第 k 个子载波, 4 条传输链路的参数化的信噪比分别为 $\gamma_{SR}^{(k)} = |h_{SR}^{(k)}|^2 / (\sigma_R^{(k)})^2$, $\gamma_{RD}^{(k)} = |h_{RD}^{(k)}|^2 / (\sigma_D^{(k)})^2$, $\gamma_{LI}^{(k)} = |\tilde{h}_{LI}^{(k)}|^2 / (\sigma_R^{(k)})^2$ 和 $\gamma_{RE}^{(k)} = |h_{RE}^{(k)}|^2 / (\sigma_E^{(k)})^2$ 。由此, 中继节点、信宿节点和窃听节点的信干噪比分别为 $\gamma_R^{(k)} = p_S^{(k)} \gamma_{SR}^{(k)} / (1 + p_R^{(k)} \gamma_{LI}^{(k)})$, $\gamma_D^{(k)} = p_R^{(k)} \gamma_{RD}^{(k)}$ 和 $\gamma_E^{(k)} = p_R^{(k)} \gamma_{RE}^{(k)}$ 。在以上基础上, 下面来计算系统的保密速率和安全有效容量。

2.2 保密速率和安全有效容量

保密速率是安全系统可获得的最大传输速率。对全双工解码转发中继通信系统, 根据文献[3]、文献[5]和文献[15], 第 k 个子载波的保密速率为

$$R_{\text{sec}}^{(k)} = \left\lceil \log_2 \left(\frac{1 + \min \{ \gamma_R^{(k)}, \gamma_D^{(k)} \}}{1 + \gamma_E^{(k)}} \right) \right\rceil \quad (4)$$

其中, $\lceil x \rceil$ 表示对 $\{x, 0\}$ 取最大值。因此, 整个系统的保密速率为所有子载波上的保密速率之和, 可以表示为

$$R_{\text{sec}} = \sum_{k=1}^K R_{\text{sec}}^{(k)} \quad (5)$$

另一方面, 传统的物理层安全通信以香农理论为基础, 没有考虑数据在传输过程中的时延问题。因此, 针对时延敏感的多媒体传输环境, 采用无线网络的跨层联合优化思想, 借助安全有效容量, 描述安全通信系统中时延指数与保密速率的关系。安全有效容量定义在给定时延指数的条件下, 系统可以获得的最大的安全传输的速率^[11]。

设系统带宽为 B , 每帧时间长度为 T_f , 链路层的时延 QoS 指数 θ , 则安全有效容量定义为^[11]

$$E_{\text{sec}}(\theta) = -\frac{1}{\theta} \ln \left(\mathbb{E}_\gamma \left[e^{-\theta B T_f R_{\text{sec}}} \right] \right) \quad (6)$$

其中, \mathbb{E}_γ 表示对信道的信干噪比参数求数学期望。可以看出, 安全有效容量 $E_{\text{sec}}(\theta)$ 是时延 QoS 指数 θ 的单调递减函数。对于时延敏感的多媒体业务, 给定时延指数 θ , 可计算安全有效容量。时延指数 θ 越小, 表示时延 QoS 要求越低; 反之, θ 越大, 时延 QoS 要求则越高。

将式(5)式代入(6)式, 可得全双工多载波安全系统的安全有效容量为

$$E_{\text{sec}}(\theta) = -\frac{1}{\theta} \ln \left\{ \mathbb{E}_\gamma \left[e^{-\theta B T_f \sum_{k=1}^K R_{\text{sec}}^{(k)}} \right] \right\} \quad (7)$$

安全有效容量不仅体现物理层相关机制与链路层的排队过程, 还可体现排队过程与物理层服务间的关系。因此, 论文基于安全有效容量理论, 研究多载波全双工中继安全系统满足用户统计时延 QoS 保证下的功率分配策略。

3 基于 QoS 要求的功率分配策略

3.1 问题规划

物理层与数据链路层通过安全有效容量相关联。给定安全有效容量较大时, 链路层的缓存队列较为松弛, 可以满足较为严格的统计时延 QoS 要求。因此, 在考虑系统总功率限制的条件下, 为保证全双工中继信息传输的可靠性, 对中继接收天线所产生的剩余环路干扰功率进行限制, 并以最大化安全有效容量为目标, 进行问题规划, 得到的优化问题为

$$\begin{aligned} \max_{\{p_1, p_2\}} & -\frac{1}{\theta} \ln \left\{ \mathbb{E}_\gamma \left[e^{-\theta B T_f R_{\text{sec}}} \right] \right\} \\ \text{s.t.} & \mathbb{E}_\gamma \left[\sum_{k=1}^K (p_S^{(k)} + p_R^{(k)}) \right] \leq P_T \\ & \mathbb{E}_\gamma \left[\sum_{k=1}^K p_R^{(k)} \gamma_{\text{LI}}^{(k)} \right] \leq P_{\text{LI}} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, 中继节点发射功率矢量 $\mathbf{p}_1 = (p_R^{(1)}, p_R^{(2)}, \dots, p_R^{(K)})$, 信源节点发射功率矢量 $\mathbf{p}_2 = (p_S^{(1)}, p_S^{(2)}, \dots, p_S^{(K)})$, P_T 为信源和中继的最大发射总功率, P_{LI} 为中继非理想干扰消除后存在的最大干扰功率。

采用反证法及函数的单调性可证明^[5], 当且仅当 $\gamma_R^{(k)} = \gamma_D^{(k)}$ 时, 问题式(8)可进行简化, 且存在最优解。把此条件代入式(4), 则第 k 个子载波上的保密速率改写为

$$\hat{R}_{\text{sec}}^{(k)} = \log_2 \left(\frac{1 + p_R^{(k)} \gamma_{\text{RD}}^{(k)}}{1 + p_R^{(k)} \gamma_{\text{RE}}^{(k)}} \right) \quad (9)$$

由(9)式可知, 当 $\gamma_{\text{RD}}^{(k)} > \gamma_{\text{RE}}^{(k)}$ 时, 保密速率为正数, 此时第 k 个子载波可以用来进行数据传输, 分配到此载波上的功率得到有效利用; 而在 $\gamma_{\text{RD}}^{(k)} \leq \gamma_{\text{RE}}^{(k)}$ 时, 保密速率非正, 此时第 k 个子载波不能用来进行数据传输, 分配的功率为 0。

将各个载波上的速率求和, 可得整个系统的保密速率为

$$\hat{R}_{\text{sec}} = \sum_{k=1}^K \hat{R}_{\text{sec}}^{(k)} \quad (10)$$

进一步, 由于 $\gamma_R^{(k)} = \gamma_D^{(k)}$, 可得信源节点与中继节点发射功率的关系为

$$p_S^{(k)} = \frac{\gamma_{\text{LI}}^{(k)} \gamma_{\text{RD}}^{(k)}}{\gamma_{\text{SR}}^{(k)}} (p_R^{(k)})^2 + \frac{\gamma_{\text{RD}}^{(k)}}{\gamma_{\text{SR}}^{(k)}} p_R^{(k)} \quad (11)$$

将式(10)、式(11)代入式(8), 优化问题变换为

$$\begin{aligned} \max_{p_1} & -\frac{1}{\theta} \ln \left\{ \mathbb{E}_\gamma \left[e^{-\theta B T_f \hat{R}_{\text{sec}}} \right] \right\} \\ \text{s.t.} & \mathbb{E}_\gamma \left[\sum_{k=1}^K \left[A^{(k)} (p_R^{(k)})^2 + B^{(k)} p_R^{(k)} \right] \right] \leq P_T \\ & \mathbb{E}_\gamma \left[\sum_{k=1}^K p_R^{(k)} \gamma_{\text{LI}}^{(k)} \right] \leq P_{\text{LI}} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $A^{(k)} = \gamma_{\text{LI}}^{(k)} \gamma_{\text{RD}}^{(k)} / \gamma_{\text{SR}}^{(k)}$, $B^{(k)} = 1 + \gamma_{\text{RD}}^{(k)} / \gamma_{\text{SR}}^{(k)}$ 。可证明, 问题式(12)中的目标函数为凹函数, 约束条件中的函数为凸函数, 故问题式(12)是凸优化问题, 存在最优解, 但其求解复杂。注意到, 当 $\theta B T_f \rightarrow 0$ 时, 将目标函数采用泰勒公式近似^[13], 同时将求最大值转化为等价的求最小值, 问题式(12)可变换为

$$\begin{aligned} \min_{p_1} & \mathbb{E}_\gamma \left[1 - \theta T_f B \hat{R}_{\text{sec}} \right] \\ \text{s.t.} & \mathbb{E}_\gamma \left[\sum_{k=1}^K \left[A^{(k)} (p_R^{(k)})^2 + B^{(k)} p_R^{(k)} \right] \right] \leq P_T \\ & \mathbb{E}_\gamma \left[\sum_{k=1}^K p_R^{(k)} \gamma_{\text{LI}}^{(k)} \right] \leq P_{\text{LI}} \end{aligned} \quad (13)$$

可证明, 问题式(13)是凸优化问题, 具有强对偶性, 存在唯一的最优解。可利用拉格朗日对偶方法^[14]和 KKT 条件, 求解得到安全系统的最优中继节点功率分配策略。

3.2 最优中继节点功率分配策略

对原问题式(13), 定义矢量 $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2)$, 其中 λ_1 , λ_2 分别为与两个约束条件对应的拉格朗日乘子, 也称对偶变量。问题式(13)的拉格朗日函数表示为

$$\begin{aligned} L(\mathbf{p}_1, \boldsymbol{\lambda}) &= \mathbb{E}_\gamma \left[1 - \theta T_f B \hat{R}_{\text{sec}} \right] \\ &+ \lambda_1 \left\{ \mathbb{E}_\gamma \left[\sum_{k=1}^K \left(A^{(k)} (p_R^{(k)})^2 + B^{(k)} p_R^{(k)} \right) \right] - P_T \right\} \\ &+ \lambda_2 \left\{ \mathbb{E}_\gamma \left[\sum_{k=1}^K p_R^{(k)} \gamma_{\text{LI}}^{(k)} \right] - P_{\text{LI}} \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

对偶函数则为

$$D(\boldsymbol{\lambda}) = \min_{\mathbf{p}_1} L(\mathbf{p}_1, \boldsymbol{\lambda}) \quad (15)$$

相应的对偶问题为

$$\left. \begin{array}{l} \max_{\boldsymbol{\lambda}} \quad g(\boldsymbol{\lambda}) \\ \text{s.t.} \quad \lambda_1 \geq 0, \lambda_2 \geq 0 \end{array} \right\} \quad (16)$$

根据拉格朗日对偶方法, 可知原问题式(13)的最优解 $\bar{\mathbf{p}}_1 = (\bar{p}_R^{(1)}, \bar{p}_R^{(2)}, \dots, \bar{p}_R^{(K)})$ 和对偶问题式(16)的最优解 $\bar{\boldsymbol{\lambda}} = (\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2)$ 满足 KKT 条件, 表示为

$$\bar{\boldsymbol{\lambda}} \succeq \mathbf{0} \quad (17)$$

$$\bar{\lambda}_1 \left[\sum_{k=1}^K \left[A^{(k)} (\bar{p}_R^{(k)})^2 + B^{(k)} \bar{p}_R^{(k)} \right] - P_T \right] = 0 \quad (18)$$

$$\bar{\lambda}_2 \left[\sum_{k=1}^K \bar{p}_R^{(k)} \gamma_{LI}^{(k)} - P_{LI} \right] = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\theta B T_f (\gamma_{RE}^{(k)} - \gamma_{RD}^{(k)})}{\ln 2 (1 + \bar{p}_R^{(k)} \gamma_{RE}^{(k)}) (1 + \bar{p}_R^{(k)} \gamma_{RD}^{(k)})} + 2 \bar{\lambda}_1 A^{(k)} \bar{p}_R^{(k)} + \bar{\lambda}_1 B^{(k)} + \bar{\lambda}_2 \gamma_{LI}^{(k)} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (20)$$

将式(17)-式(19)代入式(20), 整理得关于原问题的最优解 $\bar{p}_R^{(k)}$ 所满足的方程为

$$D^{(k)} (p_R^{(k)})^3 + E^{(k)} (p_R^{(k)})^2 + F^{(k)} p_R^{(k)} + G^{(k)} = 0 \quad (21)$$

其中, $D^{(k)} = 2 \bar{\lambda}_1 A^{(k)} \gamma_{RD}^{(k)} \gamma_{RE}^{(k)}$, $E^{(k)} = 2 \bar{\lambda}_1 A^{(k)} (\gamma_{RD}^{(k)} + \gamma_{RE}^{(k)}) + \gamma_{RD}^{(k)} \gamma_{RE}^{(k)} (\bar{\lambda}_1 B^{(k)} + \bar{\lambda}_2 \gamma_{LI}^{(k)})$, $F^{(k)} = (\bar{\lambda}_1 B^{(k)} + \bar{\lambda}_2 \gamma_{LI}^{(k)}) \cdot (\gamma_{RD}^{(k)} + \gamma_{RE}^{(k)}) + 2 \bar{\lambda}_1 A^{(k)}$, $G^{(k)} = \theta B T_f (\gamma_{RE}^{(k)} - \gamma_{RD}^{(k)}) / \ln 2 + \bar{\lambda}_1 B^{(k)} + \bar{\lambda}_2 \gamma_{LI}^{(k)}$ 。

求解式(21), 可得中继节点在第 k 个载波上的发射功率 $\bar{p}_R^{(k)}$ 为^[16]

$$\bar{p}_R^{(k)} = e^{j \angle x_1} \sqrt[3]{|x_1|} + e^{j \angle x_2} \sqrt[3]{|x_2|} - \frac{E^{(k)}}{3D^{(k)}} \quad (22)$$

其中, $x_1 = -v/2 + \sqrt{\alpha}$, $x_2 = -v/2 - \sqrt{\alpha}$, $\alpha = u^3/27 + v^2/4$, $u = -(E^{(k)}/\sqrt{3D^{(k)}})^2 + F^{(k)}/D^{(k)}$, $v = (E^{(k)}/3D^{(k)})^3 - E^{(k)}F^{(k)}/3(D^{(k)})^2 + G^{(k)}/D^{(k)}$, 符号 $\angle x$ 表示 x 的相位。

根据式(22), 在给定最优对偶变量 $\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2$ 的条件下, 可计算得中继节点的发射功率 $\bar{p}_R^{(k)}$ 。同时, 分析可知, 中继发射功率 $\bar{p}_R^{(k)}$ 与时延指数 θ 相关, 当 θ 增大, 中继发射功率的值增大, 因此可以满足较为严格的统计时延 QoS 要求。在进行数值计算时, 应注意仅保留正实数解。

采用子梯度下降迭代算法, 给定对偶变量的初始值, 进行迭代更新以求得对偶变量的最优解 $\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2$, 并最终得到安全系统的功率分配策略。

3.3 子梯度下降迭代算法

给定安全系统的时延 QoS 指数 θ 、4 条链路的信道响应和噪声方差、数值计算的容许误差。迭代过程如下:

设迭代次数 $n = 0$, 初始化对偶变量 $\lambda_1(n) > 0$, $\lambda_2(n) > 0$ 。

第 1 步 对给定的对偶变量 $\boldsymbol{\lambda}(n) = (\lambda_1(n), \lambda_2(n))$, 根据式(22)计算中继节点发射功率 $\mathbf{p}_1(\boldsymbol{\lambda}(n))$;

第 2 步 设定第 n 次迭代的步长 $\alpha(n)$, 计算对偶变量 $\boldsymbol{\lambda}(n)$ 的子梯度, 并更新 $\boldsymbol{\lambda}(n)$ 。子梯度分别为

$$\Delta \lambda_1(n) = \mathbb{E}_\gamma \left[\sum_{k=1}^K \left(A^{(k)} (p_R^{(k)})^2 + B^{(k)} p_R^{(k)} \right) \right] - P_T \quad (23)$$

$$\Delta \lambda_2(n) = \mathbb{E}_\gamma \left[\sum_{k=1}^K p_R^{(k)} \gamma_{LI}^{(k)} \right] - P_{LI} \quad (24)$$

第 $n+1$ 次时的对偶变量更新为

$$\lambda_1(n+1) = [\lambda_1(n) + \alpha(n) \cdot \Delta \lambda_1(n)]^+ \quad (25)$$

$$\lambda_2(n+1) = [\lambda_2(n) + \alpha(n) \cdot \Delta \lambda_2(n)]^+ \quad (26)$$

第 3 步 判断是否满足容许误差, 如不满足, 则重复第 1、第 2 步; 如满足容许误差, 则停止迭代, 输出对偶变量的最优解 $\bar{\boldsymbol{\lambda}} = (\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2)$, 进而可计算最优的中继节点发射功率和在时延 QoS 指数 θ 下的最大安全有效容量。

4 仿真结果和分析

下面对本文提出的安全系统的功率分配策略进行仿真和分析。在仿真过程中, 设安全通信系统的载波个数 $K = 16$, 系统带宽 $B = 1$ kHz, 帧长 $T_f = 1$ ms。同时, 假设各链路信道响应服从方差为 1 的瑞利分布, 且各加性高斯噪声的平均功率为 1 W。文中的仿真结果是在 5000 次蒙特卡罗仿真后得出。

首先, 将采用本文提出的最优功率分配的全双工中继安全通信系统(简记为安全通信系统 A)与另外两种中继安全通信系统对比, 研究系统安全有效容量随时延指数变化的规律, 如图 2 所示, 其中总功率限制 $P_T = 5$ W, 干扰功率限制 $P_{LI} = 0.5$ W。安全通信系统 B 为采用最优功率分配的半双工中继系统, 系统的中继节点工作在半双工模式, 仅配置一根天线, 前半时隙接收信源数据, 后半时隙向信宿发送数据。此时, 中继节点不存在自环干扰。给定时延指数, 在总功率受限条件下, 以最大化安全有效容量为目的, 构造优化问题, 进行中继节点各载波功率分配。安全通信系统 C 采用图 1 描述的系统模型, 功率分配时, 在不考虑实际信道的情况下, 通过二分法查找法求得满足限制条件的最优功率值, 并将此值作为中继节点子载波上的发射功率,

称为等功率分配的全双工中继系统。由图 2 可以看出, 在 3 种安全中继通信系统中, 给定时延指数 θ , 采用本文提出的最优功率分配策略的全双工中继安全通信系统 A 可以获得最大的安全有效容量, 具有最优的性能。同时, 随着时延参数 θ 的增大, 时延 QoS 要求越来越严格, 系统的安全有效容量逐渐降低, 与前文的理论分析一致。安全中继通信系统 B, 虽采用最优功率分配策略, 但由于中继工作在半双工模式, 系统的安全有效容量低于全双工系统 A。采用等功率分配的安全通信系统 C, 中继虽全双工工作, 但不考虑实际信道情况, 中继在每一个子载波均分配相等的发射功率, 会造成功率浪费, 系统的安全有效容量最低。

进一步, 改变有关参数, 对提出的全双工中继安全系统的功率分配策略进行深入研究, 如图 3 和图 4 所示。图 3 给出的是中继节点的最大干扰功率限制 $P_{Li} = 0.5 \text{ W}$, 总功率限制 P_T 改变时, 安全有效容量随时延指数 θ 变化的曲线。可以看出, 给定干扰功率限制, 当发射总功率增加时, 系统功率资源丰富, 安全有效容量增加。如 $\theta = 1 \times 10^{-3}$, 总功率限制 P_T 分别为 3 W, 5 W 和 8 W 时, 安全有效容量的数值分别为 1.25, 1.58 和 1.84 bit/帧。图 4 给出总功率限制 $P_T = 5 \text{ W}$, 调整环路干扰功率限制

P_{Li} 时, 安全有效容量随时延指数 θ 变化的曲线。可以看出, 当发射总功率不变、干扰功率限制增大时, 降低了对中继节点环路干扰的要求, 更多的子载波可以用来进行数据传输, 更多的功率得到有效利用, 从而增大了系统的安全有效容量。例如, 通过仿真计算, 当 $\theta = 1 \times 10^{-3}$, 干扰功率限制 P_{Li} 分别为 0.3 W, 0.5 W 和 0.8 W 时, 得到有效利用的功率值分别为 2.15 W, 2.26 W 和 2.37 W, 相应的系统安全有效容量数值为 1.43, 1.58 和 1.64 bit/帧。相对于干扰功率限制 0.3 W, 干扰功率限制为 0.8 W 时, 有效功率数值有 0.25 W 的增大, 而安全有效容量有 0.21 bit/帧的提高。

5 结论

本文讨论了全双工中继多载波安全系统中的资源分配问题, 提出了一种保证时延 QoS 要求的功率分配方法, 考虑总功率和全双工中继环路干扰功率限制, 最大化安全有效容量, 进行问题规划。采用泰勒级数近似, 化简凸优化问题, 并求解。通过理论计算和实验仿真, 表明该最优功率分配策略不但满足上层用户服务质量的要求, 并且可自适应地调整发射功率以减少功率浪费, 实现更高的传输有效性及安全可靠性。

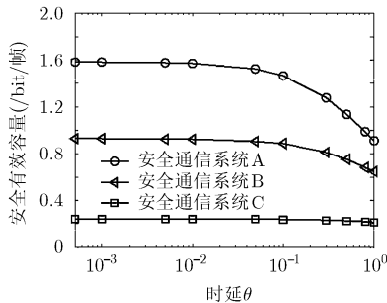


图 2 3 种中继安全通信系统的安全有效容量

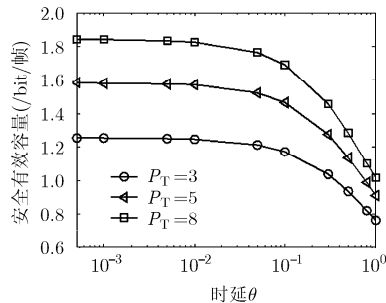


图 3 给定干扰功率限制 $P_{Li} = 0.5 \text{ W}$ 、改变总功率限制时的安全有效容量

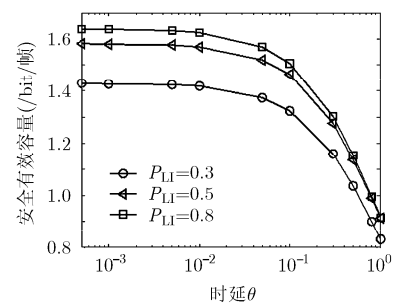


图 4 给定总功率限制 $P_T = 5 \text{ W}$ 、改变环路干扰限制时的安全有效容量

参考文献

- [1] WYNER A. The wire-tap channel[J]. *The Bell Systems Technical Journal*, 1975, 54(8): 1355-1387.
- [2] ZHANG Haijun, XING Hong, CHENG Julian, et al. Secure resource allocation for OFDMA two-way relay wireless sensor networks without and with cooperative jamming[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(5): 1714-1725. doi: 10.1109/TII.2015.2489610.
- [3] RIIHONEN T, WERNER S, and WICHMAN R. Hybrid full-duplex/half-duplex relaying with transmit power adaptation [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(9): 3074-3085. doi: 10.1109/TWC.2011.071411.102266.
- [4] LI Zexu, LI Yong, WANG Jun, et al. Resource allocation for multiuser two-way full-duplex relay networks[C]. 2015 IEEE International Conference on Communications, London, UK, 2015: 3299-3304. doi: 10.1109/ICC.2015.7248833.
- [5] YIN Sixing and QU Zhaowei. Resource allocation in multiuser OFDM systems with wireless information and power transfer[J]. *IEEE Communication Letters*, 2016, 20(3): 594-597. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2516999.
- [6] HUANG Xiaobin, HE Jing, LI Quanzhong, et al. Optimal power allocation for multicarrier secure communication in full-duplex decode-and forward relay networks[J]. *IEEE Communication Letters*, 2014, 18(12): 2169-2172. doi: 10.

- 1109/LCOMM.2014.2367527.
- [7] WU Dapeng and NEGI R. Effective capacity: A wireless link model or support of quality of service[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2003, 2(4): 630–643. doi: 10.1109/TWC.2003.814353.
- [8] TANG Jia and ZHANG Xi. Quality-of-service driven power and rate adaptation over wireless links[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(8): 3058–3068. doi: 10.1109/TWC.2007.051075.
- [9] LEILA Musavian and QIANG Ni. Effective capacity maximization with statistical delay and effective energy efficiency requirements[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(7): 3824–3835. doi: 10.1109/TWC.2015.2412542.
- [10] WANG Yichen, REN Pinyi, DU Qinghe, *et al.* Optimal power allocation for underlay-based cognitive radio networks with primary user's statistical delay QoS provisioning[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(12): 6896–6910. doi: 10.1109/TWC.2015.2462816.
- [11] WANG Tongtong, MA Piming, and MA Yanbo. Adaptive power allocation with quality-of-service guarantees in secure wireless communications[C]. 9th International Conference on Communications and Networking, Maoming, China, 2014: 508–512. doi: 10.1109/CHINACOM.2014.7054348.
- [12] AKIN S. Security in cognitive radio networks[C]. 2014 48th Annual Conference on Information Sciences and Systems, Princeton, NJ, USA, 2014: 1–6. doi: 10.1109/CISS.2014.6814188.
- [13] HAN Xiao, CHEN Huifang, XIE Lei, *et al.* Effective capacity region in a wireless multiuser OFDMA network[C]. Global Communications Conference, Anaheim, California, USA, 2012: 1794–1799. doi: 10.1109/GLOCOM.2012.6503375.
- [14] BOYD S and VANDENBERGHE L. *Convex Optimization* [M]. New York, NY, Cambridge University Press, 2004: 127–272.
- [15] JEONG C and KIM I M. Optimal power allocation for secure multicarrier relay systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(11): 5428–5442. doi: 10.1109/TSP.2011.2162956.
- [16] DUNHAM W. *Cardano and the Solution of the Cubic. Journey Through Genius: The Great Theorems of Mathematics*[M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 1990, Ch. 6, 133–154.
- 马丕明：女，1970年生，副教授，博士，主要研究方向为物理层信息安全和资源分配。
- 梁 绥：女，1991年生，硕士生，研究方向为物理层信息安全和资源分配。
- 马艳波：女，1978年生，副教授，博士，主要研究方向为通信系统跨层资源分配。
- 熊海良：男，1981年生，讲师，主要研究方向为无线通信、导航与定位、通信抗干扰。
- 杨 阳：男，1982年生，讲师，主要研究方向为通信和雷达信号的识别和解调。