



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

RIS 辅助双向物联网通信系统性能分析

董丹丹, 宋康

引用本文

董丹丹, 宋康. RIS 辅助双向物联网通信系统性能分析[J]. 计算机科学, 2022, 49(6): 19-24.

DONG Dan-dan, SONG Kang. Performance Analysis on Reconfigurable Intelligent Surface Aided Two-way Internet of Things Communication System[J]. Computer Science, 2022, 49(6): 19-24.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[超密集物联网中多任务多步计算卸载算法研究](#)

Multi-Task and Multi-Step Computation Offloading in Ultra-dense IoT Networks

计算机科学, 2022, 49(6): 12-18. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.211200147>

[面向集能型中继窄带物联网的非正交多址接入和多维网络资源优化](#)

Non-orthogonal Multiple Access and Multi-dimension Resource Optimization in EH Relay NB-IoT Networks

计算机科学, 2022, 49(5): 279-286. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210400239>

[基于交互注意力图卷积网络的方面情感分类](#)

Interactive Attention Graph Convolutional Networks for Aspect-based Sentiment Classification

计算机科学, 2022, 49(3): 294-300. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210100180>

[适用于物联网环境的无证书广义签密方案](#)

New Certificateless Generalized Signcryption Scheme for Internet of Things Environment

计算机科学, 2022, 49(3): 329-337. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201200256>

[基于注意力机制和 BiLSTM-CRF 的消极情绪意见目标抽取](#)

Negative-emotion Opinion Target Extraction Based on Attention and BiLSTM-CRF

计算机科学, 2022, 49(2): 223-230. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210100046>

RIS 辅助双向物联网通信系统性能分析

董丹丹¹ 宋康^{1,2}

1 青岛大学电子信息学院 山东 青岛 266071

2 西安邮电大学陕西省信息通信网络及安全重点实验室 西安 710121

(2020020613@qdu.edu.cn)

摘要 可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)可以智能地调整无线传播环境来显著提升通信性能,相比传统的中继系统具有成本低、功耗低、易部署等特点,被视为 6G 的潜在关键技术之一。由于 RIS 可以动态地改变无线电波的相位特征,通过合理地调整相移可以实现网络的伸缩性,灵活服务于网络中海量的物联网节点。为了进一步提升 RIS 辅助物联网传输系统的性能,提出了一个由 RIS 辅助物联网通信的双向传输系统,通过引入全双工技术和自干扰消除技术,有效提高了系统容量和传输效率。推导了所提系统的中断概率、平均误码率和平均信道容量的解析表达式,得到了系统性能与系统中 RIS 反射单元的数量等系统参数之间的函数关系。蒙特卡洛仿真验证了推导的准确性和所提方案的性能优势。

关键词: 可重构智能表面;物联网;双向;中断概率;平均误码率;平均信道容量

中图分类号 TN929

Performance Analysis on Reconfigurable Intelligent Surface Aided Two-way Internet of Things Communication System

DONG Dan-dan¹ and SONG Kang^{1,2}

1 College of Electronic & Information Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China

2 Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China

Abstract Reconfigurable intelligent surface(RIS) can intelligently change the wireless propagation environment to significantly improve the performance of wireless communication systems. Compared with traditional relay systems, it has the characteristics of low cost, low power consumption and easy deployment. It is regarded as one of the potential key technologies of 6G. Since RIS can dynamically change the phase characteristics of radio waves, the scalability of the network can be achieved by adjusting the phase shift reasonably, and massive IoT nodes in the network can be flexibly served. In order to further improve the performance of the RIS-assisted IoT transmission system, a two-way RIS-assisted transmission system is proposed. By introducing full-duplex and self-interference cancellation technology, the system capacity and transmission efficiency are effectively improved. The analytical expressions for the outage probability, average bit error rate and average channel capacity of the proposed system are derived, and the relationship between system performance and system parameters such as the number of RIS reflecting elements in the system is obtained. The accuracy of the derivation and the performance advantages of the proposed scheme have been verified by Monte Carlo simulation.

Keywords Reconfigurable intelligent surface, Internet of Things, Two-way, Outage probability, Average bit error rate, Average channel capacity

1 引言

随着 5G 的商用和加速部署,许多学者开始了 6G 的研究工作。物联网(Internet of Things, IoT)在 5G 中已经崭露头角,5G 三大应用场景中的大规模机器类通信和超可靠低时延

通信都属于物联网应用场景^[1]。与 5G 相比,6G 提出了更高的性能指标并引入了新的应用场景,如全球无缝覆盖、更高的频谱效率、智能化水平以及安全性等^[2]。近年来,物联网技术快速发展,为更大数量的物联网设备提供通信服务成为了无线通信领域的一大挑战。未来 6G 网络中广泛分布的海量

到稿日期:2022-01-07 返修日期:2022-03-10

基金项目:国家自然科学基金(61901241);陕西省信息通信网络及安全重点实验室开放课题基金(ICNS201903)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(61901241) and Open Research Funds of Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security(ICNS201903).

通信作者:宋康(sk@qdu.edu.cn)

物联网设备的大规模接入必然会带来功耗急剧增加的问题,因此,实现高速率低功耗数据传输成为未来网络发展的关键^[3]。

RIS 被认为是 6G 的一项关键技术,在 6G 物联网时代具有广阔的应用前景。具体来说,RIS 是由许多反射单元集合而成的电磁人造表面,可以通过软件编程实现对入射信号相位和幅度的调整,以提高接收端的信号质量,而且不需要额外的能量消耗。此外,RIS 还可以通过实时协同调整反射单元的相移,使无线传播环境变得智能可控,有助于实现网络的伸缩性,提升物联网节点的传输效率。目前,已有的关于 RIS 的一些工作大多集中在反射单元的相位优化上,文献[4]通过联合优化入射和反射波束来最大限度地提高用户的总接收信号功率;文献[5]则提出了一种理想的相移配置方法,该方法极大地提高了接收端信噪比。也有一些学者致力于 RIS 辅助无线通信的信道估计,由于处理 RIS 级联衰落信道的数学复杂性,大多数现有的工作则利用中心极限定理来近似估计^[6],但是所得结果只适用于 RIS 具有大量反射单元的情况。为了解决上述问题,文献[7]通过使用 K_G 分布得出了 RIS 辅助无线通信的信道分布的精确近似。文献[8-9]进一步对物理层的安全问题作了详细研究。特别地,由于 RIS 具有灵活部署的特性,可以附着在建筑物外墙、车辆或者无人机等,极大地提高了通信系统的灵活性^[10]。随着人工智能的热度升高,还出现了较多用深度学习设计 RIS 的例子,如文献[11]提出了一种在室内通信环境中进行高效在线调节 RIS 的深度学习方法。

最近,RIS 在双向通信系统中的应用也开始受到关注,这是因为双向传输系统中基站和用户能够同时收发信息,提高了系统容量。文献[12]提出了一种 RIS 辅助多用户双向通信模型,RIS 可以通过适当调整相移,在基站和用户之间创建有效的反射路径,来减轻用户之间的干扰,提高通信质量。文献[13]主要分析了在干扰为一定值的情况下,RIS 辅助双向通信系统的中断概率、误码率等。

由于物联网包含大量低能耗、低成本、存储与计算能力受限、经常休眠的设备,因此需要保证不同种类的设备在无线通信环境下高效互联互通^[1]。目前,部分学者研究了 RIS 在物联网中的一些应用。为了满足高效、低功耗、广泛覆盖的需求,文献[14]将 RIS 与 NOMA 技术相结合并将其应用于 IoT。文献[15]考虑了 RIS 在 6G 物联网中的应用,发现 RIS 可以大幅度降低物联网设备的通信能耗,显著提高网络连接能力。文献[16]则研究了一种在广义衰落信道下应用 RIS 的物联网网络,并对系统性能作了进一步的分析。由此可见,RIS 在物联网网络中发挥着重要作用,是 6G 的一项关键技术。

虽然已经有部分学者研究了 RIS 在物联网方面的应用,但大多集中在资源优化上,且考虑的模型基本上都是单向的。本文提出的双向通信模型中,两端的用户可以同时收发信息,大大提高了信道容量。本文第 2 节提出了 RIS 辅助物联网通信的系统模型,该模型是双向模型,且考虑了可变的干扰;第 3 节推导出了中断概率、平均误码率和平均信道容量的理论表达式;第 4 节对第 3 节推导出的公式进行了蒙特卡洛仿真,并对仿真结果进行了进一步分析,得出了本文的主要结论;最后总结全文并展望未来。

2 RIS 辅助物联网通信系统模型

如图 1 所示,本文考虑了一个 RIS 辅助物联网通信的系统模型。该系统由基站(Base Station,BS)、RIS 和 IoT 设备 3 部分组成。假设 IoT 设备集合 \mathbb{D} 中包含 K 个设备,每个设备 $D_k \in \mathbb{D}(k=1,2,3,\dots,K)$ 都有两根天线,可以同时收发信号。一个具有 N 个反射单元的 RIS 位于 BS 和 IoT 设备之间,用于辅助通信。

在 BS 距离 IoT 较远或者有障碍的情况下,BS 信号覆盖不到 IoT 设备,BS 和 IoT 设备就不能直接通信,直达链路阻塞,此时可以通过中间的 RIS 来扩大 BS 信号的覆盖范围。基于全双工技术,BS 和 IoT 设备可以在一个时隙内进行双向通信。但是,在全双工过程中 BS 和 IoT 设备都会受到自干扰(Self Interference, SI)和环路干扰(Loop Interference, LI)的影响。假设所有信道均服从独立的瑞利衰落。

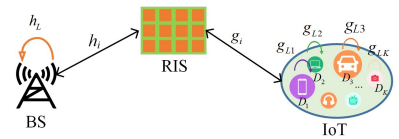


图 1 RIS 辅助物联网通信系统

Fig. 1 RIS-aided IoT communication system

由于 IoT 设备的发射功率低、储能少,需要对其接入进行合理安排才能降低竞争导致的能量消耗,RIS 辅助物联网通信系统中多个 IoT 设备可以采用轮询或随机接入方案。轮询和随机接入方案的具体流程如算法 1 和算法 2 所示。

算法 1 IoT 轮询调度算法

输入: \mathbb{D}, K

输出: transqueue

1. $k=1$
2. transqueue.empty()
3. while TransmissionSlotNotEnd()
4. if $k > K$
5. $k=1$
6. end
7. transqueue.push_back(k)
8. ChannelEstimation(D_k)
9. Transmission(BS, RIS, D_k)
10. TransmissionEvaluation(BS, RIS, D_k)
11. $k=k+1$
12. end

算法 2 IoT 随机调度算法

输入: \mathbb{D}, K

输出: transqueue

1. transqueue.empty()
2. while TransmissionSlotNotEnd()
3. $k=\text{randint}(1, K)$
4. transqueue.push_back(k)
5. ChannelEstimation(D_k)
6. Transmission(BS, RIS, D_k)
7. TransmissionEvaluation(BS, RIS, D_k)
8. end

当统计样本足够大时,这两种传输方案在统计意义上是等价的。为了探索两种方案的统计性能,对模型性能进行分析。RIS辅助物联网通信系统在BS和 D_k 处接收到的信号分别为:

$$y_{D_k} = \sqrt{P_{BS}} \left(\sum_{i=1}^N h_i e^{j\phi_i} g_i \right) x_{BS} + \sqrt{P_{D_k}} \left(\sum_{i=1}^N h_i e^{j\phi_i} h_i \right) x_{D_k} + h_L x_{D_k} + n_1 \quad (1)$$

$$y_{BS} = \sqrt{P_{D_k}} \left(\sum_{i=1}^N h_i e^{j\phi_i} g_i \right) x_{D_k} + \sqrt{P_{BS}} \left(\sum_{i=1}^N h_i e^{j\phi_i} h_i \right) x_{BS} + g_{Lk} x_{BS} + n_2 \quad (2)$$

其中,式(1)和式(2)等号右端依次代表的是期望信号、自干扰、环路干扰和高斯噪声。其中, x_{BS} 和 x_{D_k} 分别是BS和 D_k 的发射信号, P_{BS} 和 P_{D_k} 分别是BS和 D_k 的平均发射功率, n_1 和 n_2 分别是IoT和 D_k 处产生的高斯白噪声,均值为零且方差为 N_0 , $n_1 \sim N(0, N_0)$, $n_2 \sim N(0, N_0)$,这里 $N \sim (\mu, \sigma)$ 代表均值为 μ 、方差为 σ^2 的正态分布。 $\phi_i (i=1, 2, \dots, N)$ 表示由RIS的第 i 个反射单元产生的可调相位,分别用 h_i 和 g_i 来表示BS-RIS链路和RIS- D_k 链路的信道,其中 $h_i = \alpha_i e^{-j\theta_i}$, $g_i = \beta_i e^{-j\varphi_i}$ 。此外, α_i 和 β_i 表示信道 h_i 和 g_i 的幅度,它们是独立分布的瑞利随机变量, θ_i 和 φ_i 是信道 h_i 和 g_i 的相位。为了减小环路干扰,假设物联网设备采用了一些复杂的环路干扰抑制, h_L 和 g_L 是环路干扰(LI)信道的衰落系数,也被建模为瑞利衰落。

本文假设BS和所有IoT设备都可以获得全局信道状态信息,并且能够动态调整入射信号的相位^[17],这样SI便可以被完全消除,但是设备自身产生的LI不能忽视。因此,式(1)、式(2)可以进一步改写为:

$$y'_{D_k} = \sqrt{P_{BS}} \left(\sum_{i=1}^N h_i e^{j\phi_i} g_i \right) x_{BS} + h_L x_{D_k} + n_1 \quad (3)$$

$$y'_{BS} = \sqrt{P_{D_k}} \left(\sum_{i=1}^N h_i e^{j\phi_i} g_i \right) x_{D_k} + g_{Lk} x_{BS} + n_2 \quad (4)$$

为了进一步研究其他性能,需要求得系统的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR),结合式(3)和式(4)可得到BS和 D_k 处的SINR。

$$\gamma_{D_k} = \frac{\left| \sum_{i=1}^N \alpha_i \beta_i e^{j(\phi_i - \theta_i - \varphi_i)} \right|^2 P_{BS}}{|h_L|^2 + N_0} \quad (5)$$

$$\gamma_{BS} = \frac{\left| \sum_{i=1}^N \alpha_i \beta_i e^{j(\phi_i - \theta_i - \varphi_i)} \right|^2 P_{D_k}}{|g_{Lk}|^2 + N_0} \quad (6)$$

如式(1)~式(6)所示,BS和 D_k 具有相似类型的接收信号表达式和SINR。因此,进一步的表达式如两个终端上的中断概率形式也是相似的,故着重研究IoT设备 D_k 处的表达式,BS处的表达式可以很容易地根据 D_k 处写出。

与文献[18-19]类似,假设RIS可以根据全局信道状态信息随时调整信号相位,使各终端的接收信号功率最大化。当 $\phi_i = \theta_i + \varphi_i$ 时,IoT处瞬时SINR取得最大值。假设BS处的发射功率大小为 P ,容易得到 D_k 处的SINR如式(7)所示:

$$\gamma_{D_k} = \frac{P_{BS} \left| \sum_{i=1}^N \alpha_i \beta_i \right|^2}{|h_L|^2 + N_0} = \frac{X}{Y + N_0} \quad (7)$$

其中, $X = P X_1^2$, $X_1 = \left| \sum_{i=1}^N \alpha_i \beta_i \right|$, $Y = |h_L|^2$ 。一般情况下,环路干扰的功率会远大于噪声功率,因此可以将 N_0 近似为0^[7]。参考文献[7]中的式(6)可以得到 X 的分布函数(CDF):

$$F_X(x) \approx \frac{1}{\Gamma(a)\Gamma(b)} G_{2,1}^{1,3} \left[\Xi^2 x \left| \begin{matrix} 1 \\ a, b, 0 \end{matrix} \right. \right] \quad (8)$$

其中, $\Xi = \sqrt{ab/(P\Omega)}$, Ω 是 X_1 的平均功率,文献[4]给出了具体计算方法, $G_{p,q}^{m,n}[\cdot]$ 是Meijer G函数, a 和 b 的值与RIS的反射单元数 N 有关,具体函数关系可参考文献[20]。

环路干扰信道 h_L 和 g_{Lk} 均服从Rayleigh分布,分别含有方差 σ_1^2 和 σ_2^2 , $|h_L|^2$ 和 $|g_{Lk}|^2$ 的概率密度函数(Probability Density Function, PDF)可以较容易地得出。因此, $Y = |h_L|^2$ 的PDF可以表示为:

$$f_Y(y) = \frac{1}{2\sigma_1^2} e^{-\frac{y}{2\sigma_1^2}} \quad (9)$$

结合式(8)和式(9),参考文献[21]中的式7.813,可以推导出 γ_{D_k} 和 γ_{BS} 分布函数。具体推导过程如下:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{D_k}}(\gamma) &= \int_0^{\infty} F_X[\gamma(N_0 + y)] f_Y(y) dy \\ &= \int_0^{\infty} \frac{1}{\Gamma(a)\Gamma(b)} G_{2,1}^{1,3} \left[2\Xi^2(N_0 + y) \left| \begin{matrix} 1 \\ a, b, 0 \end{matrix} \right. \right] \\ &\quad \frac{1}{2\sigma_1^2} e^{-\frac{y}{2\sigma_1^2}} dy \\ &= \frac{1}{\Gamma(a)\Gamma(b)} G_{2,2}^{2,3} \left[2\Xi^2 \gamma \sigma_1^2 \left| \begin{matrix} 0, 1 \\ a, b, 0 \end{matrix} \right. \right] \end{aligned} \quad (10)$$

同理, γ_{BS} 处的CDF可表示为:

$$F_{\gamma_{BS}}(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(a)\Gamma(b)} G_{2,2}^{2,3} \left[2\Xi^2 \gamma \sigma_2^2 \left| \begin{matrix} 0, 1 \\ a, b, 0 \end{matrix} \right. \right] \quad (11)$$

3 性能分析

本节基于第2节的推导和理论基础,推导了所考虑的RIS辅助物联网通信系统的中断概率(Outage Probability, OP)、平均误码率(Bit Error Rate, BER)和平均信道容量的闭合表达式。

3.1 中断概率(OP)

对于双向系统,当 γ_{D_k} 或者 γ_{BS} 低于目标速率 γ_{th} 时,则认为系统处于中断状态。根据文献[22]中的式(13),RIS辅助物联网通信系统的中断概率可以表示为:

$$\begin{aligned} P_{out} &= \Pr\{\min(\gamma_{D_k}, \gamma_{BS}) < \gamma_{th}\} \\ &= 1 - \Pr(\gamma_{D_k} > \gamma_{th}, \gamma_{BS} > \gamma_{th}) \\ &= 1 - (1 - F_{D_k}(\gamma_{th}))(1 - F_{BS}(\gamma_{th})) \\ &= F_{D_k}(\gamma_{th}) + F_{BS}(\gamma_{th}) - F_{D_k}(\gamma_{th})F_{BS}(\gamma_{th}) \end{aligned} \quad (12)$$

将式(10)、式(11)代入式(12)中,可以得到所提系统的中断概率 P_{out} 的闭合表达式。

3.2 平均误码率(BER)

误码率定义为接收信号译码后单位比特错误的概率。对于双向系统来说,总的平均误码率BER等于下行链路误码率 BER_1 和上行链路误码率 BER_2 的平均值。由于本文所提系统考虑了 K 个IoT设备,因此系统总的平均误码率如式(13)所示:

$$BER = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{BER_1 + BER_2}{2} \right) \quad (13)$$

对于基站到IoT单个设备的下行链路来说, BER_1 的计算式如下:

$$BER_1 = E[\beta_1 Q(\sqrt{2\beta_2 SNR})]$$

$$= \int_0^{\infty} \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{e^{-z}}{\sqrt{z}} F_{\gamma_{D_k}}(\gamma) dy \quad (14)$$

其中, β_1 和 β_2 是与调制方式有关的常数, 对于 BPSK 调制来说, $\beta_1 = \beta_2 = 1$ 。

在式(14)的基础上, 根据文献[21]中的式 7.813, BS-RIS- D_k 链路的误码率 BER_1 可以具体表示为:

$$BER_1 = \int_0^{\infty} \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{e^{-z}}{\sqrt{z}} \frac{1}{\Gamma(a)\Gamma(b)} G_{2,3}^{2,2} \left[\frac{2Ez^2 \gamma_1^2}{P} \middle| \begin{matrix} 1 \\ a, b, 0 \end{matrix} \right] dy$$

$$= \frac{1}{2\sqrt{\pi}\Gamma(a)\Gamma(b)} G_{3,3}^{2,3} \left[\frac{2Ez^2 \sigma_1^2}{P} \middle| \begin{matrix} 0.5, 0, 1 \\ a, b, 0 \end{matrix} \right] \quad (15)$$

由对称性可知, BER_2 和 BER_1 的形式完全一致, 只是系统个别参数有差别。因此, 系统的总平均误码率结合式(13)和式(15)较容易得到。

3.3 平均信道容量

在考虑的 RIS 辅助物联网通信系统模型中, 由于 BS 和 IoT 设备可以同时发送和接收信息, 因此在信道容量方面会有显著的提升。首先对单个 IoT 设备的容量进行研究, 然后拓展到多个 IoT 设备。

对于单个 IoT 设备 D_k 而言, 双向传输模式下的信道容量也分为上行链路和下行链路两部分, 具体表达式如下:

$$C = C_{k1} + C_{k2}$$

$$= E[\log_2(1 + \gamma_{D_k})] + E[\log_2(1 + \gamma_{BS})]$$

$$= \frac{1}{\log(2)} \int_0^{\infty} \frac{1 - F_{\gamma_{D_k}}(\gamma)}{1 + \gamma} d\gamma + \frac{1}{\log(2)} \int_0^{\infty} \frac{1 - F_{\gamma_{BS}}(\gamma)}{1 + \gamma} d\gamma \quad (16)$$

其中, C_{k1} 和 C_{k2} 分别表示 BS-RIS- D_k , D_k -RIS-BS 链路的信道容量, E 是期望因子。

根据文献[23], 结合式(10)和式(11)可以推导出 C_{k1} 和 C_{k2} 的具体表达式。

$$C_{k1} = \frac{1}{\log(2)\Gamma(a)\Gamma(b)} G_{3,4}^{4,2} \left[\frac{2Ez^2 \sigma_1^2}{P} \middle| \begin{matrix} 0, 0, 1 \\ 0, 0, a, b \end{matrix} \right] \quad (17)$$

由对称性可知, C_{k2} 和 C_{k1} 的形式完全一致。因此, D_k 与 BS 通信时的信道总容量可以表示为:

$$C_k = C_{k1} + C_{k2}$$

$$= \frac{1}{\log(2)\Gamma(a)\Gamma(b)} \left\{ G_{3,4}^{4,2} \left[\frac{2Ez^2 \sigma_1^2}{P_{BS}} \middle| \begin{matrix} 0, 0, 1 \\ 0, 0, a, b \end{matrix} \right] + G_{3,4}^{4,2} \left[\frac{2Ez^2 \sigma_2^2}{P_{D_k}} \middle| \begin{matrix} 0, 0, 1 \\ 0, 0, a, b \end{matrix} \right] \right\} \quad (18)$$

当 BS 和 D_k 参数完全相同时, 式(18)可以简化为式(19)。

$$C_k' = \frac{2}{\log(2)\Gamma(a)\Gamma(b)} G_{3,4}^{4,2} \left[\frac{2Ez^2 \sigma^2}{P} \middle| \begin{matrix} 0, 0, 1 \\ 0, 0, a, b \end{matrix} \right] \quad (19)$$

当拓展到 K 个 IoT 设备时, 在容量方面会有进一步的提升, 总的平均系统容量可以写成:

$$\bar{C} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (C_{k1} + C_{k2}) \quad (20)$$

假设每个 IoT 设备与 BS 之间的信道都相同, 那么式(20)与式(16)等价。

4 仿真结果与数值分析

本节通过蒙特卡洛仿真验证了第 3 节推导出的所有数学表达式的准确性。系统中其他参数的设置如下: BS 和每个 IoT 设备 D_k 的平均发射功率分别为 $P_{BS} = P, P_{D_k} = 0.1P$, 高斯白噪声 n_1 和 n_2 的功率相同, $N_0 = 0.01$, 中断门限 $\gamma_{th} = 15$ dB。

图 2 给出了在环路干扰方差 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 0.5$ 的条件下, OP 随发射功率 P 变化的关系曲线。从图中可以看出, 分析与理论值拟合较好, RIS 反射单元数 N 对系统中断概率有显著影响。正如所预期的那样, BS 发射功率 P 越大, OP 越低, 而且 OP 随着反射单元的数量 N 的增加而降低。因此, 对于 RIS 辅助物联网通信系统来说, 增加反射单元的数量 N 或者提升 BS 发射功率都可以降低中断概率, 进而提升通信系统的性能。

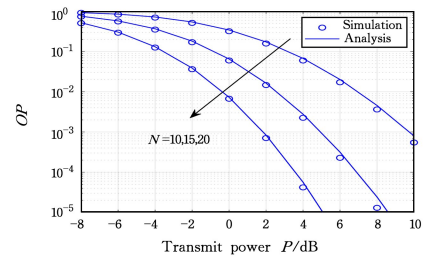


图 2 $N=10, 15, 20$ 时中断概率随发送功率 P 变化的曲线

Fig. 2 Outage probability versus transmit power P when $N=10, 15, 20$

图 3 中, 设置 RIS 反射单元数 $N=10$, 改变环路干扰的方差 σ^2 的大小, 绘制出了 OP 随功率 P 变化的几组曲线。需要注意的是, σ_1^2 和 σ_2^2 的大小不一定相同, 即双向系统上下行链路不一定是对称的。然后, 比较了 σ_1^2 和 σ_2^2 的大小对系统中断概率的影响。从图 3 可以明显看出, 环路干扰方差 σ_1^2 和 σ_2^2 之和越小, 曲线越靠下, 即中断概率相对越低。仿真结果也说明, 一个通信系统若想提高通信质量, 应尽可能降低干扰。

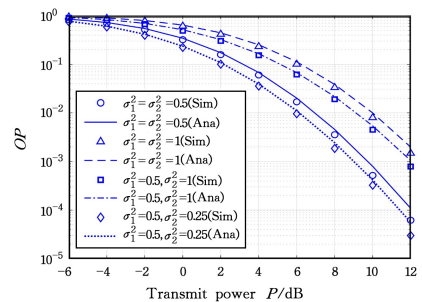


图 3 $N=10$ 时中断概率随发送功率 P, σ^2 变化的曲线

Fig. 3 Outage probability versus transmit power P and σ^2 when $N=10$

图 4 给出了在环路干扰方差 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 0.5$ 的情况下, 不同数量的 RIS 反射单元 N 和发射功率下的系统平均 BER, 这里采用的是 BPSK 调制方案。分别选取 $N=5, N=10$ 和 $N=15$ 这三组值进行蒙特卡洛仿真, 仿真结果表明, 同等条件下增大 RIS 反射单元数量可以显著降低误码率, 提升系统性能。

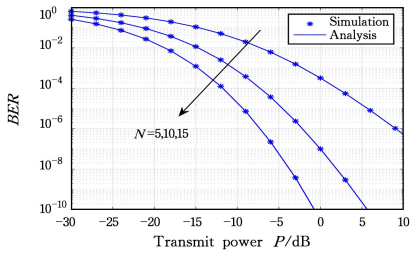
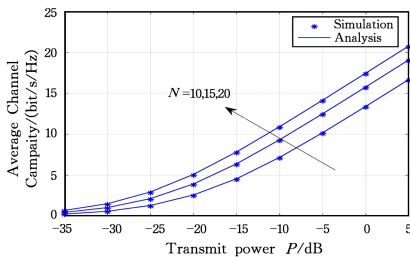
图4 $N=5, 10, 15$ 时误码率随发送功率 P 变化的曲线Fig. 4 BER versus transmit power P when $N=5, 10, 15$

图5给出了平均信道容量与BS发射功率 P 的关系。由图可知,蒙特卡洛模拟与理论分析非常吻合。当 N 取不同的值时,观察平均系统容量随发射功率 P 变化的变化情况。假设两终端IoT和BS具有完全相同的信道参数,且环路干扰方差 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 0.5$ 。显然,平均信道容量随着发射功率 P 的增大而增大。此外还发现,随着RIS反射单元数量 N 的不断增大,平均信道容量也随之扩大。可以得出结论,增加RIS反射单元数 N 对信道容量的提升起着重要作用。

图5 $N=10, 15, 20$ 时平均信道容量随发送功率 P 变化的曲线Fig. 5 Average channel capacity versus transmit power P when $N=10, 15, 20$

本文考虑了自干扰方差对平均信道容量的影响,选取RIS反射单元数 $N=10$,探究 D_k 和BS的自干扰方差对系统平均信道容量的影响,结果如图6所示。仿真实验选取了3组不同的 σ_1^2 和 σ_2^2 值。从图6可以看出, σ_1^2 和 σ_2^2 之和越小,系统平均信道容量越大,且方差越小,曲线拟合相对来说更紧密。因此,可以得出结论:在其他条件相同的情况下,环路干扰值越小,平均信道容量就越大。

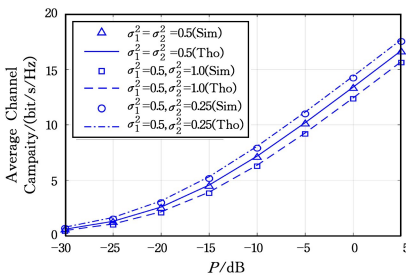
图6 $N=10$ 时平均信道容量随 P 和 σ^2 变化的曲线Fig. 6 Average channel capacity versus P and σ^2 when $N=10$

图7给出了双向模型和单向模型的平均信道容量比较结果,在 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 0.5$ 的条件下,分别取 $N=10$ 和 $N=20$ 两组数据进行仿真实验,并对仿真结果做了对比。需要注意的是,这里的单向模型没有考虑任何干扰。从图7可以看出,在其他参数相同的情况下,双向模型的平均信道容量明显高于

单向模型,且大约是单向模型的2倍,因此双向模型可将系统容量扩大约2倍。当 $N=10$ 时,双向模型的平均信道容量明显高于 $N=20$ 时的单向模型的平均信道容量,因此与增加RIS反射单元 N 相比,采用双向传输模式时容量提高效果更明显。从图7还可以看出, $N=20$ 时双向模型系统容量远远高于其他情况。由此可见,采用双向模型和增加RIS反射单元均能提升系统容量,其中双向效果更好,两者结合能更好地提升系统容量。

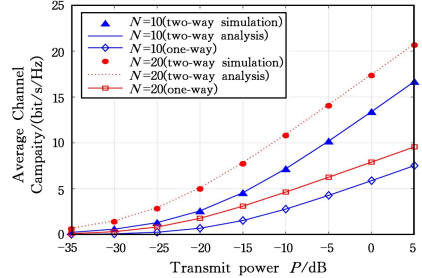


图7 单双向平均信道容量对比曲线

Fig. 7 Comparison between average channel capacity in one-way and two-way RIS system

结束语 在6G的研究中,有望利用RIS来提升无线通信系统的性能并扩大其覆盖范围,为6G赋能智慧物联网的可伸缩性问题提供了一个解决方案。本文研究了RIS在6G物联网中的应用,与单向通信相比,基站和物联网设备之间双向通信较大地提升了频谱效率和系统容量;推导出了瑞利衰落信道作用下系统的中断概率、平均误码率和平均信道容量的解析表达式,并使用蒙特卡洛仿真验证了理论推导的正确性。仿真结果表明,RIS反射单元个数 N 对所提系统的性能有显著影响,且 N 越大,系统性能就越好。此外,环路干扰大小也对系统性能有着一定的影响,因此在实际应用中应尽可能降低干扰。通过数值分析还发现,增加RIS反射单元数可以间接减小干扰对系统性能的影响,当目前的技术不能完全消除双向模式引起的干扰时,使用具有大量反射单元的RIS可以提升系统的性能。

本文主要考虑的是单个基站、多个物联网设备通信的情形。下一步可以拓展到多个基站,考虑多个RIS协同工作等更复杂的场景。

参考文献

- [1] XIE Y Y, SHI J, HUANG S K, et al. Overview of 5G-oriented Named Data Network Internet of Things Research[J]. Chinese Journal of Computer Science, 2020, 47(4): 217-225.
- [2] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts [J]. Science China Information Sciences, 2020, 9(5): 586-590.
- [3] ZHU Z Y, WANG Z X, XU J L, et al. Future Wireless Communications Assisted by Intelligent Reflecting Surface: State of Art and Prospects[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 43(2): 203-217.
- [4] WU Q, ZHANG R. Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network via Joint Active and Passive Beamforming

- [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(11):5394-5409.
- [5] BASAR E, DI RENZO M, ROSNY J D, et al. Wireless Communications through Reconfigurable Intelligent Surfaces[J/OL]. IEEE Access, 2019, 7:116753116773. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8796365>.
- [6] YANG L, YANG J, XIE W, et al. Secrecy Performance Analysis of RIS-Aided Wireless Communication Systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10):12296-12300.
- [7] YANG L, MENG F, WU Q, et al. Accurate Closed-Form Approximations to Channel Distributions of RIS-Aided Wireless Systems[J/OL]. <https://arxiv.org/abs/2007.05221v1>.
- [8] CUI M, ZHANG G, ZHANG R. Secure Wireless Communication via Intelligent Reflecting Surface[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2019, 8(5):1410-1414.
- [9] SHEN H, XU W, GONG S, et al. Secrecy Rate Maximization for Intelligent Reflecting Surface Assisted Multi-Antenna Communications[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(9):1488-1492.
- [10] WANG J, ZHANG W, BAO X, et al. Outage Analysis for Intelligent Reflecting Surface Assisted Vehicular Communication Networks[C]//2020 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2020). 2020:1-6.
- [11] HUANG C, ALEXANDROPOULOS G C, YUEN C, et al. Indoor Signal Focusing with Deep Learning Designed Reconfigurable Intelligent Surfaces[C]//2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2019:1-5.
- [12] PENG Z, ZHANG Z, PAN C, et al. Multiuser Full-Duplex Two-Way Communications via Intelligent Reflecting Surface [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2021, 69:837-851.
- [13] BA C N, HOANG T M, LE T D, et al. On Performance of Two-Way Full-Duplex Communication System With Reconfigurable Intelligent Surface[J]. IEEE Access, 2021, 9:81274-81285.
- [14] CHEN Q, LI M, YANG X, et al. Impact of Residual Hardware Impairment on the IoT Secrecy Performance of RIS-assisted NOMA Networks[J]. IEEE Access, 2021, 9:42583-42592.
- [15] WANG Z R, LIU L, LI H, et al. Intelligent reflecting surface design for 6G Internet of Things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(2):84-95.
- [16] MAKARFI A U, RABIE K M, KAIWARTYA O, et al. Reconfigurable Intelligent Surface Enabled IoT Networks in Generalized Fading Channels[C]//2020 IEEE International Conference on Communications (ICC 2020). IEEE, 2020:1-6.
- [17] JUNG M, SAAD W, DEBBAH M, et al. On the Optimality of Reconfigurable Intelligent Surfaces (RISs): Passive Beamforming, Modulation, and Resource Allocation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(7):4347-4363.
- [18] ATAPATTU S, FAN R, DHARMAWANSA P, et al. Reconfigurable Intelligent Surface assisted Two-Way Communications: Performance Analysis and Optimization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(10):6552-6567.
- [19] BOULOGEORGOS A, ALEXIOU A. Performance Analysis of Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Wireless Systems and Comparison With Relaying [J]. IEEE Access, 2020, 8:94463-94483.
- [20] PEPPAS K P. Accurate closed-form approximations to generalised-K sum distributions and applications in the performance analysis of equal-gain combining receivers[J]. IET Communications, 2011, 5(7):982-989.
- [21] GRADSHTEIN I S, RYZHIK I M, JEFFREY A, et al. Table of Integrals, Series, and Products[M]. England: Elsevier, 2007:853.
- [22] YANG L, QARAQE K, SERPEDIN E, et al. Performance Analysis of Amplify-and-Forward Two-Way Relaying with Co-Channel Interference and Channel Estimation Error[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(6):2221-2231.
- [23] The Wolfram Functions Site. Meijer G-function: Integration (formula 07.34.21.0086) [EB/OL]. (2001-10-29) [2021-11-28]. <http://functions.wolfram.com/07.34.21.0086.01>.



DONG Dan-dan, born in 1998, postgraduate, is a member of China Computer Federation. Her main research interests include wireless communication and reconfigurable intelligent surface.



SONG Kang, born in 1986, Ph.D, associate professor, master supervisor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include cooperative transmission and intelligent signal processing.

(责任编辑:柯颖)