

文章编号: 1674-8085(2020)04-0052-06

干扰攻击量化评估下的 MHWN 多路径优化方法

阚保强

(福建师范大学协和学院信技系, 福建, 福州 350003)

摘 要: 在实际多跳无线网络 (MHWN) 中, 由于无线信道的开放性, 不可避免地面面对恶意干扰的攻击。由于多路径技术固有的空间分集能力, 在抗干扰设计中有着天然的优势。传统的方法多是基于干扰存在二元性进行多路径的设计, 但由于干扰的智能性不断提高, 其无法实现多路径路由的优化传输。为了提高抗干扰效果, 提出了一种基于干扰评估的动态多路径优化方法, 即通过实现量化评估干扰的方法实现业务动态路由优化分配, 仿真模拟结果表明该方法可以有效提高 MHWN 可靠传输性能。

关键词: MHWN (多跳无线网络); 干扰; 量化评估; 多路径

中图分类号: TP392

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2020.04.011

MHWN MULTIPATH OPTIMIZATION BASED ON JAMMING QUANTITATIVE EVALUATION

KAN Bao-qiang

(Department of I&T, Concord College, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350003, China)

Abstract: In real multi-hop wireless networks (MHWN), due to the openness of the wireless channel, it is inevitable to face attacks from malicious jammers. To combat jamming, multipath is widely used for its natural advantage in space diversity. However, traditional methods are mostly based on the existence of jammer. Due to the continuous improvement of the intelligence of jammers, it is impossible to achieve optimal transmission. In order to improve the anti-jamming effect, a dynamic multi-path optimization method based on jamming quantification is proposed, that is, dynamic routing distribution of services by the method of quantitatively evaluating jamming risk. Simulation results show that this method can effectively improve the reliable transmission performance of MHWN.

Key words: MHWN jamming quantitatively-evaluating multi-path

0 引言

无线技术的普及为我们的日常生活带来便利, 但由于无线通信固有的广播性质, 无线通信网络来自恶意干扰的威胁也越来越大, 这也给无线网络设计带来了新的挑战。再加上软件定义无线电 (SDR) 产品的成本越来越低, 智慧型干扰也会越来越普遍, 无线网络也更容易受到网络协议栈物理层上发

起的攻击的影响^[1]。物理层干扰是一种拒绝服务 (DoS) 攻击, 攻击者通过故意在无线链路中引起射频 (RF) 干扰来干扰网络运行, 从而“阻塞”通信信道。而上层 (MAC层、路由层) 也可能受到其他干扰攻击。例如, 路由器可能会受到大量数据包的攻击, 导致缓冲区溢出, 从而导致DoS出现超延迟或数据包丢失的情况。在本文, 干扰范围限制在物理层上的攻击, 即RF干扰。

收稿日期: 2020-05-29; 修改日期: 2020-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61201216); 福建省教师教育科研项目 (JAT191117); 泉州市科技计划项目 (2017T009)

作者简介: 阚保强(1983-), 男, 山东济宁人, 副教授, 博士, 主要从事智能体及无线抗干扰等方面的研究(E-Mail:bqkan@163.com)。

为了抵抗不同类型的 RF 干扰,传统的做法是匹配式干扰对消^[2]。这种方法的缺点是通用性及扩展性差。近年来比较引起关注的是如何利用多路径的固有空间分集性进行干扰对抗,这种方法由于无需考虑实际干扰类型,仅从干扰状态识别结合多路径实现抗干扰,所以有着很广的使用价值。但先前一些研究大多没有考虑实际干扰的动态性问题,往往根据干扰的存在二元性,选择抵抗策略,所以实际抗干扰并没有达到理想的效果^[3]。尽管文献[4]中提出了干扰动态性测度的方法,但是没有对干扰风险进行有效的量化评估。为了更充分地利用网络空间资源,提高多路径组网下的抗干扰能力,本文提出了一种基于干扰风险量化评估的多路径路由技术,其本质是评估智能干扰的风险,自适应的进行路径业务量分配,从而提高网络的传输效能。

本文安排如下:首先介绍相关研究工作,接下来对于干扰量化评估方法给出了详细的描述,然后给出干扰风险最小下的多路径优化分配求解方法进行阐述,最后给出实际仿真结果。

1 相关工作

近年来,随着人们对无线技术作为“最后一公里”连接方案的依赖性越来越强,对于RF干扰的风险意识也越来越高。干扰和抗干扰一直是通信领域的热点问题,相关的RF干扰攻击和抗干扰方法,已有大量文献报道。比如文献[5]分析了IEEE 802.15.4的无线传感器网络的RF干扰问题,提出了一种防御性MAC层协议来降低隐藏终端干扰。在文献[6]中,针对IEEE 802.11网络的两种协议感知的节能干扰机制,提出了低数据速率随机干扰和自适应数据速率散粒噪声干扰,即通过在调整的时间间隔内产生散粒噪声脉冲,实现高能效和低检测概率。文献[7]的作者扩展了文献[6]中的工作,提出了针对GSM和WiMaX网络的攻击。文献[8]引入开源SDR平台作为4G LTE网络中的RF干扰攻击,给出了干扰4G LTE下行链路控制信令方面的实验结果,并引入了一种额外的指标来评估干扰攻击:干扰功率与下行链路共享信道功率之间的比率。文献[9]中对新兴的5G NR网络进行了干扰评估,通过使用有关5G

NR控制信道的信息来评估对RF干扰的脆弱性。文献[10]中,作者首次提出了将干扰与路由业务分配进行联合优化建模,但其仍旧把干扰限定为存在二元性进行分析;文献[11]中的工作考虑了无线传感器网络中的干扰。基于相互正交的拉丁方,设计了一种完全分布式的网络协议,以减轻干扰。当在网络中检测到干扰攻击时,将使用多个通信通道在受干扰区域附近快速重新安排数据传输。在文献[4],我们提出了一种干扰动态测度的抗干扰多路径方法,但是没有对干扰的风险进行量化评估,也没能将多路径问题进行联合优化建模。文献[12]则进一步引入了节点度分布的部署方法来从拓扑上进行抗干扰。综上所述,在抗干扰技术方面如何充分利用空间的固有分集性是一个热点问题。为此本文将在文献[4]的基础上进一步进行干扰风险量化评估,并通过路径的联合优化建模,实现干扰下的无线网络传输最优。

2 模型及问题形成

图1给出了一个典型的干扰下的MHWN多路径路由场景,假定干扰设备(可移动)初始位置靠近于节点3和节点4,源节点不具有任何干扰相关的信息(包括移动性、位置、干扰功率等),源节点对于干扰的认知只能通过丢包率测试来推得。由于干扰的移动性和发起的随机性,传输路径的丢包率也是随机的。假定源节点到目标节点的可用路径数为 n 。

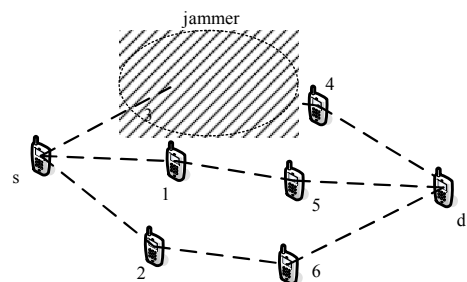


图 1 干扰场景下多路径传输示意图
Fig.1 Wireless transmission using multipath under jamming

图1为具有3条可能路径的网络。其中,路径 p_1 为 $\{(s, 3); (3, 4); (4, d)\}$,路径 p_2 为 $\{(s, 2); (2, 6); (6, d)\}$,路径 p_3 为 $\{(s, 1); (1, 5); (5, d)\}$ 。我们假设链路容量足以容纳所有可能分配给路径的业务量。在不存在干扰的情况下,假设所有 n 条

路径都具有相同的传输性能,则可以在 n 条路径上进行流量的平均分配。当存在干扰的情况下,链路的端到端包成功传输率将沿着路由路径在值0和1之间变化。也就是说,对于固定的干扰功率,如果干扰到节点 x ,连接 $(s; x)$ 和 $(x; b)$ 链路上的局部数据包成功传输率将下降,从而会导致路径 p_1 上的端到端数据包成功传输率降低。而其它远离干扰源的节点,比如路径 p_2 和 p_3 上的端到端数据包成功传输率会优于路径 p_1 。因此,如果将业务流量平均分配给这三个路径,显然不是最佳选择。

在本文中,假设源节点在业务量分配之前,能够周期性的预估 n 条路径上的端到端包传输成功率。具体的实现方法,可以通过中间节点收集有关各个链路的局部数据包成功率,然后反馈到源端进行估算。为了便于估算,假设每条路径上的中间节点处具有独立的本地数据包传输成功率,则每条路径的端到端数据包成功率等于该路径所有链路上本地数据包成功率的乘积。由于假设源节点可估计出端到端的包成功率,因此,在本文的其余部分中不再单独考虑各个节点上的本地包成功率。为方便起见,此后我们将“端到端的包成功率”简记为“端到端”。

考虑到干扰风险和多路径优化分配模型,非常类似于投资组合问题,为此可以将此问题映射为网络中的投资组合选择问题^[13],如表1所示。

投资组合理论是由马克维茨提出的,马克维茨投资组合理论的基本假设为:1) 投资者是风险规避的,追求期望效用最大化;2) 投资者根据收益率的期望值与方差来选择投资组合;3) 所有投资者处于同一单期投资期。马克维茨提出了以期收益及其方差(E, δ^2)确定有效投资组合。

以期收益 E 来衡量证券收益,以收益的方差 δ^2 表示投资风险。资产组合的总收益用各个资产预期收益的加权平均值表示,组合资产的风险用收益的方差或标准差表示,则马克维茨优化模型如下:

$$\min \delta^2(r_p) = \sum \sum w_i w_j \text{cov}(r_i, r_j) \quad (1)$$

$$E(r_p) = \sum w_i r_i$$

式中: r_p ——组合收益;

r_i, r_j ——第 i 种、第 j 种资产的收益;

w_i, w_j ——资产 i 和资产 j 在组合中的权重;

$\delta^2(r_p)$ ——组合收益的方差即组合的总体风险;

$\text{cov}(r_i, r_j)$ ——两种资产之间的协方差。

表1 干扰风险下的多路径业务分配问题映射为投资组合优化问题

Table1 Mapping Traffic Allocation to Portfolio Optimization

投资组合优化问题	干扰风险下的多路径业务分配问题
资产数	路径数
投资组合决策变量	业务分配决策变量
目标投资组合收益	最小可容忍的包成功传输率
投资组合避险基准	干扰风险规避基准
资产 i 的期望收益	路径 i 的期望端到端成功传输率
期望投资组合总收益	网络传输总成功传输率期望
实际投资组合总收益	实际网络传输总成功传输率
资产 i 和 j 的收益协方差	路径 i 和 j 的包成功传输率协方差
资产 i 和 j 的收益协方差近似值	路径 i 和 j 的包成功传输率协方差近似值
投资收益风险	干扰风险

也就是在最小容忍网络包传输率的条件下,通过优化多路径业务分配,最大化的降低RF干扰风险。所以基于投资组合选择理论,可以将上述干扰风险评估下的业务分配问题表述为以下模型:

$$D_r^* = \min_{x_1, \dots, x_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j \text{cov}(\mu_i, \mu_j) \quad (2)$$

$$\text{s.t. } E = \sum_{i=1}^n x_i \mu_i = R_m, \sum_{i=1}^n x_i = 1,$$

其中, R_m 是可容许的最小包传输率, J_r 是干扰风险, $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 是分配到路径 p_i 的业务比重, μ_i 是路径 p_i 的期望传输速率, $\text{cov}(\mu_i, \mu_j)$ 是路径 i 与 j 的包传输率的Markowitz方差,如此就可以把干扰风险下的多路径业务分配问题转化为投资组合优化问题。但考虑到实际投资组合问题中,允许卖空时,决策变量可以为负值。而在干扰风险下的多路径业务分配应用中,源业务速率的负分配是不可行的,所以在决策变量上还需施加非负约束,即 $x_i \geq 0$ 。为了更好的描述干扰风险,这里采用Markowitz半方差 $\text{cov}_{ijB}(x)$, 即基准B下路径 i 与 j 的包传输率的半方差。同时还需考虑到,所有路径的业务总量(或总速率)必须要高于最小容许包传输率 R_m ,引入这些约束后,上述问题模型可改写为:

$$D_r^* = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j \text{cov}_{ijB}(x) \quad (3)$$

$$\text{s.t. } E = \sum_{i=1}^n x_i \mu_i \geq R_m, x_i \geq 0, i = 1, \dots, n,$$

其中, $\text{cov}_{ijB} = E[(R_i - B)(R_j - B) \cdot I_{\{R(x) < B\}}]$, $I_{\{R(x) < B\}}$ 是指示函数。基准B反映了对风险的规避程度。B值越高也就意味着对于干扰的高度规避。

3 问题求解

为了求解以上最优化问题, 这里采用文献[14]介绍的近似方法, 即 $\text{cov}_{ijB} = E[(R_i - B)(R_j - B) \cdot I_{\{R(x) < B\}}] \approx \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [\min(R_{it}, 0) \cdot \min(R_{jt}, 0)] = \text{cov}'_{ijB}$ 。则
将上述公式变换为:

$$D_r^* = \sum_{pB}^{2*} = \min \sum_{x_1, \dots, x_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j \text{cov}'_{ijB} \quad (4)$$

$$\text{s.t. } E = \sum_{i=1}^n x_i \mu_i = R_m, x_i \geq 0, i = 1, \dots, n,$$

也就是利用 cov'_{ijB} 替换 cov_{ijB} , 同时利用等式约束代替式(4)中的不等式约束。两种优化问题都有相同的解决方案, 但是(4)中的问题更容易解决, 因为它涉及较小的可行解空间。具体算法如下:

算法1 干扰量化评估下的路径优化分配算法步骤

Algorithm 1 setups for optimal path allocation

输入: B, R_m, μ_i

输出: x_i

Step 1 指定 B, R_m, μ_i , 形成公式(3)

Step 2 计算 COV'_{ijB} , 并根据 $\text{COV}_{ijB} = \text{COV}'_{ijB}$, 进行求解

Step 3 应用数值优化算法求解公式(4);
返回 x_i

由算法1可知, 算法的计算复杂度主要在于步骤3对公式(4)的求解, 这里是一个典型的组合优化问题, 采用文献[14]启发式算法进行求解, 算法时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

4 仿真分析

为了进行性能比较, 分别选择文献[15]中的FD-AOMDV以及文献[4]中的IAMP协议进行比较, 本文的方案只是在FD-AOMDV基础上引入业务分配优化, 所以整个仿真不改变FD-AOMDV原有协议。本文使用MATLAB和ns2.3混合进行仿真实验,

以进行性能评估和分析, 对于IAMP和FD-AOMDV采用ns2来实现。而本文所提方法, 首先基于FD-AOMDV产生相应的路径, 然后通过MATLAB进行优化求解, 进行业务分配后的结果送入ns2中进行仿真。

仿真环境考虑一个100*100 (m^2) 正方形网络区域, 其中5~70个节点均匀分布。节点采用IEEE 802.11标准进行无线收发。每个节点的通信范围设为30 m, 并且假定双向信道的数据速率为2 Mbps。源节点和目标节点随机选取, 源节点以1.0数据包/秒的数据包速率生成恒定比特率业务量, 每个数据包大小为512字节。设置B的值= 0.2, 也就是较低的风险偏好。

每个仿真方案使用不同的随机生成的种子重复10次, 以获得稳态性能指标。在本文中, 采用的评价指标主要有:

数据包传输率(PDR): PDR的计算为接收到的数据包总数与生成的数据包总数之比。数据包传输率表示成功从源传送到目标的数据包的百分比。

端到端延时: 是从源节点发起包传输到目标节点收到第一个数据包的时间, 表示存在恶意干扰时的数据包传输延迟。

数据包丢弃率(PDL): 数据丢包率表示从源到目标的传送中丢弃的数据包数量所占的比率。

4.1 包成功传输率比较

数据包传送表示成功从源传送到目标的数据包的百分比。引入一个干扰攻击时, 通过改变节点数来考察数据包传输率性能的。图2的实验结果非常清楚地表明, 当网络中的节点数从5增加到70时, 当受到干扰攻击时, 本文提出方案的PDR要高于传统的FD-AOMDV和IAMP。所有结果都证明本文的方案能够更好地应对网络中的干扰攻击所带来的影响。在节点数较少时相应的路径数较少, FD-AOMDV方案由于没有干扰考虑机制所以性能较差, 而本文的方案由于进行了干扰评估下的业务分配优化, 性能更好, 而节点较多时, 相应的路径较多时, FD-AOMDV性能提升, 由于本文所提方案对路径进行了二次优化分配, 所以传输性能得到了一定的提升。

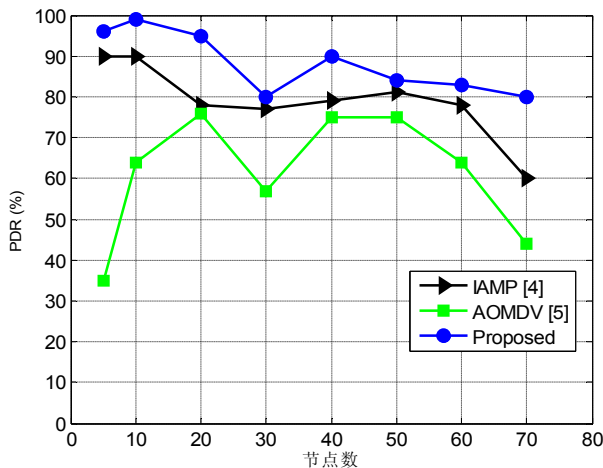


图2 PDR 性能分析

Fig.2 PDR performance analysis

4.2 丢包率比较

数据丢包率表示从源到目标的传送中丢弃的数据包数量所占的比率。图3的实验结果表明,与FD-AOMDV和IAMP相比,当有干扰攻击时,节点数从5增加到70时,本文所提的方案在克服了干扰攻击的挑战,具有更低的丢包率。

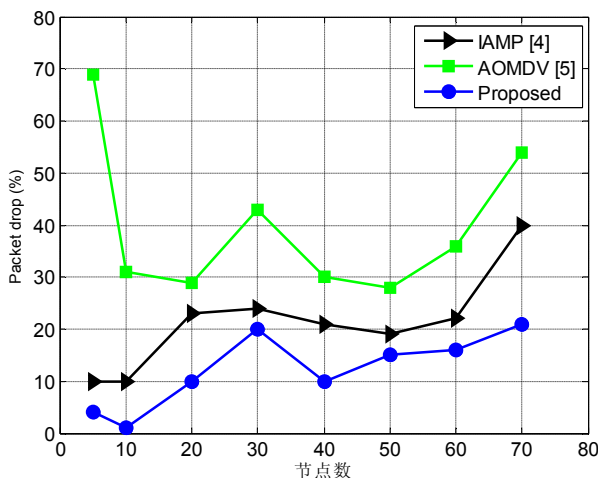


图3 丢包率性能分析

Fig.3 Packet drop ratio performance analysis

4.3 平均端到端延迟比较

它是指所有数据包从源传递到目标所花费的平均时间。平均端到端延迟反映了重传次数的影响。图4给出了在干扰攻击时,与FD-AOMDV和IAMP相比,本文所提出的平均端到端延迟实验比较结果。可以看出,与其它方法相比,本文所提的方法均保持较低的平均端到端延迟并保持稳定。

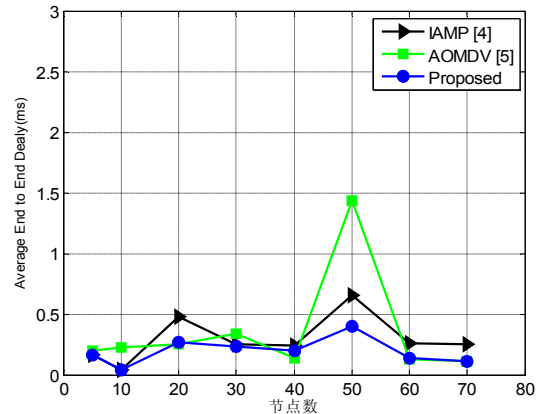


图4 平均延时性能分析

Fig.4 Average delay Analysis

5 结论

本文主要对如何充分利用多径路由的固有空间分集性以实施干扰风险评估下的业务优化分配传输进行了研究。通过将问题表述为一个投资组合选择问题,通过近似求解,提出了一种新的干扰规避下的多路径业务分配方案。仿真结果表明,本文所提出的方案可以有效地提高干扰攻击下的无线多跳网络传输性能。目前本文的仿真实现还是通过MATLAB结合ns2完成,在后续的研究工作中,将结合FD-AOMDV具体的协议,融入本文所提的方案。

参考文献:

- [1] Rahbari H, Krunz M. Secrecy beyond encryption: obfuscating transmission signatures in wireless communications[J]. IEEE Commun. Mag., 2015, 53(12):54-60.
- [2] 王沙飞,鲍雁飞,李岩.认知电子战体系结构与技术[J]. 中国科学:信息科学,2018,48(10):1483-1495.
- [3] Lichtman M, Jover R P, Labib M, et al. Lte/lte-a jamming, spoofing, and sniffing:threat assessment and mitigation[J]. IEEE Commun. Mag., 2016,54(4):54-61.
- [4] 阙保强,范建华,卢紫毅,等.基于干扰动态性建模的MHWN 多路径路由协议[J].中国科学:信息科学,2013, 43(10):1483-1495.
- [5] Wood A D, Stankovic J A, Zhou G. DeeJam: Defeating energy-efficient jamming in IEEE 802.15.4-based wireless networks[C]. Proc. IEEE SECON, 2007:60-69.

- [6] Hussain A, Saqib N A. Protocol aware shot-noise based radio frequency jamming method in 802.11 networks[C]. Proc. IEEE WOCN, 2011: 1-6.
- [7] Hussain A, Saqib N A, Qamar U, et al. Protocol-aware radio frequency jamming in wi-fi and commercial wireless networks[J]. J. Commun. Netw. , 2014, 16(4): 397-406.
- [8] Rao R M, Sean V, Marojevic Reed J H. Lte phy layer vulnerability analysis and testing using open-source sdr tools[C]. Proc. IEEE MILCOM, 2017:744-749.
- [9] Lichtman M, Rao R, Marojevic V, et al. 5g nr jamming, spoofing, and sniffing: threat assessment and mitigation[J]. IEEE Communications Magazine, 2016,54(4):1-6.
- [10] Tague P, Nabar S, Ritcey J A, et al. Jamming-aware traffic allocation for multiple-path routing using portfolio selection[C]. IEEE/ TON, 2011:19(1)184-194.
- [11] Alnifie G, Simon R. A multi-channel defense against jamming attacks in wireless sensor networks[C]. Proc. of Q2SWinet'07. ACM, 2007:95-104.
- [12] 魏祥麟,胡永扬,王晓波,等.基于度分布的多跳无线网络干扰节点部署方法[J].南京理工大学学报:自然科学版,2015,39(5):590-596.
- [13] Markowitz. Harry M.资产组合选择和资本市场的均值-方差分析[M]. 黄涛 译.北京:机械工业出版社.2016-6.
- [14] Estrada, Javier .Mean-Semivariance Optimization: A Heuristic Approach[J]. Journal of Applied Finance, 2007,18(11):278-282.
- [15] Robinson Y H, Julie E G, Saravanan K, et al. FD-AOMDV: fault-tolerant disjoint ad-hoc on-demand multipath distance vector routing algorithm in mobile ad-hoc networks[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(11): 4455-4472.
- [16] Archana K, Laxmi L, Govardhan A. Maximizing efficiency of multipath source routing in presence of jammer[J]. IOSR-JCE, 2013, 11(3): 10-16.