

基于 CSMA/CA 的无线多跳网中干扰特征仿真

谭国平^{1*}, 唐璐瑶¹, 花再军¹, 刘修泉²

(1. 河海大学 计算机与信息学院, 南京 211100; 2. 广州番禺职业技术学院, 广州 511400)

(* 通信作者电子邮箱 gptan@hhu.edu.cn)

摘要:近年来,无线多跳网络快速发展,冲突干扰作为影响无线多跳网络性能的关键因素,越来越受到研究者的重视。针对网络中干扰节点的不同分布情况,采用随机点过程的模拟方式,重点研究了在载波侦听多路访问/冲突避免(CSMA/CA)协议下,节点基于不同随机点过程分布的累积干扰特征;并搭建基于NS2的干扰仿真平台,模拟实际网络干扰分布特征。最后,将两者进行对比,发现基于随机点过程的干扰分布特征与实际网络干扰分布特征存在一定差异,并指出了存在差异的原因。

关键词:冲突干扰;载波侦听多路访问/冲突避免;随机点过程;干扰分布;干扰建模

中图分类号: TP393.0; TP391.97 **文献标志码:** A

Interference characteristic simulation in CSMA/CA-based wireless multi-hop networks

TAN Guoping^{1*}, TANG Luyao¹, HUA Zaijun¹, LIU Xiuquan²

(1. College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing Jiangsu 211100, China;

2. Guangzhou Panyu Polytechnic, Guangzhou Guangdong 511400, China)

Abstract: Conflict interference is one of the key factors affecting the performance of wireless multi-hop network. In view of the different distribution of interference nodes in the network, adopting stochastic point process simulation, the cumulative interference characteristics of nodes were studied based on different stochastic point processes in Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) protocol. Then the interference simulation platform based on NS2 was established to simulate the realistic interference distribution. Finally, the comparison between them shows that there is a certain difference between the simulation and the reality, and the reasons were also pointed out.

Key words: conflict interference; Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA); stochastic point process; interference distribution; interference modeling

0 引言

无线网络中频谱资源复用技术可以提高网络容量,但同时会增加信道的冲突干扰,直接导致网络性能的下降,因此研究信道的冲突干扰特征对提高网络系统性能的影响显得尤为重要。在早期的蜂窝系统中,干扰分布通常被描述成高斯分布^[1]。随着蜂窝网络逐渐向数字通信系统转变,一些更为精确的干扰模型相继被提出,如物理干扰模型、协议干扰模型等。特别是近年来,移动自组网的兴起,大大促进了干扰建模领域的发展。一般来说,一个全面的干扰模型主要由信道模型、干扰节点空间分布模型、网络操作模型以及业务流模型四个部分组成^[2]。信道模型主要刻画了无线传播对于接收信号强度的影响,如确定性路径损耗、小规模衰落等;干扰节点空间分布模型体现了干扰节点在网络范围内的空间分布情况;网络操作模型描述了网络中终端接入信道的方式技术,如随机接入方式(载波侦听多路访问(Carrier Sense Multiple Access, CSMA), Aloha)或者确定性接入方式(时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA), 码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA), 频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA))等;业务流模型则简单表示了发送端的活动。在实际情况下模拟干扰时有一个必须要考

虑的问题,即建立此干扰模型的目的。它决定了在整个干扰建模中,应该重点考虑上述何种子模型。比如,评价一个给定的检测技术的性能,所采用的干扰模型应该重点强调物理层方面的干扰信号和干扰的统计特征,即应重点考虑信道模型和干扰节点空间分布模型。

本文将重点研究子模型之一:节点空间分布模型。由于网络中的累积干扰产生于同时发送的节点,并主要取决于这些节点的空间位置分布,且大量节点在网络中的随机分布导致了移动自组网较高的随机性。因此对节点空间分布模型进行深入研究具有重要意义。另外,本文的相关研究都是在假设节点是静止的条件下进行的^[3]。

实际上,大量的节点空间分布模型都采用了随机几何过程的方式来模拟网络中的节点分布。比如泊松点过程(Poisson Point Process, PPP)^[4],由于其简要和易分析性,受到了广泛的使用。然而在实践中,如在本文重点考虑的载波侦听多路访问/冲突避免(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA)协议下,由于节点要遵循冲突避免机制,不是某一范围内的所有节点都能同时作为发送端,因此泊松点过程已不再适用。为此,研究人员将CSMA/CA协议中的关键参数载波监听范围 r 纳入了泊松点过程中,对其进行改进得出了修正泊松点过程(Poisson Point Process

收稿日期:2013-07-18;修回日期:2013-09-05。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61001068);广州番禺区科技计划项目(2011-Z-01-07)。

作者简介:谭国平(1975-),男,湖南澧县人,副教授,博士,CCF会员,主要研究方向:MANET、无线多媒体通信、随机网络优化与控制、网络信息论;唐璐瑶(1989-),女,重庆潼南人,硕士研究生,主要研究方向:MANET;花再军(1983-),男,江苏姜堰人,助理研究员,硕士,主要研究方向:通信与控制;刘修泉(1973-),男,湖北阳新人,讲师,博士,主要研究方向:智能玩具设计。

modified, PPPmd)^[5]。随着进一步研究,接着提出了 Matern 点过程(Matern Point Process, MPP)^[6],但它仍然存在着空间分布异常和低估干扰点密度的缺陷。继而简单顺序抑制点过程(Simple Sequential Inhibition, SSI)被提出,它能够有效地弥补干扰节点密度被低估的缺陷。本文在介绍上述常用的随机点过程的同时,搭建了 NS2 干扰仿真平台,对实际网络中干扰分布进行了统计分析,并与不同随机点过程模拟情况下所得出的干扰分布之间进行了对比。得出了以下结论:实际网络中,干扰分布与很多实际系数,如节点的连接数、发送速率等紧密相关,基于四种随机点过程的干扰模型都不能准确地刻画实际干扰。最后利用 Matlab 工具将 NS2 得出的实际网络干扰分布与 Generalized extreme value 进行曲线拟合,发现两者极为相似,从而明确了接下来的工作目标,即利用多元统计方式对 NS2 得出的实际网络干扰分布进行分析,从而进行更为准确地干扰建模。

1 随机点过程

1.1 泊松点过程

由于泊松点过程的易分析性和简要性,通常在具有大量节点分布的空间中,都采用泊松点过程来刻画网络中节点的位置分布。

假设网络中节点的个数为一个随机变量 n , 节点的密度为 ρ , 网络面积大小为 S 。那么此时网络中的节点符合一个参数为 ρS 的泊松分布:

$$\Pr(N = n) = \frac{(\rho S)^n}{n!} \exp(-\rho S) \quad (1)$$

一般来说,采用在接收端节点的冲激噪声来模拟累积干扰,其分布在一定条件下满足 α 稳定分布^[7]。下面简单介绍了冲激噪声的相关概念。

首先在一维情况下,假设一个随机脉冲响应函数为 $f(k, t)$ 的无记忆响应滤波器,其中 k 为随机变量,在时隙 $\{t_j\}$ 的滤波器输入一系列来自一维泊松点过程的脉冲,此刻,滤波器的输出(即冲激噪声)表示如下:

$$I(t) = \sum_j f(k_j, t - t_j) \quad (2)$$

其中: $\{k_j\}$ 为一个随机序列,输出 $I(t)$ 为一维泊松点过程与线性滤波器的卷积。

然而,实际中为了模拟干扰,通常利用基于二维泊松点分布的散粒噪声过程。上述一维情况下的滤波器输出被用来模拟各自发送节点到接收节点之间的路径损耗。因此一维条件下,冲激噪声模型的脉冲响应也可以表示为

$$f(k, r) = kr^{-\beta} \quad (3)$$

其中: r 表示发送节点与接收节点之间的距离; β 为路径损耗指数; k 为随机变量,反映了传输信道对干扰节点的其他影响。如果信道传播模型只包含了确定性路径损耗,则 k 为一个常数。如果信道传播模型还包含了其他衰落影响,则 k 应符合相应的分布。因此最后结合二维泊松点过程,接收节点的干扰可表示如下:

$$I_{\varphi_{PPP}}(y) = \sum_{X_i \in \varphi_{PPP}} k_i r_i^{-\beta} \quad (4)$$

其中: φ_{PPP} 表示泊松点过程, X_i 为泊松点过程中的第 i 个节点。在本文的研究中,假设信道模型只包含确定性路径损耗。则

$$I_{\varphi_{PPP}}(y) = \sum_{X_i \in \varphi_{PPP}} P_i r_i^{-\beta} \quad (5)$$

P_i 表示第 i 个节点的发送功率, $\{P_i\}$ 独立同分布于平均数为

$1/u$ 的指数分布。

由此递推,总平均接收功率^[8]如下:

$$E(I_{\varphi_{PPP}}) = E[1/u] \rho \int_{\mathbb{R}^2} l(|y|) dy = \frac{2\pi\rho}{u} \int_0^{\infty} rl(r) dr \quad (6)$$

而只有在 $\beta = 4$ 时才存在干扰的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)的闭合形式(单位为 mW)^[9]:

$$F_{I_{\varphi_{PPP}}}(w) = P(I_{\varphi_{PPP}} \leq w) = \text{erfc}\left(\frac{\rho\pi^2}{4\sqrt{w}}\right) \quad (7)$$

1.2 修正泊松点过程

根据 CSMA/CA 协议,在网络中具有载波监听机制的情况下,同一时刻内并不是所有的节点都能进行发送,节点在发送数据前需要侦听信道的状态。若信道忙,则发送节点会停止发送稍作等待。因此这种情况下,网络中干扰节点的密度与泊松点过程相比将减小。为了弥补泊松点过程的这一不足,研究者提出了修正泊松点过程。

CSMA/CA 协议根据载波检测阈值确定信道的状态。据研究,为了最大化网络吞吐量,载波检测阈值(Q)与载波侦听范围(r)有如下关系^[9]:

$$r = (P_0/Q)^{\frac{1}{\beta}} \quad (8)$$

修正泊松点过程将载波侦听范围 r ^[10] 纳入了泊松点过程中,即在以某发送节点为中心, r 为半径的区域内,其他节点不能在同一时刻作为发送端。这与载波监听的机制具有相似的效果。这一改进具体表现在泊松过程的节点密度上:

$$\rho_{\text{md}} = \frac{1 - \exp(-\rho\pi r^2)}{\pi r^2} \quad (9)$$

那么在 $\beta = 4$ 时,其干扰的累积分布函数(CDF)的闭合形式(单位为 mW)^[8]如下:

$$F_{I_{\varphi_{PPP}}}(w) = \text{erfc}\left(\frac{\rho_{\text{md}}\pi^2}{4\sqrt{w}}\right) \quad (10)$$

1.3 Matern 点过程

现实网络中,节点并不是纯粹随机分布的,研究者认为 Matern 点过程更适合累积干扰建模。Matern 点过程定义如下:

$$x_i \in \varphi_{\text{MPP}}; |x_i - x_j| > r; \forall j \in [1, i-1] \quad (11)$$

即假设在空间中有 x_1 到 x_n 共 n 个节点,先视 x_1 作为干扰节点,再考虑 x_2 。如果 x_1 在以 x_2 为中心,载波侦听范围 r 为半径的区域内,则 x_2 不可以被视作干扰节点。接下来讨论 x_3 , 如果 x_1 或 x_2 存在于以 x_3 为中心, r 为半径的区域内,则 x_3 在此刻同样不能接入信道,作为干扰节点。以此递推,直到考虑完 n 个节点为止。

关于 Matern 点过程的不足,从描述中可以注意到,第 i 次干扰节点的选择依赖于 i 号节点之前所有节点的位置,不管它们是干扰节点或者是未被激活的节点。这说明了未被激活的节点对整个干扰节点的选择过程有很大的影响,这将会直接导致干扰节点密度的低估,并且,基于 Matern 点过程的干扰分布没有闭合形式的累积分布函数。

1.4 简单顺序抑制点过程

为了弥补 Matern 点过程低估了干扰节点的密度,Palasti 提出了更适合于 CSMA/CA 网络下干扰建模的简单顺序抑制点过程^[11]。其过程定义如下:

$$x_i \in \varphi_{\text{SSI}}; |x_i - x_j| > r, \forall j \in \varphi_{\text{SSI}}(1, i-1) \quad (12)$$

即假设在空间中有 x_1 到 x_n 共 n 个节点,先视 x_1 作为干扰节

点,再考虑 x_2 。如果 x_1 在以 x_2 为中心,载波侦听范围 r 为半径的区域内,则 x_2 不可以被视作干扰节点。接下来讨论 x_3 ,如果 x_1 (注意:不再考虑 x_2) 存在于以 x_3 为中心, r 为半径的区域内,则 x_3 在此刻同样不能作为干扰节点。以此递推,直到考虑完 n 个节点为止。

通过上面的表述可以发现,第 i 次干扰节点的选择不再完全依赖于 i 号节点之前的节点状态,而仅仅只考虑 i 号节点之前已作为干扰节点的节点位置。这一改变将有效弥补 Matern 点过程对于干扰节点密度的低估。同样,基于简单顺序抑制点过程的干扰分布也没有闭合形式的累积分布函数。

2 仿真结果和分析

为了验证实际网络下节点的干扰分布特征是否符合节点基于随机点过程分布下的干扰分布特征,本文在 NS2 仿真平台上构建了相应的仿真环境,模拟了实际网络中节点随机统一分布下的干扰情况。表 1 是仿真环境参数设置。

表 1 仿真环境参数设置

参数	值
仿真协议	CBR/UDP/802.11a
节点分布区域	250 m × 250 m 范围中半径为 125 m 大小的圆内
节点分布形式	均匀随机分布
节点密度 ρ	0.0008/0.01
节点发送功率	1 mW
载波侦听范围	20 m
数据包大小	1500 B
数据传送速率	3 Mb/s
仿真时间	15 s
仿真次数	20000

为确保 NS2 仿真结果的可信度,分别在不同节点密度 ρ (单位面积中节点的个数)条件下进行了 20000 次仿真,生成了 20000 个节点分布场景,得出 20000 个干扰大小,然后利用 Matlab 分别仿真得出了节点密度 ρ 为 0.0008 与 0.01 时节点分布基于四种随机点过程下的干扰累积分布函数,其中同样设定了仿真场景范围是半径 R 为 125 m 的圆,载波侦听范围 r 为 20 m,仿真次数为 20000;最后在两者之间进行对比分析,得出相关结论。

2.1 仿真结果对比分析

本文通过 Matlab 绘制出 NS2 仿真中不同节点密度下的干扰累积分布函数,并与基于随机点过程的干扰累积分布函数进行了对比分析。结果如图 1 所示。

图 1(a)、(b)分别是节点密度 ρ 为 0.0008 及 0.01 时,基于随机点过程与基于 NS2 仿真的节点干扰累积分布函数。可以看到,低密度情况下干扰的分布函数很接近,但随着节点密度的增加,它们的分布函数差距越来越大。但无论哪种密度下,基于 PPP 所得出的干扰都是最大的,这是因为泊松点过程中并没有考虑 CSMA/CA 机制,所有的网络节点在同一时刻都可以作为发送节点,对其他节点信号的接收产生干扰;而其余三种随机点过程都考虑了 CSMA/CA 机制,因此成为干扰节点的节点密度会大大减小。对于 MPP 和 SSI,可以发现,基于 SSI 得出的节点干扰始终比基于 MPP 得出的节点干扰大,这说明 SSI 能够有效地弥补 MPP 对干扰节点密度的低估。就实际干扰而言,从图中可以看到 NS2 仿真下的干扰随着节点密度的增加而越来越大,但没有哪一种随机点过程非常贴近实际仿真的干扰分布。这是因为在随机点过程中,载

波侦听范围被假定为一个特定的常量,而实际中影响干扰节点密度的因素很多,例如,载波侦听范围并不是一个特定的值,它依赖于很多网络参数,如网络拓扑、业务流模式、收发器功率等。所以客观地说,基于随机点过程的节点干扰分布只能在一定程度上模拟现实的节点干扰情况,但并不准确。

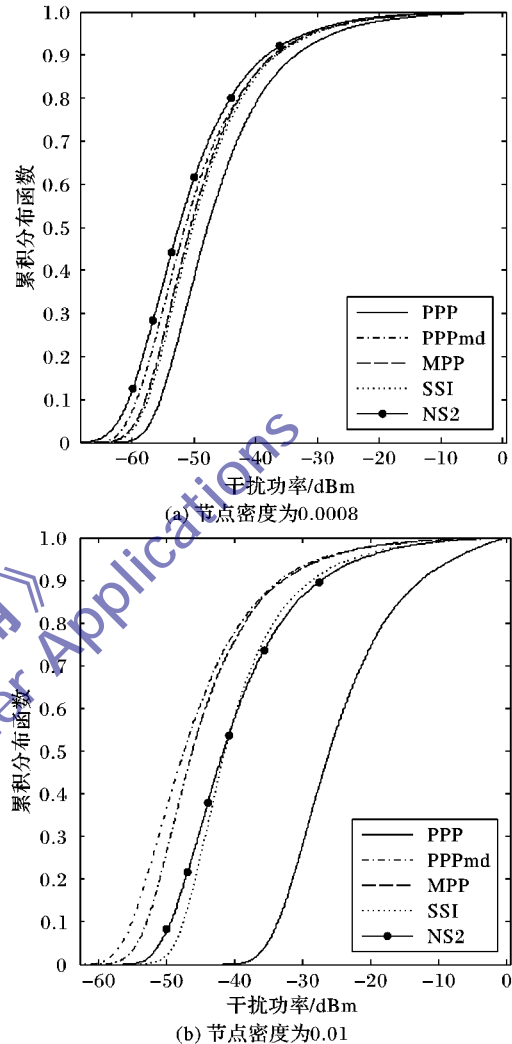


图 1 不同密度下的仿真结果对比

2.2 影响 NS2 仿真结果的部分参数

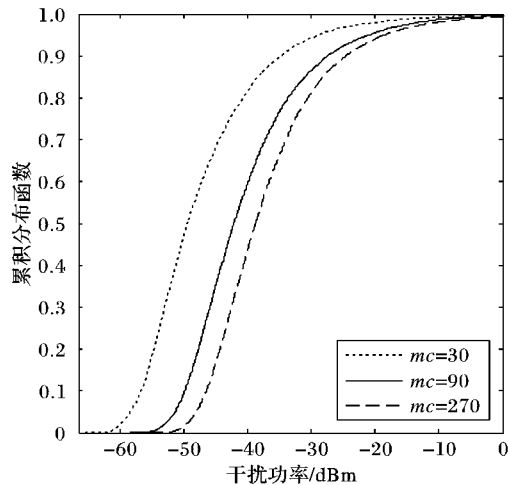
在仿真过程中,本文还发现了实际网络中节点的干扰分布在一定程度上受到了网络链接数和数据发送速率的影响。图 2 是在其他条件一定的情况下,节点密度 ρ 为 0.004 时,节点的干扰分布随着网络链接数 $mc = 30, 90, 270$ 以及数据发送速率 $rate = 1, 3, 6$ (单位: Mb/s) 的变化而变化的情况。

从图 2 中可以看到,网络链接数和数据发送速率在很大程度上影响了节点的干扰分布,随着网络链接数或者数据发送速率的增加,节点的干扰越来越大,然而随机点过程并没能考虑到这些因素。

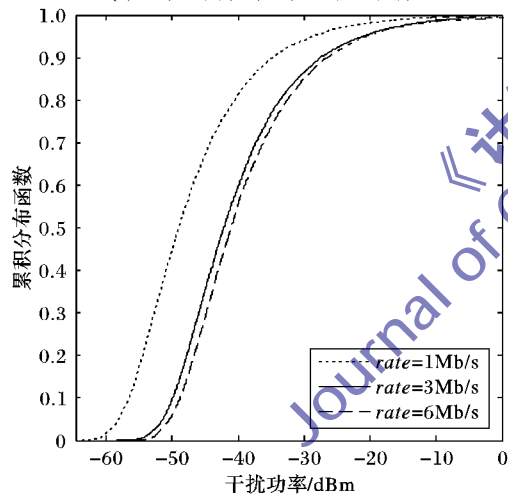
3 结语

经过本文的验证,发现基于随机点过程的干扰分布同实际干扰分布具有一定差距,实际网络中影响干扰分布的因素很多,如载波侦听范围大小、网络链接数、数据发送速率等,都能在一定程度上造成干扰分布的变化。而基于随机几何干扰建模方法并未考虑这些因素或者考虑不全面。最后本文通过 NS2 仿真得出了实际网络情况下节点干扰的累积分布函数和

概率密度函数,发现了通过曲线拟合,Generalized extreme Value 函数十分接近于实际干扰分布。因此设想接下来的工作目标是,是否能够利用多元统计分析,得出基于 Generalized extreme Value 函数的,包含一些重要参数如载波侦听范围、网络链接数、数据发送速率等的具体干扰分布函数,从而建立更为准确的干扰模型。最后,本文也存在着一些不足,比如采用 NS2 网络模拟器仿真的结果并没有采用如无线测试床等手段那样更接近于实际。在条件允许的情况下,可以采用无线测试床对冲突干扰分布进行仿真,得出更接近于实际的干扰分布。



(a) 网络链接数对干扰功率的影响



(b) 数据发送速率对网络链接数的影响

图2 影响干扰分布的部分参数

参考文献:

- [1] GILHOUSEN K S, JACOBS I M, PADOVANI R, *et al.* On the capacity of a cellular CDMA system [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1991, 40(2): 303 - 312.
- [2] HAENGGI M. Outage and throughput bounds for stochastic wireless networks [C]// ISIT 2005: Proceedings of the 2005 International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE, 2005: 2070 - 2074.
- [3] PARK K-J, CHOI J, HOU J C, *et al.* Optimal physical carrier sense in wireless networks [J]. Ad Hoc Networks, 2011, 9(1): 16 - 27.
- [4] BACCELLI F, BLASZCZYSZYN B, MUHLETHALER P. An Aloha protocol for multihop mobile wireless networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 421 - 436.
- [5] CHENG Y-C, ROBERTAZZI T. A new spatial point process for multihop radio network modeling [C] // SUPERCOMM/ICC '90: Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Conference Record. Piscataway: IEEE, 1990: 1241 - 1245.
- [6] BUSSON A, CHELIUS G. Point processes for interference modeling in CSMA/CA Ad-Hoc networks [C] // PE-WASUN '09: Proceedings of the 6th ACM symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks. New York: ACM, 2009: 33 - 40.
- [7] SHAO M, NIKTAS C L. Signal process with fractional lower order moments: stable processes and their applications [J]. Proceedings of the IEEE, 1993, 81(7): 986 - 1010.
- [8] VENKATARAMAN J, HAENGGI M, COLLINS O. Shot noise models for outage and throughput analyses in wireless Ad Hoc networks [C]// MILCOM 2006: Proceedings of the 2006 IEEE Military Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2006: 1 - 7.
- [9] YANG X, VAIDYA N. On physical carrier sensing in wireless Ad Hoc networks [C]// INFOCOM 2005: Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Washington, DC: IEEE Computer and Communications Societies, 2005, 4: 2525 - 2535.
- [10] FU L Q, LIEW S C, HUANG J W. Effective carrier sensing in CSMA networks under cumulative interference [C]// INFOCOM 2010: Proceedings of the 29th Conference on Information Communications. Piscataway: IEEE, 2010: 2588 - 2596.
- [11] PALASTI. On some random space filling problem [J]. Mathematical Institute of Hungarian Academy of Sciences, 1960, 5(1): 353 - 359.
- [12] KURUCZ Z, ADAM P, JANSZKY J. General criterion for oblivious remote state preparation [J]. Physical Review Letters, 2006, 73(6): 062301.
- [13] MIKAMI H, KOBAYASHI T. Remote preparation of qutrit states with biphotons [J]. Physical Review A, 2007, 75(2): 022325.
- [14] PENG X H, ZHU X W, FANG X M, *et al.* Experimental implementation of remote state preparation by nuclear magnetic resonance [J]. Physical Letters A, 2003, 306(5/6): 271 - 276.
- [15] XIA Y, SONG J, SONG S H. Multiparty remote state preparation [J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2007, 40(18): 3719 - 3724.
- [16] NGUYEN B A, KIM J. Collective remote state preparation [J]. International Journal of Quantum Information, 2008, 6(5): 1051 - 1066.
- [17] LUO M X, CHEN X B, MA S Y, *et al.* Remote preparation of an arbitrary two-qubit state with three-party [J]. International Journal of Theoretical Physics, 2010, 49(6): 1262 - 1273.
- [18] CHEN Q Q, XIA Y, SONG J, *et al.* Joint remote state preparation of a W-type state via W-type states [J]. Physics Letters A, 2010, 374(44): 4483 - 4487.
- [19] XIA Y, SONG J, SONG H S, *et al.* Multiparty remote state preparation with linear optical elements [J]. International Journal of Quantum Information, 2008, 6(5): 1127 - 1134.
- [20] HOU K, WANG J, LU Y L, *et al.* Joint remote preparation of a multipartite GHZ-class state [J]. International Journal of Theoretical Physics, 2009, 48(7): 2005 - 2015.
- [21] SU Y, CHEN X B, YANG Y X. N-to-M joint remote state preparation of 2-level states [J]. International Journal of Quantum Information, 2012, 10(1): 1250006.

(上接第 3388 页)

- [10] KURUCZ Z, ADAM P, JANSZKY J. General criterion for oblivious remote state preparation [J]. Physical Review Letters, 2006, 73(6): 062301.
- [11] MIKAMI H, KOBAYASHI T. Remote preparation of qutrit states with biphotons [J]. Physical Review A, 2007, 75(2): 022325.
- [12] PENG X H, ZHU X W, FANG X M, *et al.* Experimental implementation of remote state preparation by nuclear magnetic resonance [J]. Physical Letters A, 2003, 306(5/6): 271 - 276.
- [13] XIA Y, SONG J, SONG S H. Multiparty remote state preparation [J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2007, 40(18): 3719 - 3724.
- [14] NGUYEN B A, KIM J. Collective remote state preparation [J]. International Journal of Quantum Information, 2008, 6(5): 1051 - 1066.

- [15] LUO M X, CHEN X B, MA S Y, *et al.* Remote preparation of an arbitrary two-qubit state with three-party [J]. International Journal of Theoretical Physics, 2010, 49(6): 1262 - 1273.
- [16] CHEN Q Q, XIA Y, SONG J, *et al.* Joint remote state preparation of a W-type state via W-type states [J]. Physics Letters A, 2010, 374(44): 4483 - 4487.
- [17] XIA Y, SONG J, SONG H S, *et al.* Multiparty remote state preparation with linear optical elements [J]. International Journal of Quantum Information, 2008, 6(5): 1127 - 1134.
- [18] HOU K, WANG J, LU Y L, *et al.* Joint remote preparation of a multipartite GHZ-class state [J]. International Journal of Theoretical Physics, 2009, 48(7): 2005 - 2015.
- [19] SU Y, CHEN X B, YANG Y X. N-to-M joint remote state preparation of 2-level states [J]. International Journal of Quantum Information, 2012, 10(1): 1250006.