

文章编号:1001-893X(2012)03-0347-05

基于同道干扰统计模型的无线自组织网络性能分析*

王国威,黎海涛

(北京工业大学 电子信息与控制工程学院,北京 100124)

摘要:基于无线自组织网络中节点的分布特征,结合对同道干扰的定量分析结果,给出了一种适用于无线自组织网络的同道干扰统计模型。分析了无线自组织网络中同道干扰的统计特性,并基于建立的同道干扰模型研究了无线自组织网络的系统性能。结果表明,同道干扰对无线自组织网络的系统性能有严重影响,需建立合理的干扰模型才能更准确地评估自组织网络的系统性能。

关键词:自组织网络;统计模型;同道干扰;性能分析

中图分类号:TN915 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2012.03.019

Performance Analysis of Wireless Ad Hoc Network Based on Co-channel Interference Statistical Model

WANG Guo-wei, LI Hai-tao

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of
Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A statistical model of co-channel interference (CCI) for wireless Ad Hoc network is established based on the distribution of the limited communication nodes. According to the presented CCI model, the statistical characteristics of CCI are analysed, and the performance of wireless Ad Hoc network is evaluated with CCI. Simulation results indicate that the co-channel interference has an important effect on the Ad Hoc network, and it is necessary to explore the reasonable CCI model to evaluate the performance of Ad Hoc network.

Key words: Ad Hoc network; statistical model; co-channel interference; performance analysis

1 引言

无线自组织 (Ad Hoc) 网络最初起源于 20 世纪 70 年代美国军事研究领域,它同时允许多个节点在共享的无线信道上进行数据传输。由于无线自组织网络的组网技术无需固定基础设施的支持,因此无线自组织网络不受网络周围环境和电缆铺设等诸多方面的限制,具有布网灵活方便、成本低、临时、按需、自动等优点。无线自组织网的这些特点决定了该类网络特别适合用于无线局域网(办公室、家庭

等)、军事领域、灾难救援、会议等场合。

由无线自组织网络的组网方式可以知道,无线自组织网提供的是终端与终端之间的对等通信。信号在无线网络中从一个终端传播到另一个终端过程中存在衰减,因此每个终端只能与此终端附近的其他终端进行直接通信,如果发送终端与目的终端之间的传输距离较远,就需要中间终端作为路由器将信息进行转发,直到目的终端受到源终端发送的信息。以上即为无线自组织网络的多跳路由特性,多跳路由在通过节点传送信息的同时,也带来了无线自组织网络中节点与节点之间的同道干扰 (Co-

* 收稿日期:2011-09-30;修回日期:2012-01-10

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(4112012)

Foundation Items: The Beijing Municipal Natural Science Foundation (No.4112012)

channel Interference, CCI)。

对无线自组织网络中同道干扰的定量分析一般都是基于高斯统计模型。文献[1]研究了大型无线网络中的干扰问题,分析了干扰对系统性能的影响;文献[2]研究了同道干扰对无线自组织网络中断率的影响;文献[3]给出了一种基于高斯统计模型的同道干扰统计模型,并且分析了该模型的准确性。分析上述文献可知,应用高斯统计模型定量分析无线网络中的同道干扰时,会使干扰信号出现不同程度的延迟,导致系统的误码率增高。故应用高斯统计模型对无线网络的同道干扰进行统计是不够准确的。

基于此,本文研究了无线自组织网中节点的分布情况,结合文献[4-5]对同道干扰的定量分析,给出了一种适用于无线自组织网络的同道干扰模型,并且分析了同道干扰统计特性;最后基于建立的同道干扰模型准确地评估了无线自组织网的系统性能。

2 同道干扰建模

文献[6]中,Gupta 和 Kumar 建立了由静态节点组成的无线自组织网络模型,并且通过严格的数学推导得出结论: n 个静态节点组成的无线自组织网络,每个节点的吞吐容量为 $O(1/\sqrt{n})$ 。该结论表明网络中节点数目的增加是以容量的减少为代价的,当 n 趋于无穷大,即无线自组织网络规模无限大时,网络容量为零,也就是说构建大规模的无线自组织网络并不现实。因此在建立无线自组织网络的干扰模型时,要充分考虑到网络节点不能为无限大的实际情况。

鉴于无线自组织网络的实际应用特征,本文采用了有限节点的无线自组织网络,并且各个节点是服从泊松分布的,如图 1,其中泊松强度 $\lambda = 0.2$,离散系数 $\delta = 0.3$,节点数目为 100。

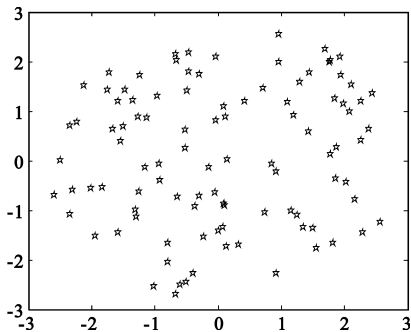


图 1 无线自组织网络节点分布图

Fig.1 The distribution of the nodes in wireless Ad Hoc network

无线自组织网络中的节点与节点之间通信时,

节点间存在同道干扰,该干扰可表示为

$$Y = \sum_{i=1}^K r_i^{-\gamma/2} g_i X_i \tag{1}$$

式中, K 表示在随机节点的个数(文中假设 K 是 100), $i(1 \leq i \leq 100)$ 是随机节点的下标, $r_i = \|R_i - R_m\|$ 为发送节点到接收节点的距离(R_i 表示发送节点, R_m 表示接收节点), γ 表示信号功率的路径损耗指数, g_i 表示每个发射信号所经历的快衰落, X_i 表示随机节点的发射信号。

假设每个节点独立发射信号 X_i 为

$$X_i = B_i e^{j\theta_i} = B_i \cos \phi_i + j B_i \sin \phi_i \tag{2}$$

式中, B_i 为干扰信号的随机包络, ϕ_i 为服从独立同分布的随机相位。由于随机干扰出现的时间点在接收端的接收期间内是均匀分布的,所以在各个接收时刻上干扰信号的随机相位均匀分布在 $[0 \ 2\pi]$ 上。

式(1)中每个发射信号所经历的快衰落 g_i 为

$$g_i = h_i e^{j\theta_i} \tag{3}$$

其中, h_i 是干扰信号的随机衰落幅度, θ_i 是干扰信号的随机衰落相位。由于干扰信号的同相分量和正交分量是非相关衰落,因此随机相位 θ_i 均匀的分布在 $[0 \ 2\pi]$ 上。

结合式(2)、(3),无线自组织网络的同道干扰 Y 可以表示为

$$Y = \sum_{i=1}^K r_i^{-\gamma/2} h_i B_i \cos(\phi_i + \theta_i) + j \sum_{i=1}^K r_i^{-\gamma/2} h_i B_i \sin(\phi_i + \theta_i) \tag{4}$$

式(4)即为无线自组织网络的同道干扰。

3 同道干扰的统计特性分析

本小节将对无线自组织网络中同道干扰的统计特性进行分析。为了便于理解,假设节点通信模型中的发送节点数和接收节点数均为 2,如图 2 所示。

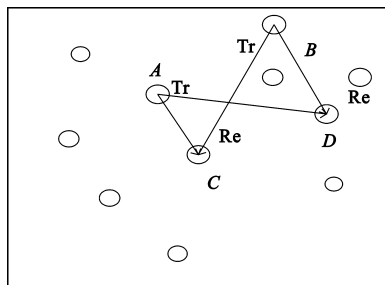


图 2 无线自组织网络的节点通信模型

Fig.2 Communication of the nodes in the wireless Ad Hoc network

图中节点 A 、 B 和 C 、 D 分别表示无线自组织网络的发送节点和接收节点,其中发送节点 A 所发射信号的目的接收端是 C ,发送节点 B 所发射信号的目的接收端是 D 。故此通信模型中的干扰是发送节点 A 发射到接收节点 D 的信号以及发送节点 B 发射到接收节点 C 上的信号。下面将针对干扰信号的统计特性进行分析。

由于无线自组织网络中的节点在所处于干扰空间中的分布服从泊松分布,故干扰空间 $\Gamma(r_l, r_h)$ 内的节点可以表示为

$$\Gamma(r_l, r_h) = \{x \in R^2: r_l \leq \|x\| \leq r_h\} \quad (5)$$

其中, r_l 代表发送信号所能传输的最小传输距离, r_h 代表发送信号所能传输的最大传输距离。

由文献[6]知,可在干扰空间 $\Gamma(r_l, r_h)$ 内得到总干扰 $Y(Y = Y_I + jY_Q)$ 的同相分量(Y_I)和正交分量(Y_Q)的联合特征函数。其同相和正交分量的联合特征函数的表达式为

$$\begin{aligned} \Phi_Y(\bar{w}) &= \lambda\pi(r_h^2 - r_l^2) \times \\ &(\mathbb{E}\{e^{j|\bar{w}| \sum_{i=1}^K r_i^{-\lambda/2} h_i B_i \cos(\phi_i + \theta_i + \bar{w}_\phi)}\} - 1) = \\ &\mathbb{E}\{e^{j|\bar{w}| \sum_{i=1}^K r_i^{-\lambda/2} h_i B_i (\omega_i \cos(\phi_i + \theta_i) + \omega_Q \sin(\phi_i + \theta_i))}\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\bar{Y}$ 是同相分量(Y_I)和正交分量(Y_Q)的集合 $\{Y_I, Y_Q\}$, $\bar{w} = [w_I, w_Q]^T$, $|\bar{w}| = \sqrt{w_I^2 + w_Q^2}$ 。

由于在计算干扰信号的联合特征函数时假设了无线自组织网络中的节点在干扰空间内是服从独立同分布的,根据文献[7]可得联合特征函数(6)的等价表示为

$$\begin{aligned} \Phi_Y(\bar{w}) &= \sum_{k=0}^{\infty} [\mathbb{E}\{e^{j|\bar{w}| \sum_{i=1}^K r_i^{-\lambda/2} h_i B_i \cos(\phi_i + \theta_i + \bar{w}_\phi)}\}]^T \times \\ &\frac{\lambda\pi(r_h^2 - r_l^2)^k e^{-\lambda\pi(r_h^2 - r_l^2)}}{k!} = \\ &e^{\lambda\pi(r_h^2 - r_l^2)} (\mathbb{E}\{e^{j|\bar{w}| \sum_{i=1}^K r_i^{-\lambda/2} h_i B_i \cos(\phi_i + \theta_i + \bar{w}_\phi)}\} - 1) \end{aligned} \quad (7)$$

对特征函数 $\Phi_Y(\bar{w})$ 取对数得到:

$$\begin{aligned} \varphi_Y(\bar{w}) &\triangleq \lg \Phi_Y(\bar{w}) = \lambda\pi(r_h^2 - r_l^2) \times \\ &(\mathbb{E}\{e^{j|\bar{w}| \sum_{i=1}^K r_i^{-\lambda/2} h_i B_i \cos(\phi_i + \theta_i + \bar{w}_\phi)}\} - 1) \end{aligned} \quad (8)$$

利用文献[8]为进一步化简得到:

$$e^{j a \cos(\phi)} = \sum_{k=0}^{\infty} j^k \epsilon_k J_k(a) \cos(k\phi) \quad (9)$$

式中, $\epsilon_0 = 1$, 当 $k > 1$ 时 $\epsilon_k = 2$, $J_k(\cdot)$ 代表 k 阶贝塞尔函数。

将式(9)代入式(8)中可得:

$$\begin{aligned} \varphi_Y(\bar{w}) &= \lambda\pi(r_h^2 - r_l^2) \times \\ &(\mathbb{E}\{\sum_{k=0}^{\infty} j^k \epsilon_k J_k(|\bar{w}| r^{-\gamma/2} h B)\} \times \\ &\cos(k(\phi + \theta + \bar{w}_\phi)) - 1) \end{aligned} \quad (10)$$

表达式中的参数 ϕ, θ 均匀地分布在 $[0, 2\pi]$ 上。

由于当 $k > 1$ 时, $\cos(k(\phi + \theta + \bar{w}_\phi))$ 的期望 $\mathbb{E}_{\phi, \theta}\{\cos(k(\phi + \theta + \bar{w}_\phi))\} = 0$, 因此表达式(10)可简化为

$$\begin{aligned} \varphi_Y(\bar{w}) &= \lambda\pi(r_h^2 - r_l^2) \times \\ &(\mathbb{E}_{r, h, B}\{J_0(|\bar{w}| r^{-\gamma/2} h B)\} - 1) \end{aligned} \quad (11)$$

此即为简化的对数特征函数表达式。由文献[7]可知当 $|\bar{w}| \rightarrow 0$ 时, 对数特征函数中期望为

$$\begin{aligned} \mathbb{E}_{r, h, B}\{J_0(|\bar{w}| r^{-\gamma/2} h B)\} &= \\ e^{(-|\bar{w}|^2 \mathbb{E}_{r, h, B}\{r^{-\gamma} h^2 B^2\})/4} \times (1 + \Lambda(|\bar{w}|)) \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $\Lambda(|\bar{w}|)$ 是修正因子, 当 $|\bar{w}| \rightarrow 0$ 时, 修正因子 $\Lambda(|\bar{w}|) = O(|\bar{w}|^4)$ 。利用上述等式, 可以得到当 $|\bar{w}|$ 无限接近于零时 $\Lambda(|\bar{w}|) \ll 1$, 因此当 $|\bar{w}| \rightarrow 0$ 时的干扰信号的对数特征函数的近似表达式可表示为

$$\varphi_Y(\bar{w}) \approx \lambda\pi(r_h^2 - r_l^2) (e^{\frac{-|\bar{w}|^2 \mathbb{E}_{r, h, B}\{r^{-\gamma} h^2 B^2\}}{4}} - 1) \quad (13)$$

根据文献[8]可知, 等式(13)是 Middleton Class A 分布的对数特征函数式, 故可采用 Middleton Class A 统计模型统计无线自组织网络中的同道干扰。

4 仿真分析

下面针对一个节点数为 100 的无线自组织网络, 基于本文给出的同道干扰统计模型, 利用 Monte - Carlo 静态仿真法给出无线自组织网络的误码率性能。

本文将分别对单天线无线自组织网络和多天线无线自组织网络(收发天线是 2)的系统性能进行仿真评估。在仿真过程中系统的发射端均采用 QPSK 调制, 接收端将分别采用迫零(ZF)检测算法和最大似然(ML)检测算法。

在仿真中系统的参数设置如下: 无线自组织网络的节点数 $n = 100$, 同道干扰统计模型中的参数 $r_l = 0.01$, $r_h = 100$, $B = 1\ 600$, $\gamma = 3.5$, $\lambda = 0.2$, $\delta = 0.3$ 。

图 3 和图 4 给出了系统收发节点的天线为 1, 即单输入单输出系统(SISO)时无线自组织网络的误码率性能; 根据系统存在同道干扰和不存在同道干扰这两种情况, 对无线自组织网络的误码率性能做了评估; 其中图 3 的接收端的检测算法采用迫零检测(ZF), 图 4 中接

收端的检测算法采用最大似然检测(ML)。

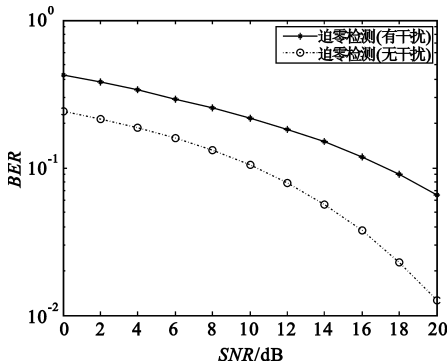


图 3 收发天线为 1,迫零检测算法的 BER 性能
Fig.3 The performance of BER under Zero – Forcing detection algorithm when T/R antenna is 1

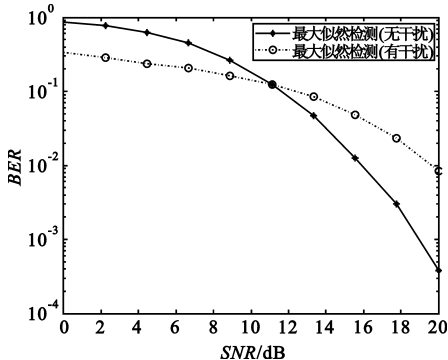


图 4 收发天线为 1,最大似然估计检测算法的 BER 性能
Fig.4 The performance of BER under Maximum Likelihood detection algorithm when T/R antenna is 1

图 5 和 6 为收发节点为收发天线为 2,即 MIMO 系统的无线自组织网络误码率性能。仿真图对比了当系统中有、无同道干扰时无线自组织网络的误码率性能,其中在图 5 中采用迫零(ZF)检测,图 6 中采用最大似然(ML)检测算法。

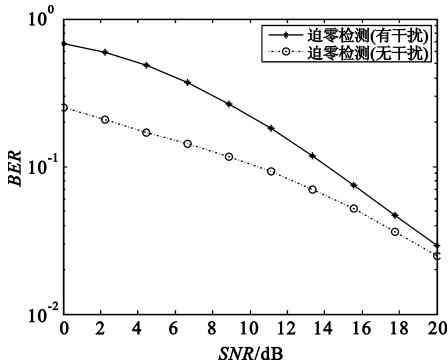


图 5 收发天线为 2,采用迫零检测算法的 BER 性能
Fig.3 The performance of BER under Zero – Forcing detection algorithm when T/R antennas are 2

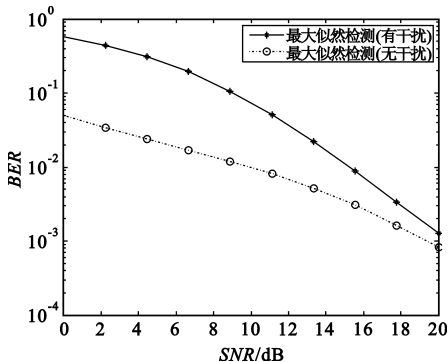


图 6 收发天线为 2,最大似然估计检测算法的 BER 性能
Fig.6 The performance of BER under Maximum likelihood detection algorithm when T/R antennas are 2

分析上述图的误码率可知,当无线自组织网络考虑同道干扰的存在时系统的性能会有较严重的下降,如图 3 和图 4 在信噪比为 20 dB 处,当系统存在同道干扰时无线自组织网络的系统误码率性能比无干扰时下降了近一个数量级。图 5 和 6 是对多天线无线自组织网络误码率的仿真,由于接收端采用了联合检测技术降低了系统的误码率,但是仍然明显看出当系统存在同道干扰时无线自组织网络的误码率性能有严重的下降。

由上述分析可知,同道干扰对无线自组织网络的性能有严重的影响,故在评估无线自组织网络的系统误码率性能时必须考虑到同道干扰才能更加客观地反映无线自组织网络的系统性能。基于本文建立的干扰统计模型可以准确评估无线自组织网络的系统性能。

5 结束语

本文研究了基于同道干扰的无线自组织网络的性能,给出了一个适用于无线自组织网络的同道干扰统计模型,并分析了同道干扰的统计特性;然后基于本文建立的同道干扰统计模型仿真了无线自组织网络的误码率;通过对系统误码率的分析评估了无线自组织网络的系统性能;仿真结果表明,同道干扰严重的影响了无线自组织网络的系统性能,在评估无线自组织网络的系统性能时需要建立合理的同道干扰模型才能更加准确地描述无线自组织网络的性能。

参考文献:

[1] Haenggi M,Ganti R K.Interference in large wireless networks [J].Foundations and Trends in Networking, 2008,3(2):127 – 248.

- [2] Ganti R K, Haenggi M. Interference and outage in clustered wireless ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(9): 4067 – 4086.
- [3] Yang X, Petropulu A P. Co – channel interference modeling and analysis in a Poisson field of interferers in wireless communications[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(1): 64 – 76.
- [4] Gulati K, Chopra A, Evans B L, et al. Statistical modeling of co – channel interference [C]//Proceedings of 2010 IEEE Global Communications Conference. Honolulu, HI: IEEE, 2010: 367 – 376.
- [5] Salbaroli E, Zanella A. Interference analysis in a Poisson field of nodes of finite area[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 1776 – 1783.
- [6] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388 – 404.
- [7] Win M Z, Pinto P C, Shepp L A. A mathematical theory of network interference and its applications[J]. Proceedings of

the IEEE, 2009, 97(2): 205 – 230.

- [8] Middleton D. Non – Gaussian noise models in signal process for telecommunication: New method and results for Class A and Class B noise models[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1999, 45(4): 1129 – 1149.

作者简介:

王国威(1987—),男,山东潍坊人,北京工业大学信息与通信工程专业硕士研究生,主要研究方向为无线通信;

WANG Guo – wei was born in Weifang, Shandong Province, in 1987. He is now a graduate student. His research direction is wireless communication.

Email: wgw@emails.bjut.edu.cn

黎海涛(1972—),男,四川广安人,博士,副教授、硕士生导师,主要研究方向为无线通信、信号处理等。

LI Hai – tao was born in Guang'an, Sichuan Province, in 1972. He is now a professor with the Ph.D. degree and also the instructor of graduate students. His research interests include wireless communication and signal processing.