

基于多方向天线阵列的链路质量评估技术^①

焦 蓉, 苑海涛, 刘经纬

(华北计算技术研究所, 北京 100083)

摘 要: 提出了一种应用在基于多方向天线阵列的无线 Mesh 网络上的链路质量评估技术, 该技术包括初始链路质量评估和持续链路质量评估. 初始链路质量评估技术可以使新节点在入网阶段根据多天线阵列物理层探测到 RSSI 值、计算 RSSI 均值、建立 RSSI 矩阵, 根据 RSSI 矩阵元素各值分布情况选定信道质量好的链路进行建链. 持续链路质量评估技术则持续监测 RSSI 值的变化趋势或持续根据所选信道上统计的数据分组差错率估计并调整下一阶段发送数据时应选择的调制速率. 实验结果表明, 通过上述两种链路质量评估技术在基于多方向天线阵列的无线 Mesh 网络上的综合运用, 网络节点能够实时感知各条链路上的质量变化并调整到最佳调制速率, 保证了网络所持续提供的带宽能力, 多天线阵列的空时分优势得以实际发挥.

关键词: 信号强度指示; 分组差错率; 调制速率

Link Quality Evaluation Technology Based on the Direction of Antenna Array

JIAO Rong, YUAN Hai-Tao, LIU Jing-Wei

(North China Institute of Computing Technology, Beijing, 100083)

Abstract: This paper puts forward a link quality evaluation technology based on the direction of antenna array. Link quality evaluation technology includes the initial link quality evaluation and continuous link quality evaluation. In the stage of a new node joining the net, initial link quality evaluation detects the RSSI value of the physical based on wireless Mesh network antenna array, and calculates the average RSSI, builds RSSI matrix. Then adopts a good quality channel according to the RSSI matrix values to build the link. Continuous link quality evaluation can monitor the change trend of RSSI continually, evaluates and adjusts the link modulation rate according to the packet error rate of the selected channel. The experiment results indicates that the initial link quality evaluation and continuous link quality evaluation can apperceive the change of all link quality, and adjust to the suitable modulation rate. Link quality evaluation technology can raise the utilization ratio of the bandwidth of the wireless network within a certain scope.

Key words: signal strength indicator; packet error rate; modulation rate

复杂的无线环境对无线信道质量影响较大, 如何实时地对无线链路质量进行分析、进而估算并调整发送数据分组的速率是无线网络中的关键技术, 此技术能够在一定范围内提高带宽利用率, 同时也是实现链路优选、无线网络自适应等技术的研究基础.

本文研究的基于多方向天线阵列的链路质量评估技术包含初始链路质量评估技术与持续链路质量评估技术. 其中:

1) 初始链路质量评估技术可以使节点在组网初始阶段根据物理层接收的信号强度指示(RSSI)对相邻网络节点之间的链路质量作出初步评估^[1].

2) 持续链路质量评估技术可以使节点在入网后继续根据 RSSI 变化的趋势^[2]或根据所发送数据分组的差错率^[3]评估相邻网络节点之间的链路质量.

两类链路质量评估技术通过应用于网络节点具有多方向天线阵列结构^[4]的树状无线 Mesh 网络中, 使

^① 收稿时间:2013-08-26;收到修改稿时间:2013-09-22

该网络能够在入网初始和入网后持续进行链路质量评估^[5]并根据评估选择最佳的链路速率^[6],从而达到最佳的网络吞吐量。

1 初始链路质量评估

节点物理层的 RSSI 值在一定程度上反映了物理信道的质量^[7]。当两节点之间距离较近、节点发射功率较大、节点周围电磁干扰小等原因使得节点接收数据时的 RSSI 值较大;反之,节点接收数据时的 RSSI 值可能会很低,较差时仅能检测到信号但无法进行解析,最差情况下将完全检测不到信号^[8]。

无线 Mesh 网络中新节点在入网前首先从各方向天线上收集网络内其它已入网节点发出的 Beacon 包,根据 Beacon 包携带的信息统计其 RSSI 值,并按照这些值的高低进行排序,然后依次进行后续的链路测试过程。因此,Beacon 包的 RSSI 值的统计过程是判断链路质量的第一步。节点入网后也同样收集从各条链路的发过来的数据及其 RSSI 值,不过这些 RSSI 值包括了所有的数据,统计出的这些 RSSI 值将用于网络管理。RSSI 统计过程如图 1 所示。

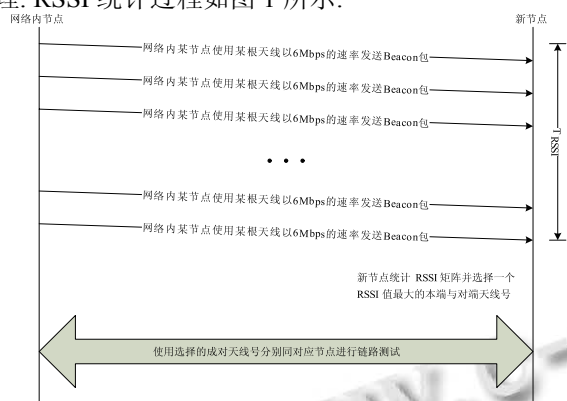


图 1 RSSI 统计过程

为便于掌握网络中各条链路的质量、速率、天线等信息,需要对每条链路的本端 RSSI 值与对端 RSSI 值进行统计。

假定无线 Mesh 网络节点使用了八方向天线阵,天线号是 0~7,每条链路包含了本端天线号和对端天线号,节点需要对每条本端天线号统计 RSSI,因此在 RSSI 数据的统计过程中,每个节点需要为周围所有邻居节点建立一个 8×8 的 RSSI 矩阵。

下图表示了节点在某个时间点上统计的 RSSI 矩阵,其中,矩阵的每个元素是一个二元组,分别表示

采用本端某个天线号接收到的从对端某个天线号处发来的数据分组的平均 RSSI 和数据分组个数。

平均 RSSI 计算公式中对所有历史 RSSI 数据进行加权平均。目的节点计算 RSSI 矩阵中相应位置的平均 RSSI 时,按下图流程完成。

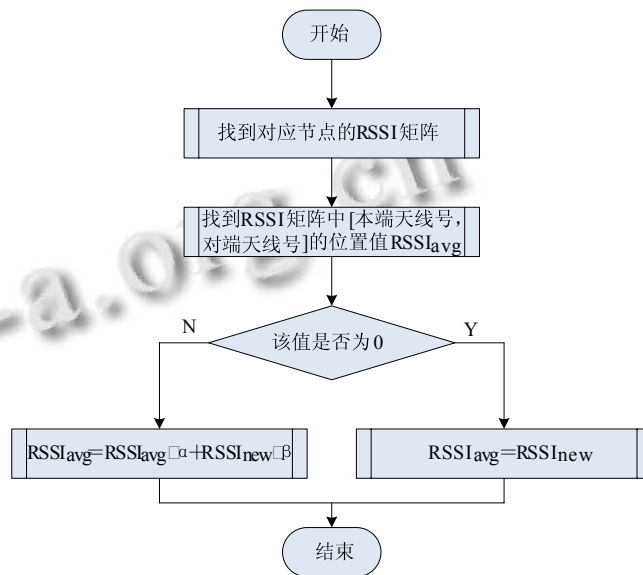


图 2 计算平均 RSSI

上图公式中, $\alpha + \beta = 1$ 且两者均不为 0, 可设 $\alpha = \beta = 0.5$ 。上述公式表明统计的平均 RSSI 值从最初开始统计的时刻算起到当前时刻,既参考了过去一段时间内的 RSSI,又参考到了最新的一个 RSSI。

一个新节点在入网前将分别使用八根天线进行监听,然后为检测到的周围所有已入网节点建立一个 RSSI 矩阵。

图 3 表示了一个新节点在入网前统计网络内节点发出的 Beacon 包所携带的 RSSI 值的过程。

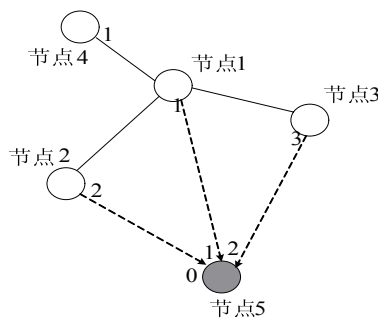


图 3 新节点在入网前统计 RSSI 示例

图中,节点 5 加入时,网络内已具有 4 个节点,节

点 5 能够监听到从节点 1、节点 2、节点 3 三个节点的一些天线上发出的 Beacon 包, 由于新节点距网络内节点节点 4 距离较远, 节点 5 检测不到节点 4 发出的信号。

图中标识出了节点 1、节点 2、节点 3 三个节点发出 Beacon 包时使用的主要天线号, 因为这三个节点从其它天线上发出的 Beacon 包也可能被新节点收到, 图中也标识出了节点 5 接收这些 Beacon 包时使用的天线号。节点 5 在 RSSI 统计时间 TRSSI 内统计的 RSSI 矩阵内容如下, 矩阵中已标识出 RSSI 值最强的元素位置。

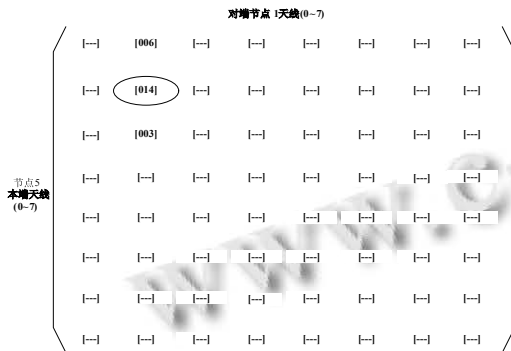


图 4 节点 5 统计的来自节点 1 的 RSSI 矩阵

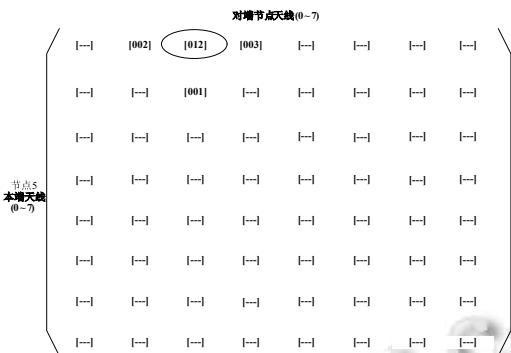


图 5 节点 5 统计的来自节点 2 的 RSSI 矩阵

当 TRSSI 超时后, 新节点依次选择每个矩阵中 RSSI 值最大的元素所代表的本端天线号与对端天线号进行链路测试, 并从测试结果中选择一条链路进行通信。

每个节点需要利用一些特殊协议包将本端所测得的平均 RSSI 值捎带给对端节点。入网前使用入网响应包来传递平均 RSSI; 在链路测试过程中使用链路测试包来传递该信息; 在入网后的链路维护过程中采用了周期性的链路维护包来传递该信息。

由于无线网卡的工艺不同, 天线的发射功率不同, 所以 RSSI 与发射调制速率的对应关系应该根据不同

硬件条件去测试。每个调制速率应该在实验室无干扰、无多径、无反射环境中通过发送多个数据包测试可得到 RSSI 的均值对应, 从而建立一个 RSSI 值与发送调制速率的对应表, 然后根据 RSSI 均值为要进行测试的链路选定一个初始发送调制速率。

2 持续链路质量评估

确定初始发送调制速率之后, 需要对链路质量进行持续评估, 可以通过 RSSI 的变化趋势, 根据链路调制速率调整门限策略决定发送调制速率^[9]; 也可以采用数据分组的差错率能够比较精确地确定出下次发送数据时应选择的最佳调制速率, 一段时间数据分组差错率较低说明接收的信号强度较高、干扰较低、信道质量较好, 当前节点可以提高发送数据的调制速率, 反之, 应降低发送数据的调制速率^[10]。节点入网后主要使用该方法进行父子节点间链路的调制速率调整。

两种持续链路质量评估的区别是, RSSI 统计方法需要某链路上有传输的数据包, 通过数据包中携带的 RSSI 才能持续评估链路质量, 如果传输的数据包数量不大, 就无法实时感知到链路质量, 此方法适合有大量传输数据的链路情况。分组差错率统计方法需要主动发送数据包, 并根据差错率的情况评估链路质量, 如果链路上有大量数据包在传输, 则可利用传输数据进行统计, 在传输少量数据包的情况下需要生成链路评估包来进行评估。

2.1 RSSI 统计策略

RSSI 值与调制速率的对应关系非常重要, 在外场实验环境中, 外界干扰较少, RSSI 值基本可以反映出当时的无线链路的质量, 也可以反映出采用何种调制速率能够保证尽可能大的数据吞吐量。在新节点入网前, 可以根据所接收到的数据分组的 RSSI 值来估算对端节点所采用的调制速率。

在无线网络中, 对于降低和提高发送调制速率的操作有可能形成循环震荡, 即在向上调整速率后, 发现发送出错率高于调整门限, 因而又立即降低发送速率, 而降低发送速率后, 又会发现可以立即提高一个等级的发送速率, 从而形成循环。为解决该问题, 需要改进 RSSI 均值计算方法, 同时设计一种链路速率调整门限的确认机制, 从而减少这种循环调整速率情况的出现。

1) 基于时间窗口的 RSSI 均值计算

无线 Mesh 网络通过预测长期的信号质量的变化,

以便对速率调整门限进行调整. 长期的信号质量变化的观测有赖于对于 RSSI 均值的计算.

$$RSSI_{avg} = \left[RSSI_{avg} * f(dT) + (RSSI_{cur}) \right] / (1 + f(dT))$$

如公式所示, 均值是通过上一次计算的均值与一个系数 $f(dT)$ 进行加权后与当前确认的 RSSI 值取和后除以 $1+f(dT)$ 得到的. $f(dT)$ 是一个线性递减的函数, 取值从 1 变为 0, 当 dT 超过时间窗口后, $f(dT)$ 取值为 0. 公式中等号左边的 RSSI 均值是加上本次的 RSSI 值后得到的均值, 等号右侧的 RSSI 均值是上一次计算得到的均值.

2) 链路速率调整门限的确定

为预测链路速率调整门限, 必须首先预测路径损耗, 将那些瞬时的路径变化排除出去, 从而得到一个当前信道的稳定损耗预测. 目前通过过滤每一个链路测试分组的 RSSI 变化, 对信道损耗进行预测. 当发现某一个链路测试分组的 RSSI 变化超过了设定的范围 (± 5 变化) 则将该分组的 RSSI 进行标注, 只有连续多个链路测试分组都有这样的变化, 则确认信道属于长期变化, 如果后续分组没有确认该变化方向, 则认为该变化数据瞬时变化, 不影响路径的预测, 可以被忽略. 路径损耗预测过程如下图所示.

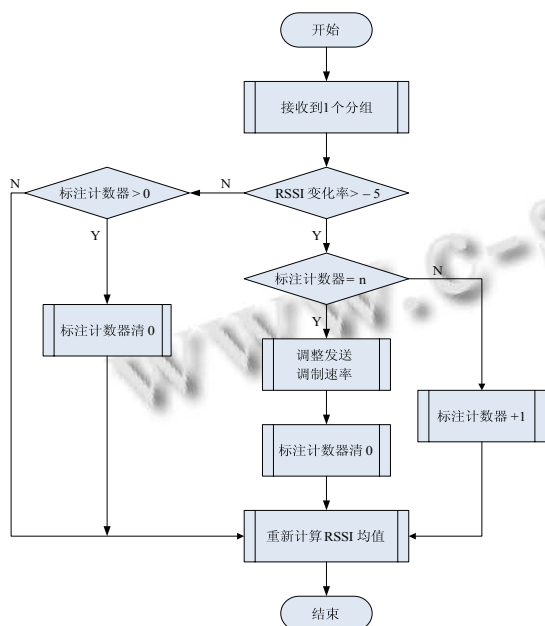


图 6 链路速率调整门限

在调整链路速率以前, 还需要确认门限是否有效, 即确认该链路质量下能够支持的最高链路速率, 应当

大于本次链路调整的速率, 从而避免调整链路速率产生的震荡.

2.2 数据分组差错率统计策略

在无线 Mesh 网络中, 节点维护同父节点以及周围所有子节点的每条链路, 而每条链路分别对应着一个高优先级发送队列和一个低优先级发送队列. 节点将对每条链路统计数据分组差错率, 进而动态调整每条链路的发送调制速率.

(一) 差错率统计过程

如何判断数据分组是否发送成功是进行数据分组差错率统计时首先要考虑的问题. 本文采用确认机制保证发送节点在当前时隙结束前知道刚刚发出的数据是否被接收节点成功接收. 需要确认的数据在普通数据时隙的发送情况如图 7 所示.

无线 Mesh 网络在链路建立后, 会采用被称为自动重传请求(ARQ)用于重传出错的数据分组, 即一个分组发送失败后, 重新多次尝试发送, 直到发送次数超过预先设定的上限. 当链路处于建立过程中, 网络节点会发送多个测试数据分组, 此时, 无线 Mesh 协议会禁用 ARQ 技术, 从而保证精确的链路测试结果, 不受到分组重传机制的影响. 具体过程如下, 新建链路连续测试所有的数据发送速率, 每一个数据速率下, 连续测试多个数据分组, 并统计差错率. 每一个数据分组在成功接收后, 会由接收方发送一个确认分组, 发送方通过统计确认分组, 确认分组是否被成功接收. 根据统计的差错率, 新建链路会选用最大的超过 95% 成功率的数据传输速率作为链路的优化速率. 当两端完成这种统计后, 已入网节点一侧会将统计的结果发送给待入网节点, 以帮助其选择适当的节点进行入网认证.

1. 统计过程示例

下图表示了两个节点根据各自统计的发送数据分组的差错率调整调制速率的过程. 其中, 源节点通过接收目的节点回复的确认来判断刚才发送的数据是否发送成功.

为简单表示出节点统计数据分组差错率的过程, 下图假设整个过程的上半部分只有源节点向目的节点发送大量数据分组, 在整个过程的下半部分只有目的节点向源节点发送大量数据分组. 由于无线环境比较复杂, 不能保证双向链路的质量一致性, 也不能确定双向链路的调制速率一致性, 因此需要每个节点独立统计分组差错率. 在实际过程中, 源节点与目的节点

会交替向对方发送数据分组。

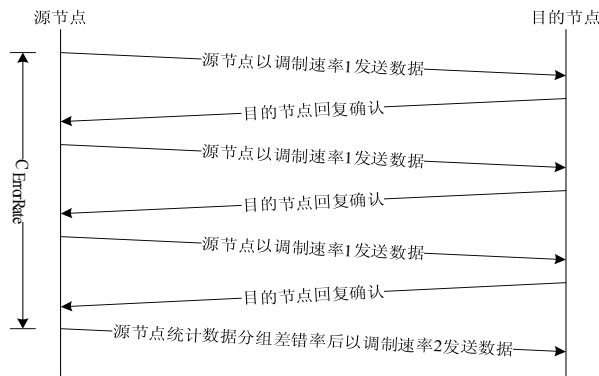


图 7 统计过程

上图中的各个阶段说明如下:

1) 源节点以级别为 1 的初始调制速率向目的节点发送数据分组, 目的节点收到该数据分组后向源节点回复确认, 源节点根据是否收到确认决定刚才的数据分组是否被对端节点正确收到, 从而统计发送数据分组失败率。

2) 当发送完指定个数的数据后, 源节点根据发送数据分组的差错率将调制速率调整为级别 2。

3) 与上面两个步骤类似, 目的节点也以级别为 1 的初始调制速率向源节点发送数据分组, 源节点收到该数据分组后向目的节点回复确认, 目的节点根据是否收到确认决定刚才的数据分组是否被对端节点正确收到, 从而统计发送数据分组差错率。当发送完指定个数的数据后, 目的节点根据发送数据分组的差错率仍将调制速率的级别设为 1。

(二) 计算数据分组差错率

数据分组差错率统计时应选择发送多少个数据分组, 需要在实际环境中进行实测确定, 因为当发送过多的数据分组时会导致统计过程时间过长, 调制速率不能根据出错情况及时调整, 而当发送过少的数据分组时会导致统计过程时间太短, 调制速率变动太快。通过实验室和外场的多次测试表明, 数据分组差错率统计时发送数据的总个数在 500~1000 范围内为宜。

具体计算过程说明如下:

1) 节点从父节点或某个子节点的发送队列中取出数据发送出去。

2) 累加该发送队列的发送数据总个数。

3) 等待对端返回的确认数据, 如果收到了确认数据, 则认为该数据成功发送, 累加该发送队列的成功发送数据总个数。

4) 判断发送数据总个数是否达到最大值 CErrorRate, 如果达到了最大值, 则计算出该发送队列在上一阶段的发送数据差错率, 并将发送数据总个数、成功发送数据总个数清零, 然后根据该差错率调整发送数据的调制速率。

(三) 数据分组差错率与调制速率的对应关系

数据分组差错率的阈值设置得太大会导致低调制速率向高调制速率调整得过快, 反之, 数据分组差错率的阈值设置得太小时又会导致低调制速率向高调制速率调整得过慢, 因此选择合适的阈值对选择合适的调制速率是个关键点, 应选择一个能够使调制速率向上调整的阈值和一个能够使调制速率向下调整的阈值, 使得数据分组差错率在两个阈值之间时调制速率保持恒定。

当前节点周期性地对周围每个父子节点进行数据分组差错率的统计, 因此可以持续地对相应的调制速率进行优化调整。目前确定数据分组差错率的统计个数 CErrorRate 的值为 600 个。

由于底层采用了确认机制, 节点会监视包含 CErrorRate 个数据分组的重传情况, 当统计结束后将采用下面两种处理动作:

1) 如果差错率超过了 52 个包(8.68%), 节点将降低一个级别的调制速率。

2) 如果差错率小于 11(1.74%), 节点将提高一个级别的调制速率。

相应流程如下:

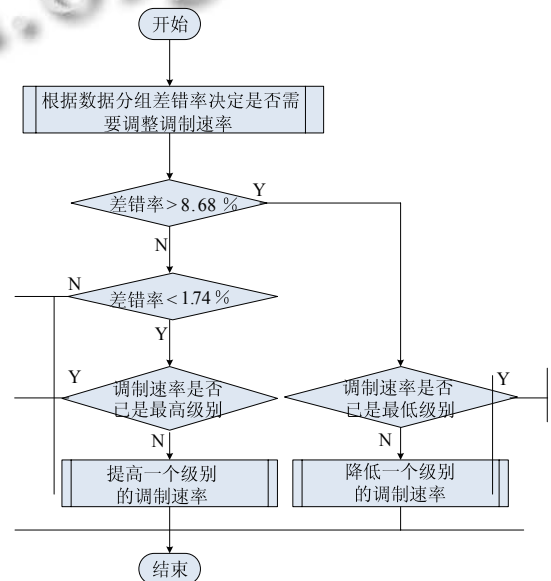


图 8 调整调制速率的流程

3 实验结果

1) 实验环境

逻辑连接图如图 9 所示。



图 9 逻辑连接图

通过两个节点进行 RSSI 统计与数据分组差错率的统计。其中父子节点的数据板上装有同步平台模块、无线网卡(含无线网卡驱动)和 5G 天线(7dBm), 由于硬件条件的限制, 只能采用全向天线进行原理验证。两个节点通过 12~24V 电源供电。

开发环境采用 Windows XP 系统下的基于 VxWorks 的 Workbench, 通过串口与串口终端执行对数据板的操作, 通过网口下载编译后的算法。

2) 实验结果

在父节点处统计的某个 RSSI 矩阵如图 10 所示。

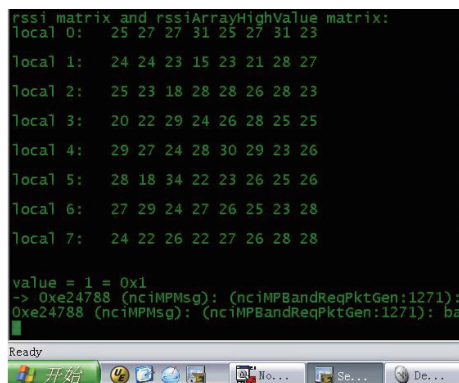


图 10 父节点处统计的某个 RSSI 矩阵

上面各图中, 左边矩阵表示了当前节点所统计的 RSSI 值, 其中纵坐标表示本端天线号, 横坐标表示对端天线号, 这些 RSSI 值是一个加权的均值。本次的 RSSI 矩阵的值在本端 0~7 号天线上都有值, 因为本次实验为室内实验并且节点使用了全向天线。对于一个全向天线, 如果能够在各个天线上监听足够长的时间, 那么各个天线上都会有 RSSI 值, 并且这些值应该都是比较接近的。根据最大 RSSI 值的大小选定初始化调制速率为 36Mbps。

父节点处统计的数据分组差错率遵照上文的统计规则: 即统计近期发送的 600 个数据包, 如果发送失败次数超过 52(8.68%), 则降低一个级别的调制速率; 如果发送失败次数少于 11(1.74%), 则提高一个级别的调制速率。由于实验室环境较好, 很快父子节点间的双向链路调制速率均从 36Mbps 上升到了最高 54Mbps。

4 结语

无线 Mesh 网络在初始建立阶段采用了初始链路质量评估技术, 可以保证无线网络设备在组网过程中, 保持最优的链路速率, 从而保障了无线 Mesh 网络在建立之初即具有较高的吞吐量; 新节点入网之后, 采用了持续链路质量评估技术使链路速率实时优化, 从而保障了网络在整个运行过程中, 不断调整网络速率, 最终整网吞吐量总是处于最优状态。

链路质量评估技术中的 RSSI 统计策略, 能够使未入网节点在入网之前通过多根天线的依次监听并获得针对网络内每个节点的一个可信的 RSSI/包接收个数的矩阵, 同时根据该矩阵中的 RSSI 的加权值估算对端节点发送数据的调制速率, 从而为下一阶段的链路测试过程中的节点选择和天线选择提供依据。通过 RSSI 统计功能, 还能够在节点入网后的链路维护过程中及时检测 RSSI 值的波动情况, 从而估算信道的质量。链路质量评估技术中的数据分组差错率统计策略, 能够使通信节点在入网后根据当前无线信道质量及时合理地调整调制速率。

通过上述两种链路质量评估技术在基于多方向天线阵列的无线 Mesh 网络上的综合运用, 网络节点能够实时感知各条链路上的质量变化并调整到最佳调制速率, 保证了网络所持续提供的带宽能力, 多天线阵列的空时分优势得以实际发挥。

参考文献

- 1 Lee MJ, Zheng JL, Ko YB, Shrestha DM. Emerging standards for wireless mesh technology. *Wireless Communications*. Publication Date, 2006, 13(2): 56-63.
- 2 Zhang YL, Ji J, Hu HL. *Wireless Mesh networking: architectures, protocols and standards*. Auerbach Publications. Taylor and Francis Group. New York, NY, USA. 2006.

(下转第 28 页)

4 结语

网络结构扩展性差、设备地址冲突及互访问控制实现难制约了传统VPN技术的发展。本文分析了产生这些问题的原因。主要的原因是隧道的建立是静态,以及无法实现不同VPN用户信息的隔离。针对这些问题,提出了MPLS和BGP技术构建的VPN,并利用实验室环境应用了该项技术。事实证明,采用该技术在扩展性、用户站点间互访问控制等方面要优于传统的VPN技术,给企业构建自己的专用网络提供了一种解决方案。

参考文献

- 1 Hou JF, Ma MK. Research on PE-CE connection simulation in MPLS VPN. *Computer Engineering*, 2010, 36(12):123-125.
 - 2 Zhang DL, Ionescu D. Qos Performance analysis in deployment of diffServaware MPLS traffic engineering. *Proc. of the 8thACIS International Conference on Software Engineering*. Ottawa, Canada. 2007. 963-967.
 - 3 Rahman MA, Kabir AH, Lutfullah KAM, et al. Performance analysis and the study of the behavior of MPLS protocols. *Proc. of the International Conference On Computer and Communication Engineering*. Kuala Lumpur, Malaysia. 2008. 226-229.
 - 4 Vitch PJ. Enterprise buyer's guide to Layer3 MPLS VPN service. *Enterprise Network & Servers*, 2005, 11: 18-20.
 - 5 Lee YW, Kim S, Park J, et al. A lightweight implementation of RSVP-TE protocol for MPLS-TE signaling. *Computer Communications*, 2007, 30(6): 1199-1204.
 - 6 Chu J, Lea CT. Optimal link weights for IP-based networks supporting hose-model VPN. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(3):778-788.
 - 7 Ren JQ, Ma HL, Wang BQ. Implementaion of inter-AS BGP/MPLS VPN in high-performance router. *Computer Engineering*, 2009, 35(3):126-129.
 - 8 Vitch PJ. Enterprise buyer's guide to Layer 3 MPLS VPN service. *Enterprise Network & Servers*, 2005, (11): 18-20.
 - 9 Li P, Tang JY, Chen DW, et al. Study on classification and comparison of virtual private network. *Computer Engineering*, 2006, 32(22):133-135.
 - 10 Rahman MA, Kabir AH, Lutfullah KA, et al. Performance analysis and the study of the behavior of MPLS protocols. *International Conference on Computer and Communication Engineering ICCCE*. 2008. 13-15.
-
- (上接第22页)
- 3 Lv RJ. A scalable bandwidth allocation method for synchronous wireless mesh network. *Journal of Computational Information Systems*, 2012, 8(19): 8001-8008.
 - 4 Kumar P. Design, Implementation, and Evaluation of New MAC Protocols for Long Distance 802.11 Networks. Kanpur, Uttar Pradesh, India. May 2006.
 - 5 雷昕,郭琳.宽带无线 Mesh 网络中的多扇区天线阵列设计. *中国电子科学研究院学报*,2012,7(4):178-181.
 - 6 侯蓉晖,史浩山,杨少军. 无线传感器网络链路统计特性研究与应用. *系统仿真学报*,2007,(7):1507-1511.
 - 7 黄庭培,李栋,张招亮,崔莉. 一种突发性链路感知的自适应链路质量估计方法. *计算机研究与发展*,2010,(S2):168-174.
 - 8 赵海,朱思远,孙佩刚,张希元.无线传感器网络链路质量测量问题研究. *东北大学学报(自然科学版)*,2008,(2):193-196.
 - 9 徐卓农,王建新,黄家玮.无线网络中的多速率调整机制综述. *计算机科学*,2011,(4):43-47.
 - 10 徐伟强,胡四平,汪亚明,张云华. IEEE802.11 中多速率多节点公平的数据分组长度调整策略. *通信学报*,2011,(2): 120-129.