

An Anti-Interference Wireless Access Scheme for Medical Equipments

Li Shi

Zhengzhou University, Zhengzhou
Email: ra7ul@qq.com

Received: May 10th, 2013; revised: May 13th, 2013; accepted: May 22nd, 2013

Copyright © 2013 Li Shi. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Radio frequency (RF) transmission in wireless network tends to cause electromagnetic interference (EMI) to sensitive electronic medical equipments, affecting their normal operation. The traditional wireless access schemes do not consider the electromagnetic interference. In order to solve this problem, this paper proposed a new anti-interference wireless access scheme. The proposed scheme introduces the power control based on RTS/CTS agreement which can solve the hidden terminal problem. It limits the transmission power of wireless non-medical equipments in medical environment to avoid its electromagnetic interference to medical equipments. Simulation results show that, compared with traditional IEEE 802.11 wireless access scheme, the proposed scheme can effectively avoid electromagnetic interference to electronic equipments by sacrificing some performance of communication system. According to the analysis of the results, this paper can further optimize the proposed scheme.

Keywords: WLAN; Medical Device; EMI; Wireless Access; Power Control

医学设备的抗干扰无线接入方案

石力

郑州大学, 郑州
Email: ra7ul@qq.com

收稿日期: 2013年5月10日; 修回日期: 2013年5月13日; 录用日期: 2013年5月22日

摘要: 无线网络中的射频传输往往会对敏感的电子医学设备造成电磁干扰, 影响其正常运行。而传统的无线接入方案并没有考虑电磁干扰问题。为了解决该问题本文提出了一种新的抗干扰无线接入方案。所提方案在能解决隐藏终端的 RTS/CTS 协议基础上引入功率控制, 通过限制医疗环境中无线非医疗设备的发送功率来避免其对医学设备造成的电磁干扰。仿真结果表明: 同传统的 IEEE802.11 无线接入方式相比较, 本文提出的方案在牺牲一部分通信性能的情况下, 可以有效的降低对医学设备的干扰概率。根据对结果的分析, 本文还会进一步地优化所提方案。

关键词: 无线局域网; 医学设备; 电磁干扰; 无线接入; 功率控制

1. 引言

在医疗健康领域引入无线通信技术, 为病人和医护人员带来极大的方便性、灵活性和高效性。医院的无线局域网中病人无论身在何处都能够被实时监护

和照顾, 医疗过程可以被更好地跟踪, 医学设备可以被更有效地利用。

但是无线通信的射频传输容易对处于无线网络中的电子医学设备造成电磁干扰, 轻则影响设备的

工作质量导致结果偏差,重则使设备出现故障无法工作,更甚者可能会危及到患者的生命安全。虽然国际电工委员会(IEC)60601-1-2 标准已经定义了医学设备对电磁干扰的免疫水平。但是应用于医院环境中的传统无线接入方案却没有考虑电磁干扰问题。因此电磁干扰对医学设备的影响是一个亟待解决的重要技术问题。

目前,电磁干扰的控制方法可分为两类:基于策略和基于技术。基于策略的方法,如风险分析方法^[1],它对超过医学设备免疫水平的风险进行估计,然后采用适当的管理策略降低该风险。基于技术的方法,如红外局域网^[2]和照明网络^[3]分别被提出用于医院环境中的无线数据传输。虽然这两种网络可以避免对医学设备造成电磁干扰,但是经由不可见/可见光传输的数据均无法在医院内的众多障碍间实现无缝移动,很难保证医学通信的质量。相反,射频在这方面更适合医学设备的无线传输。

现存在两种部署射频系统的主要方法:无线医疗遥测系统(WMTS)和 IEEE 802.11 无线网络。前者是分配的 WMTS 频段中的专属网络,后者是非授权频段(2.4 GHz 或 5 GHz)中的无线局域网。尽管 WMTS 遥测系统频段是专用于确保无线医疗遥测设备免受伤

害性干扰的,但是同 802.11 网络相比,它既受限于有限带宽又不能用于广义医学应用。

因此,文献^[4]中医疗信息传输提出了一种基于射频无线系统的 EMI 感知方案。本文会用自己的方法对其进行验证,并在此基础上提出新的改进方案。

2. 抗干扰无线接入系统

本文所提出方案使用的系统是在非授权频带下的两个信道中运行的。一个是用于传输控制信号的控制信道,而另一个是用于传输数据的数据信道。并且假设有源医学设备的发射器也在此数据信道中发送数据。

该系统主要由三部分组成:库存系统(即数据库),无线电接入控制器(RAC)和用户端(例如无线医疗监控设备和无线医疗信息设备),可参见图 1。用户端通过无线链路和 RAC 交互信息,而 RAC 则通过有线的基础设施连接于库存系统,并实时的获取相关数据信息。这三个部分的关键功能如下:

1) 库存系统用于搜集并存储医院中所有电子医学设备的信息(例如开关状态,位置,抗电磁干扰水平和加性噪声信干比阈值)。这个系统可以被有效的跟踪系统支持,其中电子医疗设备的位置信息可以通过

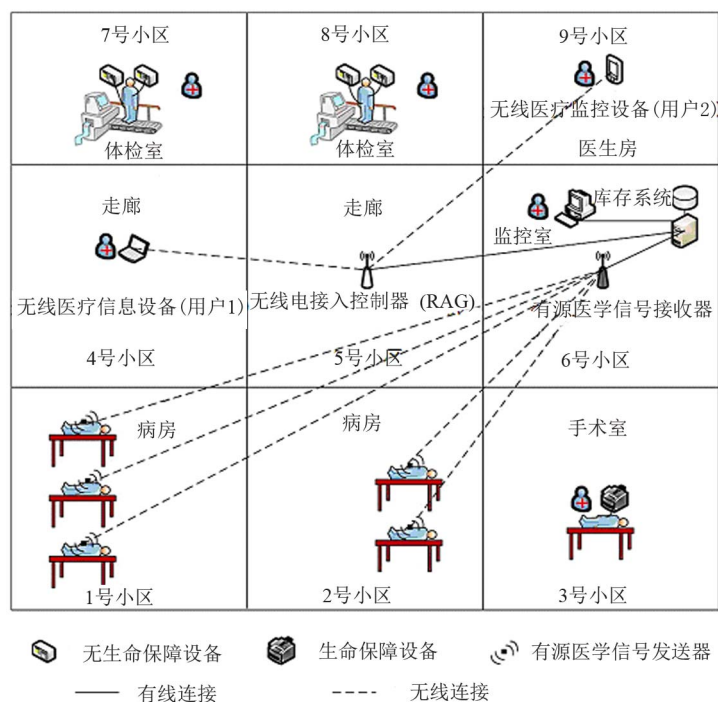


Figure 1. System composition and simulation scenarios
图 1. 系统组成和仿真情景

RFID 技术获取。

2) RAC 负责协调管理整个网络的接入与运行,通过使用来自库存系统的更新信息来有效地控制和管理由用户端所共享的动态频谱。RAC 为用户端定义了安全传输参数(例如传输功率)来保护医学设备免受电磁干扰。RAC 能够执行有效信道分配以及使用无线接入方案控制用户端的无线接入。

3) 用户端是使用电子健康应用(例如临床医生通知应用和电子病历应用等)的无线非医疗设备,也是电子医学设备主要的干扰源。这些设备能够通过适应性调谐发送功率经由 RAC 发送/接收数据。

系统的整个网络工作在 2.4 GHz 频段,无线医疗通信系统中的设备通过 TDMA 的多址方式与 RAC 通信。RAC 装备了两部无线电收发器(即一个用于公共控制信道,另一个用于数据信道)。因此,它可以同时地接入这两个信道。另一方面,用户端装备了一个双工信道无线电收发器,它同一时间只能接入一个信道(即公共控制信道或者数据信道)。

3. 仿真情景想定

为了便于仿真的进行,考虑一个 27*27 平方米的一层建筑的心脏科医疗区如图 1 所示。它被划分为九个小区,其中包括一个手术室,一个监控室,一个医生房,两个体检室,两个病房和占据两个小区域的走廊。它由有源医学设备、无源医学设备和抗干扰无线接入系统组成,而 RAC 位于该医疗服务区域的中心。

本文假设在区域内有一个生命支持医学设备(即除颤器),四个非生命支持医学设备(即两个心电图监视器和两个血压监视器),和一个配有五个有源医学信号发送器的有源医学信号接收器。

4. 抗干扰无线接入机制

在基础设施的支持下,用户端首先通过使用基于时隙的 RTS - CTS 信道接入协议在公共控制信道中连接 RAC。用户端在发送 RTS 之前执行载波侦听用来避免同其他用户的冲突即 CSMA/CA。用户端的传输必须不能对受保护用户即对电磁敏感的电子医学设备引起任何干扰。所提出的无线接入方案的操作机制主要由三个步骤组成。其中上行和下行的传输都被考虑在内,它们的抗干扰无线接入控制有轻微地不同。

4.1. 公共控制广播

该步骤用于广播 P_{ctrl} ,它是用户端在控制信道中发送 RTS 或者 CTS 而不对受保护的设备引起电磁干扰的最大发送功率。每一个用户端根据其位置的不同它的 P_{ctrl} 也有所不同。

医学设备开关状态和位置以及用户端(即无线非医疗设备)的位置会随着时间动态改变。因此,当它们有所变化时 RAC 将重新计算和广播 P_{ctrl} 。如果一个设备被切换到开或者关,库存系统将更新这个状态并通知给 RAC。RAC 将为每一个用户端计算一个新的 P_{ctrl} 值并进行广播。

同 IEEE 802.11 标准类似,在每个时隙的开始,每个用户端在发送一个 RTS 消息或一个数据包之前将等待直到信道(即控制或传输信道)被检测出对分布式协调功能帧间间隔(DIFS)是空闲的。如果 RAC 不得不更新,它将在控制和数据信道的一个短帧间间隔(SIFS)之后广播一个携带关于信息的新消息。由于 SIFS 比 DIFS 短,所有用户端能够检测到广播并停止它们的传输,所以用户端能同步到 RAC。

4.2. 上行请求传输的接入控制

在公共控制信道广播之后,一个用户端可以使用基于 RTS - CTS 的抗干扰无线接入协议在控制信道中发送它的传输请求。其具体的工作流程可参见图 2。在传输数据之前,用户端首先发送一个 RTS 消息给 RAC。一旦 RTS 消息成功地被 RAC 端接收,RAC 将使用相同的公式为数据信道中的这个用户端计算出发送数据的功率上限。如果 RAC 不能找到符合医学设备电磁干扰约束条件以及满足用户端最小服务质量要求(如最小数据速率)的切实可行的发送功率,数据传输的请求将被终止。

如果一个用户端的传输请求被终止,一个否定 CTS 消息会被 RAC 发送给这个用户端。否则,RAC 将以最大允许发送功率发送一个 CTS 消息。用户端可以相应地在数据信道上适应性地调谐它的发送功率。一旦 CTS 消息被用户端成功地接收,用户端在相同的时隙内将会立即发送一个应答(ACK)消息给 RAC。所以 CTS 消息传输的一个时隙是由 CTS 消息传输周期和 ACK 消息传输周期组成的。如果 RAC 在时隙结束时没有接到相应的 ACK 消息,它将在下一个时隙

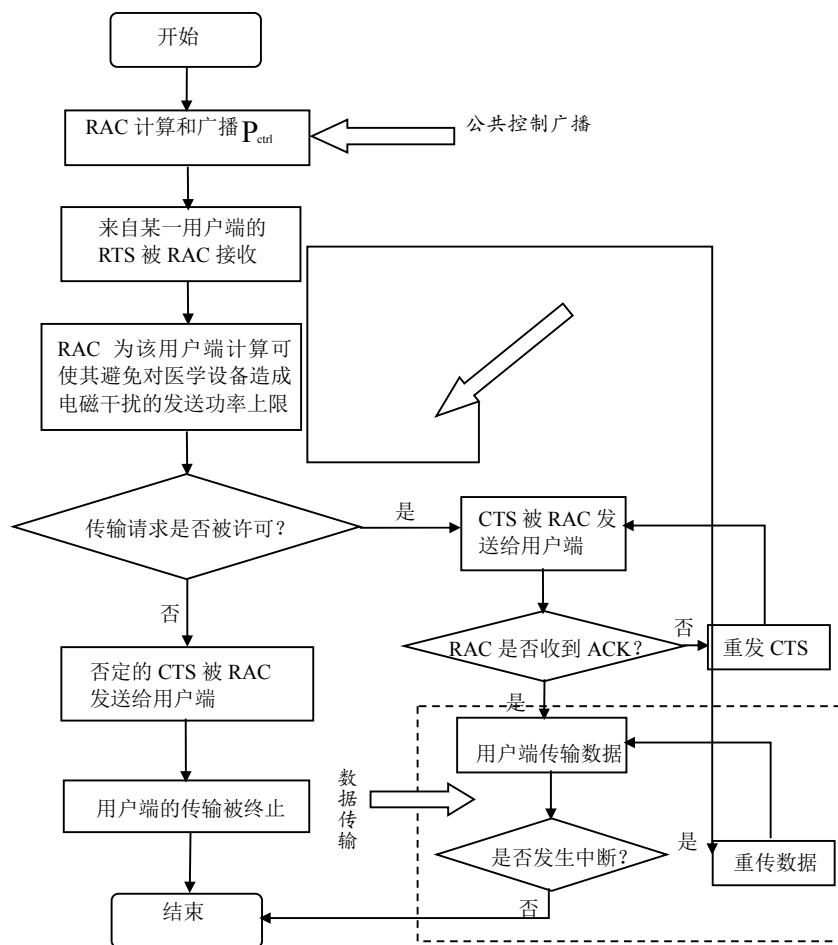


Figure 2. Flow chart of anti-jamming wireless access control for uplink request transmission
图 2. 上行请求传输的抗干扰无线接入控制的流程图

自动地重新发送 CTS 消息, 此处可以用自动重传请求 (ARQ) 协议实现。

同广播类似, 每一个用户端等到公共控制信道在 DIFS 内被检测到空闲后再发送一个 RTS 消息。一旦接收到 RTS 消息, RAC 将立即在 CTS 时隙内 SIFS 之后发送一个 CTS 消息给用户端。

4.3. 下行请求传输的接入控制

至于下行请求传输的接入控制的操作流程可参见图 3。一旦 RAC 有一个来自用户端的传输请求, 它立即会检索用户端的位置并为其计算可行的发送功率以避免电磁干扰。如果 RAC 不能够找到可行的发送功率, 传输请求将被终止。如果传输请求被允许, RAC 在一个 SIFS 之后将会在控制信道中发送可行发送功率和一个 RTS 消息给用户端以避免同其它用户端的 RTS 消息发生冲突。一旦接收到 RTS 消息, 用

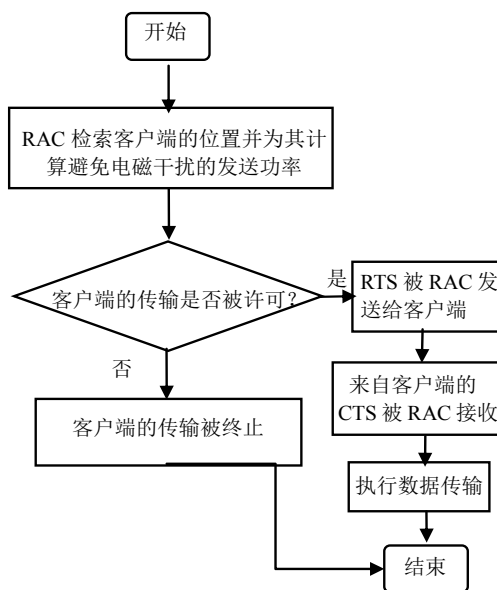


Figure 3. Flow chart of anti-jamming wireless access control for downlink request transmission
图 3. 下行请求传输的抗干扰无线接入控制的流程图

户将在 SIFS 期间用一个 CTS 消息做出响应。在 CTS 传输的同一个时隙内, RAC 将立即向用户发送一个 ACK 消息。ARQ 机制还被用于从错误传输中恢复原状。

虽然 RTS/CTS 协议在数据传输时带来了额外开销, 它可以被用于避免对医学设备带来有害的干扰并同时解决隐藏终端问题。实际上, RTS 和 CTS 传输长度是非常小的(例如每个长 18 微妙), 而用户端的数据传输时间却有几百毫秒(例如无线医疗监控设备的 250 毫秒以及无线医疗信息设备的 810 毫秒)。与数据传输长度相比, RTS/CTS 协议引起的开销是可以忽略不计的。

4.4. 数据传输

一旦接收到用于上行传输的 CTS 消息或者用于下行传输的 RTS 消息, 用户端将把它的无线电从控制信道切换到数据信道。当数据信道对用户而言可用时, 用户将在数据信道中等待直到 RAC 发一个允许用户发送接收数据的消息。时隙的持续时间被假设为固定的, 在此期间一个数据包可以被发送。这个传输时隙由数据传输周期和 ACK 传输周期组成。我们还假设一个 ARQ 协议为了差错控制而被用在数据信道中。

5. 用户端的最大允许发送功率

一个用户端的最大传输功率可以通过求解式(1)获得:

$$P_{\max} = \min \left\{ \min(P_A(x)), \min(P_{NLS}(y)), \min(P_{LS}(z)) \right\} \quad (1)$$

其中 $P_A(x)$ 是有源医疗设备 x 以瓦特为单位的传输功率上限, P_{NLS} 和 P_{LS} 分别是非生命支持设备 y 和生命支持设备 z 以瓦特为单位的传输功率上限。

5.1. 有源医学设备可容忍的发送功率上限

为了保护有源医学设备, 来自其他无线非医学设备的干扰决不能引起有源医学设备的 SINR 下降到要求的阈值以下。通过化简 SINR 方程组, 有源医学设备 x 能够容忍的无线非医疗设备发射器的传输功率上界可以从式(2)中获得, 如下所示, $D_x(x)$ 是有源医学发送器和接收器 x 之间以米为单位的距离。 $\gamma(x)$ (取 16

dB)和 $N(x)$ 分别是 SINR 阈值和有源医学设备以瓦特为单位的背景噪声。 $D_A(x)$ 是用户和有源医学接收器 x 之间以米为单位的距离。 $L(d)$ 是总的室内传输路径损耗, 其表达式如式(3)所示。 RAC 能够检索发射器和接收器的位置以及来自库存系统的有源医学设备 x 的 SINR 阈值。 $\sum_{\chi=1, \chi \neq x}^X P_t(\chi)/L(D_\chi(x))$ 是其它有源无线发射器对有源接收器 x 的总干扰, 其中 X 是在一个时隙内同时传送数据的有源无线发射器的数目。仿真中, 我们假设有源医学设备没有干扰无源医学设备。

$$L(d)[in \text{ dB}] = L(d_0)[in \text{ dB}] + 10n_{SF} \log(d/d_0) + FAF[in \text{ dB}] \quad (2)$$

其中, 其中 d_0 是参考距离, FAF 是平均楼层衰减因子, 而 n_{SF} 是同一楼层测量的路径损耗指数。取 $d_0 = 1, L(d_0) = 37.7 \text{ dB}, n_{SF} = 3.3, FAF = 16.2 \text{ dB}$ 。

5.2. 无源医学设备可容忍的发送功率上限

为了保护无源医学设备, 无线传输的射频发射不应该引起无源医疗设备的电磁场比它们的抗电磁干扰能力强。非生命支持设备 y 和生命支持设备 z 能够容忍的用户端发送传输功率上限可分别由式(3)和式(4)获得。

$$P_{NLS}(y) = \left[\frac{D_{NLS}(y) \left(E_{NLS}(y) - \frac{7 \sum_{\chi=1}^X \sqrt{P_t(\chi)}}{D_\chi(x)} \right)}{7} \right]^2 \quad (3)$$

$$P_{LS}(z) = \left[\frac{D_{LS}(z) \left(E_{LS}(z) - \frac{23 \sum_{\chi=1}^X \sqrt{P_t(\chi)}}{D_\chi(x)} \right)}{23} \right]^2 \quad (4)$$

需要注意的是上式适用的射频频谱范围是 MHz 至 2.5 GHz。它们是从辐射功率和电场的基本关系(即 $E = \sqrt{Z_0 P/D}$)中推导出来的。其中常数 Z_0 是自由空间的阻抗, 其单位是欧姆(Ω)。 D_z 是无线发射器和医学设备之间以米为单位的距离。 D_{NLS} 和 D_{LS} 分别是非生命支持设备 y 到用户端及生命支持设备 z 到用户端的距离。 E_{NLS} 和 E_{LS} 分别是非生命支持设备 y 和生命

支持设备 z 的抗电磁干扰(即抗射频辐射)水平, 由医学设备可以正常运行的电场(由 V/m 度量)定义。设备的位置和抗电磁干扰水平均可以被 RAC 从库存系统中检索出来。

6. Matlab 仿真实验与结果分析

利用 Matlab 软件对上述无线医疗环境进行仿真, 分别定量分析在传统无线接入方案和抗干扰无线接入方案下无线非医疗设备即用户端的射频传输对电子医学设备的干扰情况及通信质量。

6.1. 新旧方案的性能评估

本文考虑每次只能有一个用户在数据信道中传输数据的上行传输的情境, 研究两个性能指标即干扰率和中断率, 并对它们进行仿真实验。

6.1.1. 设备位置坐标的确定

以图 1 中小区 1 的左下角为坐标原点建立直角坐

标系, 医疗区域内的生命保障设备、非生命保障设备、有源接收器和 RAC 的位置坐标如表 1 所示:

用户端由医生随身携带, 随时查阅与记录病人的相关信息, 它们在每个病房的位置服从均匀随机分布, 而有源接收器由便病人随身携带, 其位置跟随病人的活动在整个医疗区域服从均匀随机分布。

6.1.2. 干扰率的仿真

干扰率是用户端(即无线医疗监控设备或无线医疗信息设备)的发送功率超过其附近的电子医学设备所能承受的最大发送功率的概率。

用 Matlab 分别求解用户端固定发送功率 10、0、-5 dBm 大于上最大允许发送功率的概率, 并将数值仿真的结果即每个小区内的干扰概率用条形图表示出来, 如图 4 所示。

6.1.3. 中断率的仿真

中断率则是在 RAC 处接收到的用户端传输信号的强度低于-94 dBm 的概率。

Table 1. Position coordinates of medical equipments in the medical area

表 1. 医疗区域中设备的位置坐标

小区编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RAC	(13.5;13.5)								
生命保障设备	(23.1;4.6)								
无生命保障设备							(3.8;22.7)	(12.7;22.7)	
有源接收器							(5.2;22.7)	(14.1;22.7)	
	(22.6;13.5)								

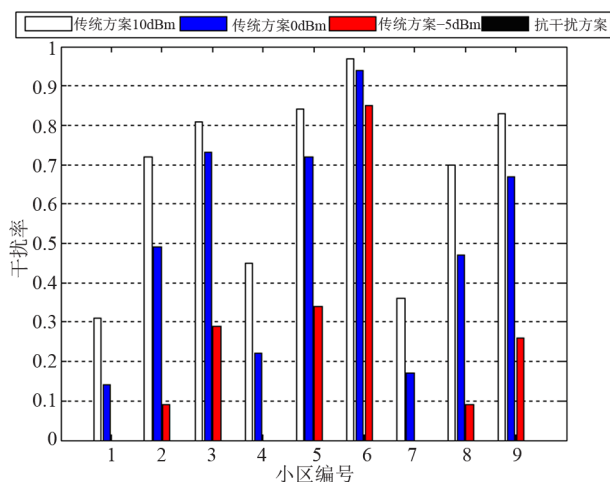


Figure 4. Interference ratio of each medical district
图 4. 医疗区域内各小区的干扰率

由于 RAC 的接收器是基于 IEEE 802.11b 的技术, 需要强度为-94 dBm 接收信号以保证 1 Mb/s 的传输速率。如果因为无线信道的衰落特性而使接收端的信号能量过弱无法达到质量要求, 传输会被中断。通过 Matlab 仿真在没有重传机制的条件下每个小区内的无线通信的中断概率, 并将其用条形图表示出来, 如图 5 所示。

6.2. 仿真结果的对比分析

6.2.1. 干扰率的分析

在所提出的方案中, 因为根本不允许用户端使用对医学设备造成干扰的传输功率, 所以在任何小区内都不会引起电磁干扰。相反采用传统 802.11 无线接入

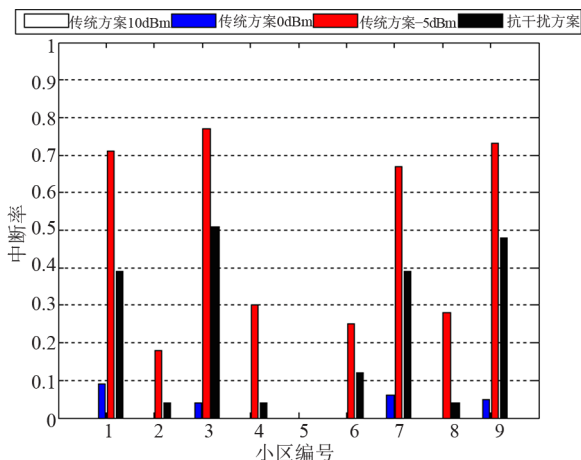


Figure 5. Outage ratio of each medical district
图 5. 医疗区域内各小区的中断率

方案,使用固定发送功率的 CSMA/CA 协议,用户端的射频传输一定会对医学设备造成干扰,并且其发送功率越高,造成干扰的概率就越大。由图 4 可知,传统方案对医学设备引起严重的干扰,特别在 6 号小区中,因为对电磁干扰最敏感的有源医学接收器位于这个区域。5 号和 9 号小区因为距离该小区较近也要交个的干扰率。而在 3 号、7 号和 8 号小区中,因为放置了无源医学设备,所以也会存在较高的干扰率。在这样的对比下就能发现研究所提方案的是十分必要的。

6.2.2. 中断率的分析

由图 5 可知,在大多数小区内,所提方案的中断率比传输功率为 10 dBm 和 0 dBm 的传统方案的中断率高。这是由于这样一个事实:所提方案限制了用户端的传输功率以避免对附近的医学设备造成电磁干扰。3 号小区内的中断率最高是因为其距离 RAC 较远而又距离放有有源医学接收器的 6 号小区较近。不过,抗干扰无线接入方案能够在不同的小区根据设备的位置的变化适应地增加传输功率。因此,所提方案的中断率比传输功率为-5 dBm 的传统方案的中断率低。虽然传输功率为 10 dBm 的传统方案由于高的发送功率从未有中断问题,但是这会导致其拥有最高的干扰率。

综合两个性能指标的分析结果,同传统的 802.11 无线接入方案相比较,所提出的抗干扰无线接入方案的优越性更高,它在可接受范围内牺牲部分通信性,通过限制用户端的发送功率来避免其对受保护的医

学设备造成电磁干扰。

7. 方案优化

在上述方案中,无线电接入控制器(RAC)必须对无线网络中所有用户的位置和状态信息有十分精确的掌握,并及时地随时间更新。这无疑增加了 RAC 的复杂度。在实际的医院环境中,用户数目越多该缺点就越明显。

此外,为避免对附近的医学设备造成电磁干扰而限制了无线非医疗设备/用户端的发送功率,又因为无线信道的衰落特性,所以到达 RAC 接收端的信号容易因能量过弱而无法达到质量要求,从而导致传输被中断。

本文为解决方案中存在的这两个问题而提出的优化方案如下。

7.1. 基于小区计算功率

为了简化 RAC 的复杂度,最大可接受发送功率的计算可以从基于每个用户改为基于每个小区。因为医疗区域范围被划分的小区是固定的,如果计算出每个小区的最大可接受发送功率,用户位于不用小区时就能采用该功率发送。这同样可以避免电磁干扰且仅仅要求每一个用户知道自己的地理位置。通过 Matlab 仿真出的用户端位于每个小区时的最大允许发送功率如图 6 所示。

由图可知 3 号、5 号、6 号和 9 号小区,特别是 6 号小区的最大允许发送功率较低。所以,相对其它区域而言,它们的干扰率会较高,这恰好与图 5~4 所示

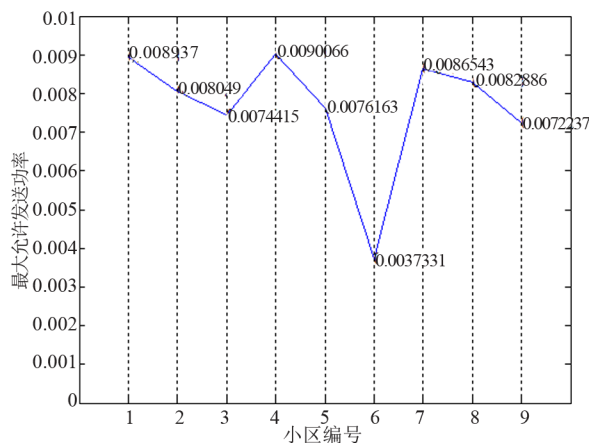


Figure 6. Maximum allowed send power of each medical district
图 6. 医疗区域内各小区的最大允许发送功率

的内容相符。

7.2. 固定中继站的使用

中继是一种接收其他站点信息，并根据接收到的信号生成自身发射信号的装置，从而延伸无线网络的覆盖范围，消除网络盲区。它本身有相对简单的协议栈，对接收信号进行解调和基带处理，然后生成发射信号。采用中继传输能够抵抗无线信道的多径衰落，克服阴影效应，从而增强通信质量。

为了降低抗干扰方案的中断率，可利用无线固定中继。中继可以帮用户端把数据传递给 RAC 反之亦然。经过信号放大或再生处理后有利于接收端的解码从而减小中断发生的机率。同安置多个 RAC 相比，安置固定中继即简单又经济。

考虑到医院环境中设备密集，人员流动较大，从发射器到接收器不易存在直射信号，所以在本次仿真中选用瑞利衰落信道作为无线电信号传播环境的统计模型^[5]。分别计算出在未使用中继和使用中继情况下的中断率，二者的比较结果如图 7 所示，可发现在适当的信噪比范围内中继的使用确实能够有效地降低中断率。

8. 结语

本文为解决无线医疗通信环境中的电磁干扰问题，通过建模和仿真验证了医学设备的抗干扰无线接

入方案的有效性，并通过对实验结果的分析进行了方案优化。

9. 致谢

本文从选题到实验方案的确定及到最终定稿，都得到了蒋慧琴老师的热心关注和悉心指导。在此，谨向蒋老师致以衷心的感谢和崇高的敬意。

在本文的研究过程中，感谢刘玄武和张建冲师兄的热心参与，不辞劳苦地同我一起讨论问题。

最后感谢本文所参考文献的所有作者们。

参考文献 (References)

- [1] M. Ardavan, K. Schmitt and C. W. Trueman. Preliminary assessment of EMI control policies in hospitals. 14th International Symposium on Antenna Technology Applied Electromagnetics, American Electromagnetic Conference, 2010: 1-6.
- [2] S. Hagihira, M. Takashina, T. Mori, N. Taenaka, T. Mashimo and I. Yo shiya. Infrared transmission of electronic information via LAN in the operating room. Journal of Clinical Monitoring and Computing, 2000, 16(3): 171-175.
- [3] H. Hong, Y. Ren and C. Wan. Information illuminating system for healthcare institution. Proceedings of International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, May 16-18 2008, 801-804.
- [4] P. Phunchongharn, D. Niyato, E. Hossain and S. Camorlinga. An EMI aware prioritized wireless access scheme for e-health applications in hospital environments. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2010, 14(5): 1247-1258.
- [5] M. O. Hasna, M.-S. Alouini. Performance analysis of two-hop relayed transmissions over Rayleigh fading channels. Proceedings of the 2002 IEEE 56th Vehicular Technology Conference, Vancouver, 24-28 September 2002, 1992-1996.

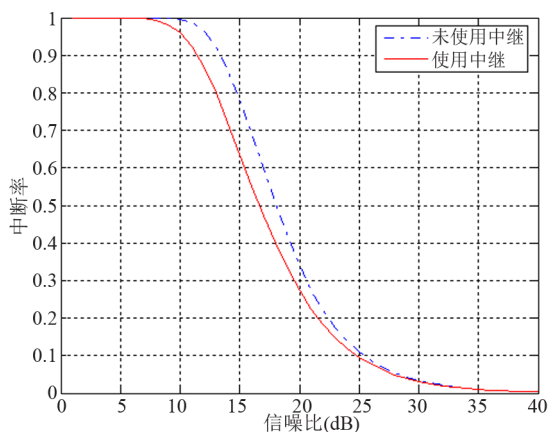


Figure 7. outage probability without using relay and with relay
图 7. 未使用中继和使用中继情况下的中断率