

基于中国医用体域网频段的物理层方案设计及干扰分析

邹卫霞^① 康峰源*^① 杜光龙^① 张春青^②

^①(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

^②(国家食品药品监督管理局医疗器械标准管理中心 北京 100050)

摘要: 该文基于中国医疗体域网的专用频段提出了采用扩频的 OQPSK 调制方案,并在多种干扰的背景下进行分析,仿真结果表明该方案对宽带干扰具有较好的抑制性能,但是由于接收端帧检测算法虚警率较高而对窄带干扰较为敏感。为此提出基于两次延迟自相关的帧检测算法,并验证该算法对宽带和窄带干扰都有较好的抑制性能。该文的研究成果可以为我国无线体域网标准制定提供技术参考,目前该调制方案已被 IEEE802.15.4n 采纳。

关键词: 无线体域网; 干扰分析; OQPSK; 帧检测; 可靠性

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)02-0429-06

DOI: 10.11999/JEIT140901

Physical Layer Proposal Design and Interference Analysis Based on Chinese Medical Band in Wireless Body Area Network

Zou Wei-xia^① Kang Feng-yuan^① Du Guang-long^① Zhang Chun-qing^②

^①(Wireless Network Laboratory, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China)

^②(Center for Medical Device Standardization Administration, China Food and Drug Administration, Beijing 100050, China)

Abstract: An OQPSK modulation scheme used spread spectrum is proposed which is based on the Chinese medical band. The analysis is done under variety of interference, the simulation results indicate that this scheme has good performance of the broadband interference suppression, but is sensitive to the narrowband interference because of high false alarm rates of frame detection. A new frame detection algorithm based on twice delayed-autocorrelation is proposed, and it is verified that the algorithm exhibits better performance for narrowband and wideband interferences. The recording results of this paper can provide technical reference for standards development of wireless body area network standards. Currently, this scheme has been adopted in IEEE802.15.4n.

Key words: Wireless Body Area Network (WBAN); Interference analysis; OQPSK; Frame detection; Reliability

1 引言

随着中国人口的不断增多以及老龄化步伐的加快,医疗资源日益紧缺,迫切需要可以实时监测人体征数据的网络出现以替代传统的人工采集数据的方法。早期的监测网络多为有线网络,由线缆上传传感器采集的数据。这种方式不但造成用户的舒适性差,而且限制了设备的移动性,不利于远程医疗的应用。于是,以人为中心的无线体域网(Wireless Body Area Network, WBAN)应运而生,这使得用户具有更好的移动性,并具备无线定位的功能,使得其在医疗支持、人体健康状况的监控和消费电子等领域有着越来越广泛的应用前景。

目前,无线体域网相关国际标准有 IEEE 802.15.6 和 IEEE 802.15.4j,其中前者已于 2012 年 3 月正式颁布,它是使用工科医频段以及国家医疗和/或监管局授权的频段针对人体(但不局限于人体)而制定的短距离无线通信标准。IEEE 802.15.4j 则是基于美国新近颁布的 2360~2400 MHz 频段的标准,已于 2013 年 2 月开始实施。由于频谱划分差异性及医疗/保健习惯的不同,将现有国际标准完全照搬至中国显然不可行,因此有必要建立一套中国医用物联网标准以适应国内的频段及场景的差异,同时保护国内企业自主知识产权。在北京威讯紫晶、北京邮电大学及华为技术有限公司等发起下,电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)组织于 2012 年成立了 IEEE802.15.4n 工作组,研究适用于中国医疗频段的新标准。

2014-07-09 收到, 2014-12-03 改回

国家自然科学基金(61171104)资助课题

*通信作者: 康峰源 kangfengyuan@aliyun.com

为了节约成本便于无线体域网的推广, 本文提出了与 802.15.4c^[1] 和 802.15.4g^[2] 相兼容的基于 OQPSK 调制的物理层方案^[3], 该物理层方案作为 IEEE802.15.4n 其中之一调制方案已被标准组采纳, 目前 IEEE802.15.4n 处于文本编辑阶段。鉴于无线体域网用于监护病人的生命体征参数, 其对可靠性的要求比较高, 因此, 除了建议在医学专用频段依照无线体域网标准开发相关产品之外, 还需研究该方案在医疗频段 (174~216 MHz, 407~425 MHz, 608~630 MHz) 上的抗干扰性能, 文中通过大量仿真验证了该方案的可行性。

2 物理层模型

2.1 OQPSK 调制的物理层方案设计

首先, 根据不同的速率要求选择扩频方式, (16,4)-DS/(8,4)-DS 分别对应 250 kbit/s 与 500 kbit/s 两种速率, 其中 (8,4) 扩频码由于扩频倍数较小, 扩频后会出现连续相同的码片, 所以针对 500 kbit/s 模式加入了白化模块。然后按照表 1 中的帧格式对负载进行封装组帧, 再经过 OQPSK 调制、脉冲成型后得到基带信号。该方案考虑了与已有标准的兼容性, 采用了相似的物理层结构, 可以有效地降低企业的芯片研发成本, 有利于 WBAN 在中国快速推广。

物理层方案信号码片速率 $R_{cu} = 1$ Mchip/s, 码片周期 $T_{cu} = 1/R_{cu} = 1$ ms。设扩频后的数据为 $I_{cu}(m) = \pm 1$, 脉冲成型滤波器采用升余弦滚降信号:

$$g_T(t) = \begin{cases} \frac{\sin(\pi t/T_{cu})}{\pi t/T_{cu}} \times \frac{\cos(r\pi t/T_{cu})}{1-4r^2t^2/T_{cu}^2}, & t \neq 0 \\ 1, & t = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 r 为升余弦系数, $r = 0.8$, 则基带发射信号为

$$s(t) = \sum_m I_{cu}(m) g_T(t - mT_{cu}) \quad (2)$$

2.2 仿真系统模型

该物理层方案的通信系统结构如图 1 所示。其接收到信号为

$$r(t) = s(t) + u(t) + n \quad (3)$$

其中 $r(t)$ 为接收信号, $s(t)$ 为有用信号, $u(t)$ 为干扰信号, n 为高斯噪声信号。干扰信号在经过自由空间衰落后得到 $u(t)$ 。所用自由空间衰落模型^[4]为

$$PL(d) = \begin{cases} pl(1) + 10\gamma_1 \lg(d), & d \leq 8m \\ pl(8) + 10\gamma_8 \lg(\frac{d}{8}), & d > 8m \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$pl(1) = 10\gamma_1 \lg\left(\frac{4\pi f}{c}\right) \quad (5)$$

$PL(d)$ 为衰减倍数 (单位 dB), f 为载波频率, c 为光速, γ_1, γ_8 为常数, 分别为 $\gamma_1 = 2.0, \gamma_8 = 3.0$ 。

802.15.4n 接收机接收到 $r(t)$ 后, 依次经过帧检测、频偏估计、定时同步、解调制扩得到原始信息。这里的帧检测采用延迟自相关算法, 如式 (6) 所示。

$$m_k = \frac{C_k}{P_k} = \frac{\left| \sum_{i=0}^{P-1} r_{k+i} r_{k+i+d}^* \right|}{\sum_{i=0}^{P-1} |r_{k+i}|^2} \quad (6)$$

表 1 IEEE802.15.4n OQPSK 提案物理层帧结构

字节数	4	2	3	0~2047
组成名称	前导序列	帧界定符	物理层数据头	物理层帧负载
扩频方式	(16,4)扩频	(16,4)扩频	(16,4)扩频	(16,4)或 (8,4)扩频模式

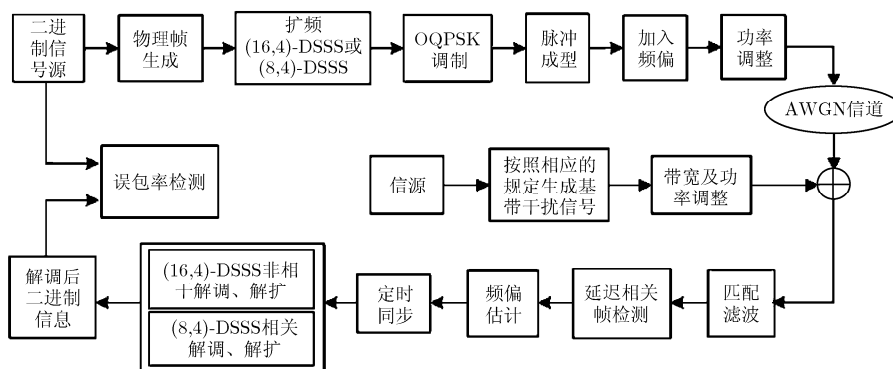


图 1 IEEE802.15.4n 信号在其他无线信号干扰下的基带仿真模型

其中 d 为延迟长度, k 为延迟自相关起始位置, P 为累加长度, r 为接收数据, C_k 为信号延迟 d 的自相关值, P_k 为信号能量值。

接收机收到信号后进行延迟相关运算和能量计算后得到判决值 m_k 。比较判决值 m_k 与门限 g , 若 $m_k \geq g$, 则说明接收机端有数据到达, 启动后续模块, 否则继续检测。

2.3 干扰信号模型

通过查阅中国无线电管理相关规定^[5,6], 得到干扰设备详细参数如表2所示。本文将大于 802.15.4n 带宽的干扰归类为宽带干扰, 小于 802.15.4n 带宽的干扰归类为窄带干扰。

2.3.1 公众对讲机 采用调制方式为 F3E(F 为调频, 3 为模拟调制, E 为语音), 发射信号模型为

表2 医疗频段干扰设备详细参数

设备名称	重叠频段(MHz)	带宽	调制方式	发射功率
中国移动多媒体广播	608 ~ 630	8 MHz	OFDM	室内10 mW
公众对讲机	409.7500 ~ 409.9875	小于12.5 kHz	F3E	500 mW
无线汽车防盗报警装置	409.7500 ~ 409.8625	小于12.5 kHz	F2D	500 mW
IEEE802.15.6	420 ~ 425	320 kHz	MSK	10 mW
数字对讲机	409.50 ~ 409.75 409.9875 ~ 423.5000	小于12.5 kHz	FSK	44 dBm
通用无线遥控设备	614 ~ 630	小于1 MHz	FSK/ASK	5 mW

$$u(t) = Ae^{j(2\pi\Delta f \int_0^t m(\tau) d\tau)} \quad (7)$$

其中, A 为信号幅度, $A = 1$; Δf 为频率偏移常数, $\Delta f = \pm 15$ kHz; $m(\tau)$ 为语音信号, 带宽 3.9 kHz; 载频 409.75 MHz。

2.3.2 无线汽车防盗报警装置、数字对讲机 无线汽车防盗报警装置、数字对讲机调制方式为 F2D(F 为调频, 2 为数字调制, D 为数据, 遥测和遥控指令), 仿真中采用 4FSK 调制; 发射信号模型为

$$u(t) = Ae^{j2\pi n\Delta f t} \quad (8)$$

其中, A 为信号幅度, $A = 1$; Δf 为频偏, $\Delta f = 1.296$ kHz; 比特速率 $R_b = 10$ kbit/s; 无线汽车防盗报警装置载频 409.75 MHz, 数字对讲机载频 409.50 MHz。

2.3.3 通用无线遥控设备 该类设备带宽和调制方式没有相应的标准规定, 市面上产品一般使用 FSK/ASK 调制, 仿真选取 ASK 调制方式, 基带发射信号模型为

$$u(t) = A \sum_n a_n g_T(t - nT_b) \quad (9)$$

其中 A 为信号幅度, $A = 1$; g_T 为升余弦滚降信号, 系数为 0.8; 比特速率为 $R_b = 100$ kbit/s; 载频为 614 MHz。

2.3.4 IEEE802.15.6 IEEE802.15.6^[7]与 IEEE802.15.4n 重叠的频段为 420~425MHz。按照 802.15.6 物理层标准的要求组帧, 数据帧包括前导、数据包头、数据包负载 3 个部分。然后对数据进行 BCH 编

码, 采用重复码、比特交织、加扰来提高信息传输的可靠性。最后采用 GMSK 调制得到基带信号:

$$u(t) = Ae^{j\sum_m a_n q(t - mT_b)} \quad (10)$$

其中, a_n 为加扰后的二进制信息; $q(t) = \int g(\tau) d\tau$, $g(t)$ 为 $BT_b = 0.5$ 的高斯滤波器矩形脉冲响应; 比特速率为 $R_b = 75.9$ kbit/s; 载波频率为 420 MHz。

2.3.5 中国无线多媒体广播 中国无线多媒体广播 (China Mobile Multimedia Broadcasting, CMMB) 行业标准^[8]中规定了两种带宽结构, 2 MHz 和 8 MHz 带宽。目前, 国内的无线广播频道带宽均为 8 MHz, 因此本文仅针对 8 MHz 带宽下的 CMMB 进行分析。CMMB 采用 OFDM 调制, 共有 4096 个子载波, 有用信号仅占用其中 3076 个子载波, 子载波间隔为 2.44140625 kHz, 此时信号带宽为 7.512 MHz。上层传输下来的数据流首先经过 RS 编码和字节交织后再经过 LDPC 编码、比特交织、QPSK 调制; 然后与连续导频、离散导频组成 OFDM 频率信号; 为降低峰均比还需要对 OFDM 频域符号进行扰码。扰码后信号在添加循环前缀, 波形成型等操作后得到基带信号。仿真中载频选择 618 MHz。

3 仿真实验

3.1 仿真参数

仿真中, 802.15.4n 信号功率设置为 -82 dBm (500 kbit/s 模式下接收机灵敏度), 其基带信号采样间隔为 0.25 ms; 采用高斯白噪声信道, 信噪比设置为 15 dB; 干扰设备与 802.15.4n 接收机之间距离为

1 m^[9]; 晶振频偏最大值为 40 ppm; 数据包长度为 2040 bit, 每个数据包前添加 1000 个采样点高斯噪声数据; 共统计 2000 个数据包的误包率, 其中 802.15.4n 正常工作的误包率需要小于 1%。

3.2 仿真结果与性能分析

当信道中存在宽带干扰 CMMB 时, 仿真结果如图 2 所示。图中(1)表示 250 kbit/s, 图中(2)表示 500 kbit/s 模式。在这两种速率模式下, 链路的误包率随着 CMMB 发射功率的增加有所下降, 且下降趋势与信道中仅存在 AWGN 噪声相似。

在 250 kbit/s 模式下, 当 CMMB 信号的发射功率低于 -50 dBm 时, 802.15.4n 的接收机可以正常工作; 在 500 kbit/s 模式下, 当 CMMB 信号的发射功率低于 -52.5 dBm 时, 802.15.4n 的接收机可以正常工作。由图 2 知, 802.15.4n 接收机解调性能在存在 CMMB 干扰时比存在高斯白噪声情况下的要好 0.3 dB, 究其原因是 CMMB 信号为 OFDM 调制, 信号频域由 3076 个子载波组成, 在经过 802.15.4n 接收机匹配滤波后, OFDM 信号会由于其频域结构损失更多的能量, 导致其影响小于高斯白噪声。表 3 给出了 250 kbit/s 模式下, 不同信噪比/信干比时, CMMB 信号、AWGN 噪声单独通过匹配滤波器后的功率值, 这里的 802.15.4n 信号采用归一化功率。由此可见, 该物理层结构的确对 CMMB 干扰有更好的抑制效果。

当信道中存在窄带干扰时, 仿真结果如图 3 所示。其中, 窄带干扰的性能曲线分布比较集中。虽

然窄带干扰调制方式以及传输速率各不相同, 但是在 250 kbit/s 与 500 kbit/s 模式下, 干扰对 802.15.4n 影响几乎相同, 且相对于 CMMB 干扰时的性能恶化了约 10 dB。这说明 802.15.4n 接收机对窄带干扰信号较为敏感, 究其原因是在帧检测中所采用的延迟自相关算法^[10,11]虚警率较高。该算法主要是利用帧前导的周期性和噪声数据相关性较低的特点, 但是当信道中存在窄带干扰时, 由于窄带信号码率较低, 在使用 802.15.4n 的采样速率对窄带干扰信号进行上采样后, 导致每个相邻采样点之间相关性较大, 延迟相关计算后在非帧起始位置会出现峰值, 从而超过判决门限, 造成虚警。所以, 延迟自相关帧检测算法不是很适用于存在窄带干扰的情况。

4 基于两次延迟自相关的帧检测算法

针对窄带干扰, 一般在变换域内对其进行抑制^[12,13], 以消除其对有用信号的影响。文献[14]则采用滤波器组的方法检测并抑制干扰, 该方法复杂度较高, 且窄带干扰属于突发干扰, 为此会增加过多的功耗。文献[15]提出针对窄带干扰重新设计前导序列的方法, 但是 802.15.4n 属于低速率网, 前导过长会造成过多的资源浪费, 所以该方法同样不适用 802.15.4n。

本文提出了基于两次延迟自相关的改进算法, 如图 4 所示。帧检测分两路进行: 第 1 路与原来的帧检测算法相同, 接收信号延迟 d 后进行相关; 第 2 路, 接收信号仅延迟 $3/4d$ 后进行相关, 然后将两路相关器的差值作为输出, 其他与原算法相同。

表 3 IEEE802.15.4n 接收机匹配滤波后功率比较

信噪比/信干比(dB)	0	2	4	6	8
CMMB 干扰功率	0.1890	0.1193	0.0752	0.0475	0.0300
高斯白噪声功率	0.2502	0.1579	0.0996	0.0628	0.0397

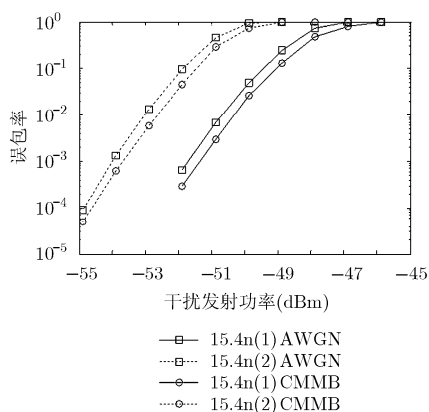


图 2 802.15.4n 在 CMMB 干扰影响下仿真结果

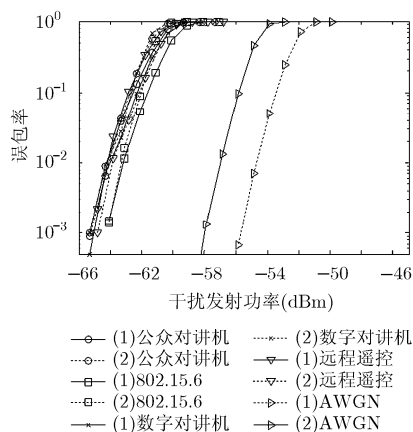


图 3 802.15.4n 在窄带干扰影响下仿真结果

改进算法利用了窄带信号码率低, 波形变化缓慢的特点。窄带信号延迟 d 的相关值与延迟 $3d/4$ 的相关值近似相等, 而 802.15.4n 只有延迟 d 时会有相

关峰值, 两路数据作差, 可以削弱窄带干扰的影响, 同时不影响 802.15.4n 的检测。改进算法的 C_k 值推导如式(11)所示。

$$\begin{aligned}
 C_k &= \left| \sum_{i=0}^{P-1} (r_{k+i} r_{k+i+d}^* - r_{k+i} r_{k+i+3d/4}^*) \right| \\
 &= \left| \sum_{i=0}^{P-1} [s(k+i) + u(k+i) + n][s(k+i+d) + u(k+i+d) + n_1]^* \right. \\
 &\quad \left. - [s(k+i) + u(k+i) + n][s(k+i+3d/4) + u(k+i+3d/4) + n_2]^* \right| \\
 &= \left| \sum_{i=0}^{P-1} s(k+i)s^*(k+i+d) + u(k+i)u^*(k+i+d) - u(k+i)u^*(k+i+3d/4) + n(n_1^* - n_2^*) + R_k \right| \quad (11)
 \end{aligned}$$

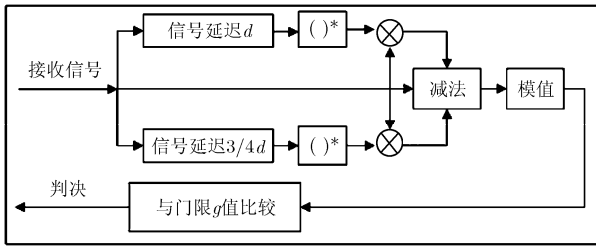


图4 改进的延迟自相关算法帧检测流程图

其中, 第1项为802.15.4n延迟 d 的相关值; 由于窄带信号波形变化缓慢, 所以第2项与第3项近似相等, 差值消去后减少了窄带的影响; 第4项为噪声, 该算法会使噪声功率增大, 但当信噪比较高时, 该项影响较小; 最后的余项 R_k 为信号之间互相关值, 例如信号与噪声、噪声与干扰、干扰与信号等互相关值, 因为信号之间具有较高的独立性, 所以互相关值也较小。

以数字对讲机干扰为例, 对改进帧检测算法进行仿真, 设置 $\text{SNR} = 15 \text{ dB}$ 。图5为帧检测虚警率的仿真结果。其中, 在 $\text{SIR} > 3 \text{ dB}$ 时改进算法的虚警

率降为零, 具有较高的帧检测成功率。该方法复杂度较低, 与常用的延迟自相关算法相比, 无需设计新的模块。同时, 根据第2路的相关值大小, 可以判断信道是否存在窄带干扰, 为干扰检测提供依据。

图6为采用新的帧检测算法后窄带干扰的仿真结果。在 250 kbit/s 模式下, 当窄带信号的发射功率低于 -55 dBm 时, 802.15.4n 的接收机可以正常工作; 在 500 kbit/s 模式下, 当窄带信号的发射功率低于 -57.5 dBm 时, 802.15.4n 的接收机可以正常工作, 窄带信号的影响与高斯白噪声近似相同。由此可见, 该帧检测算法能很好地抑制窄带干扰。

5 结束语

本文提出了与 802.15.4c 和 802.15.4g 相兼容的基于 OQPSK 调制的物理层结构; 并深入研究了其在医疗频段上的抗干扰性能。通过仿真发现该物理层结构对 CMMB 干扰有较好的抑制作用, 但对窄带干扰信号较为敏感。本文针对该问题提出了基于两次延迟自相关的帧检测算法, 通过仿真验证了该算法的确提高了帧检测成功概率。本文设计的物理层方案对窄带干扰、宽带干扰都具有较好抑制作用。

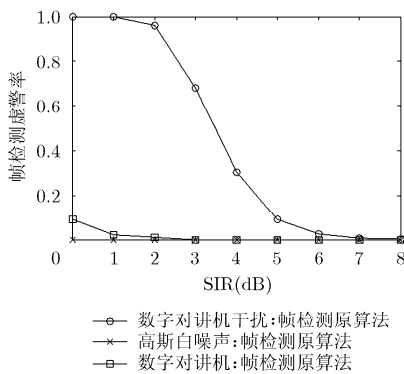


图5 802.15.4n(250 kbit/s)帧检测算法虚警率

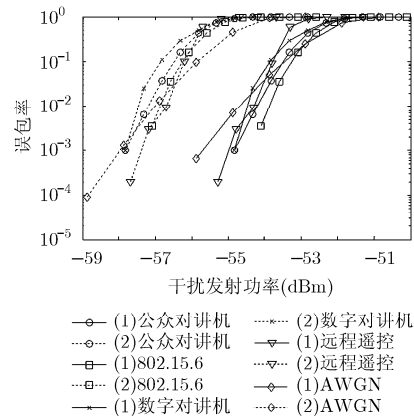


图6 802.15.4n 在窄带干扰影响下仿真结果

参 考 文 献

- [1] 802.15.4c-2009. IEEE standard for information technology — local and metropolitan area networks — specific requirements — part 15.4: amendment 2: alternative physical layer extension to support one or more of the Chinese 314–316 MHz, 430–434 MHz, and 779–787 MHz bands[S]. 2009.
 - [2] 802.15.4g-2012. IEEE standard for local and metropolitan area networks — part 15.4: low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs) amendment 3: physical layer (PHY) specifications for low-data-rate, wireless, smart metering utility networks[S]. 2012.
 - [3] Zou Wei-xia, Li Liang, Kang Feng-yuan, *et al.* DSSS PHY proposal for IEEE802.15.4N[R]. IEEE802.15-12-0584-06-004N, 2013.
 - [4] Dawkins M and Batra A. TG6 coexistence assurance document (NB PHY)[R]. IEEE P802.15-11-0112-00-0006, 2011.
 - [5] 中华人民共和国无线电频率划分规定[OL]. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n12843926/n13917072/15865839.html>, 2013.
 - [6] 微功率(短距离)无线电设备的技术要求[OL]. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11295310/n11297428/11637344.html>, 2005.
 - [7] IEEE 802.15.6-2012. Local and metropolitan area networks. part 15.6: wireless body area networks IEEE computer society[S]. 2012.
 - [8] GY/T 220.1-2006. 移动多媒体广播第 1 部分: 广播信道帧结构、信道编码和调制[S]. 2006.
GY/T 220.1-2006. China mobile multimedia broadcasting: part 1: broadcast channel frame structure, channel coding and modulation[S]. 2006.
 - [9] Li Zhuo, Zou Wei-xia, Li Bin, *et al.* Analysis on coexistence of ultra wideband with OFDM-based communication systems[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, 53(3): 823–830.
 - [10] 唐茂顺. 基于 MATLAB 的 IEEE 802.15.4j 物理层关键技术研究[D]. [硕士论文], 北京邮电大学, 2013.
Tang Mao-shun. The key technology research on physical layer of the IEEE 802.15.4j standard based on matlab[D]. [Master dissertation], Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
 - [11] Sanguinetti L, Morelli M and Poor H V. Frame detection and timing acquisition for OFDM transmissions with unknown interference[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(3): 1226–1235.
 - [12] Abdzadeh-Ziabari H and Shayesteh M G. Sufficient statistics, classification, and a novel approach for frame detection in OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(6): 2481–2495.
 - [13] Wang Ai-Hua, Liu Ru, Xue Bin, *et al.* A novel method of interference suppression in DSSS based on adaptive digital heterodyne notch filters[C]. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing Conference*, Shanghai, China, 2012: 1–4.
 - [14] Xu Zhi-meng, Nie Hong, Chen Zhi-zhang, *et al.* Blind narrowband interference mitigation using filter bank for energy detection based UWB receivers[C]. *IEEE Radio and Wireless Symposium Conference*, Austin, 2013: 139–141.
 - [15] Liu Si-cong, Yang Fang, Song Jian, *et al.* OFDM preamble design for synchronization under narrowband interference[C]. *Proceedings of the 17th Power Line Communications and Its Applications Symposium*, Johannesburg, 2013: 252–257.
- 邹卫霞: 女, 1972 年生, 副教授, 研究方向为通信新技术、信息理论.
- 康峰源: 男, 1990 年生, 硕士, 研究方向为短距离无线通信.
- 杜光龙: 男, 1988 年生, 博士, 研究方向为短距离无线通信.
- 张春青: 女, 1971 年生, 博士, 研究方向为生物医学信息的智能处理、射频识别.