

# 基于直接序列扩频的 WSN 通信信道均衡算法

张青春

(海军工程大学 电子工程学院 武汉 430033)

**摘要:** 对无线传感器网络(WSN)通信信道进行均衡设计,抑制无线传感器节点之间的码间干扰,改善通信质量。提出一种基于直接序列扩频的 WSN 通信信道均衡算法。进行了 WSN 的信道模型设计,为了降低信道输出的稳态误差,采用时间反转镜为匹配滤波方法,进行多径信道的码间干扰滤波,设计自相关匹配滤波器,通过直接序列扩频方法实现 WSN 通信的信道均衡。仿真结果表明,采用该算法进行 WSN 的通信信道均衡设计,发射信号沿各个路径到达接收机的信号分量得到准确分离,信号的多径分量得到无误码接收,通信信道均衡效果较好,通信误比特率低于传统方法,改善了 WSN 通信质量,展示了较好的应用价值。

**关键词:** 直接序列扩频;无线传感器网络;通信;信道均衡

**中图分类号:** TN911 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Research on WSN communication channel equalization algorithm based on direct sequence spread spectrum

Zhang Qingchun

(College of electronic engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Wireless sensor network (WSN) communication channel is designed to balance the inter symbol interference between wireless sensor nodes, and improve the quality of communication. A WSN communication channel equalization algorithm based on direct sequence spread spectrum is proposed. The WSN channel model is designed. In order to reduce the steady-state error of the output of the channel, the time reversal mirror is used as the matched filtering method, and the inter symbol interference filter is designed. The channel equalization of WSN communication is realized by the direct sequence spread spectrum method. Simulation results show that using the algorithm for WSN communication channel equalization design and emission signals along each path arrival signal components of the receiver to get accurate separation, signal multipath components are no bit errors at the receiver, communication channel equalization effect better and reduce the communication bit error rate, to improve the quality of communication of WSN, shows a good application value.

**Keywords:** direct sequence spread spectrum; wireless sensor networks; communication; channel equalization

## 1 引言

短距离无线通信广泛应用在智能自导系统的设计和短距离高精度目标检测和识别等领域,无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)作为一种新型的无线通信网络,在军事、环境监测、家用、商业和远程医疗等领域有着广泛的应用前景。WSN 多以自组织网络的形式存在物无线传输通信信道模型中,应用在恶劣环境或大规模网络条件下,WSN 发展到今天,面向短距离通信技术 WSN 自组织网络面向智能化方向发展。通过对自组织网络动态融合,提高复杂应用环境下的无线传感网络的稳定性和通信

能力。在无线传感器网络通信中,通信信道通常受到传感器的相邻节点的码间干扰,导致通信信道失衡,需要进行信道均衡设计,提高 WSN 无线通信的质量,降低误码率,相关的算法研究和系统设计方法受到广大专家的重视。

在 WSN 的通信信道均衡算法设计中,传统方法多重采用基于自适应波特间隔均衡的信道均衡算法、基于传感器主从式脉冲感知的信道均衡算法、基于多径时延扩展及码间干扰抑制的 WSN 信道均衡算法等<sup>[1-3]</sup>。在 WSN 数据通信中,影响信道均衡的因素有很多,例如:通信距离、发射点与接收阵的变化等因素,上述方法不能有效满足 WSN 通信过程中的码间干扰抑制和信道均衡的要求,导致通信的

误比特率较高。对此,相关文献进行了算法改进设计。文献[4]提出一种基于 CMA 调制的无线通信信道均衡算法,采用小波基函数对通信信道的输入信号进行经验模态分解,提高了通信信号间的耦合性,改善了通信性能,但是该算法计算开销较大,通信时延较长,实时性不好。文献[5]提出一种基于非线性失真单周控制 WSN 通信信道均衡算法,通过最优分集发射和最优分集接收,降低误码率,但该算法由于信道多径扩展导致码间干扰,信道均衡效果不好。

针对上述问题,本文提出一种基于直接序列扩频的 WSN 通信信道均衡算法,首先进行了 WSN 的信道模型设计,采用时间反转镜自相关匹配滤波方法进行码间干扰抑制,在此基础上,通过直接序列扩频方法实现 WSN 通信的信道均衡,最后进行仿真实验,验证了本文算法在改善 WSN 通信质量,降低通信误码率方面的优越性能,得出有效性结论。

## 2 WSN 通信的多径信道模型及信道特性测量

### 2.1 WSN 通信的多径信道模型描述

首先构建 WSN 通信信道模型,进行通信信号的输入输出特性分析。WSN 通信信道是一个扩展信道,采用多输入多输出的 MIMO 多径信道传播模式,WSN 通信信道存在两个方面的主要特征:一是 WSN 通信信道为带宽受限信道,WSN 通信信道对较高频率的信号具有较大的吸收系数,信道的特性随时间而改变;二是 WSN 通信信道受距离的约束,具有多径传播及空变特性。因此,通过研究 WSN 通信信道的特性,并且进行实际的信道测量,研究信道对传输信号造成的影响,采用直接序列扩频方法进行信道均衡设计[6]。在 WSN 通信中,信道的多径结构取决于传感器网络节点在接收终端的传播损失,假设无线传感器节点由  $N = 2P$  个阵元组成,在短距离无线传感器网络通信系统中,不同时延下的混叠谱模糊度函数对应着该时延下不同尺度处宽带处理器的输出,构成波特间隔均衡的阵列,WSN 通信节点阵元分布的径向距离为  $d$ ,WSN 通信系统的信号接收模型为:

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^I s_i(t) e^{j\phi_{m,i}} + n_m(t), \quad -p+1 \leq m \leq p \quad (1)$$

式中:  $s_i(t)$  为传感器节点多径输入分量中第  $i$  个相位偏转信息,  $x_m(t)$  为传感器阵元  $m$  接收的多普勒频移。给出 WSN 通信的信道冲击响应表达式为:

$$h(t) = \sum_i a_i(t) e^{j\theta_i(t)} \delta(t - iT_S) \quad (2)$$

式中:  $\theta_i(t)$  表示 WSN 通信信源在信道中的扫频带宽,线性调频时段长度为  $T$ ,则有传感器节点阵列流行向量中的第  $i$  个被动时间反转镜的冲击响应可以表示为:

$$\mathbf{x}(t) = [x_{-p+1}(t), x_{-p+2}(t), \dots, x_p(t)]_{N \times 1}^T \quad (3)$$

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_I(t)]_{I \times 1}^T \quad (4)$$

通信传输信号两次经过互易的 WSN 通信信道进行自适应扩展,增加了通信的等待时间,降低了通信速率,此时

WSN 通信信道模型表达为:

$$c(\tau, t) = \sum_n a_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau} \delta(t - \tau_n(t)) \quad (5)$$

式中:  $a_n(t)$  是第  $n$  条路径上重组多径信号的传播损失,  $\tau_n(t)$  为第  $n$  条多径通信信道的传输时延。对于某一实际的 WSN 通信环境,当已知传感器网络环境信号传输衰减梯度、发射机和接收机各自多径特征,计算出接收机处的本征声线,认为 WSN 通信多径信道有  $P$  条路径,可得到 WSN 通信多径信道的均衡脉冲响应[7]。在 WSN 通信中,多径信道受到传输阵元的码间干扰,通过信道均衡,利用多径信号来实现时间压缩和空间聚焦,提高通信信号的幅度响应和频率响应,WSN 通信的信道均衡特性如图 1 所示。

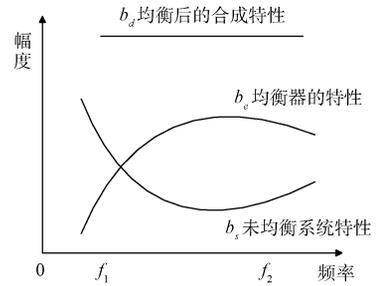


图 1 WSN 通信信道均衡特性

### 2.2 通信信道测量及码间干扰抑制算法

在上述构建的 WSN 通信信道模型的基础上,对 WSN 通信多径信道进行特征分析和测量,WSN 通信信道由于路径长度的差异,通信信号在不同的路径中传播时到达某点的能量和时间也不同,信道的多径效应必然引起信号的码间干扰及衰落。在 WSN 通信领域,码间干扰是数据传输的重要障碍,需要进行 WSN 通信的码间干扰抑制,当 WSN 节点发送一个极窄的脉冲信号,发射信号沿各个路径到达接收机的载频分量为:

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{a}(k)\mathbf{h}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{n}(k)$  为噪声分量,  $\mathbf{h}(k)$  为第  $i$  条路径的时延,  $\mathbf{a}(k)$  为不同时延的脉冲载波信号。对 WSN 通信,由于信道模型中空变、时变等因素的存在,接收信号中的各个时延脉冲通过被动时镜反转进行信道增益补偿,得到接收脉冲中的时延扩展函数表达式为:

$$J_{\text{MDDMA}} = \rho \cdot E[(|z(k)|^2 - R_{\text{MDDMA}}(k))^2] \quad (7)$$

式中:  $\rho$  为窄脉冲的传播衰减系数,  $R_{\text{MDDMA}}(k)$  为脉冲展宽,  $|z(k)|$  为码间干扰的扩展频谱,为了降低信道输出的稳态误差,采用时间反转镜为匹配滤波方法[8],进行多径信道的码间干扰滤波,设计自相关匹配滤波器,滤波结构如图 2 所示。

在图 2 所示的自相关匹配滤波器中,每个接收阵元单独进行自相关匹配处理,采用自相关器和一个时间间隔为  $T$  的抽头均衡器进行级联重组,输入误差生成函数,各多径信号实现了同时刻同相位叠加,得到使接收到的探测信号

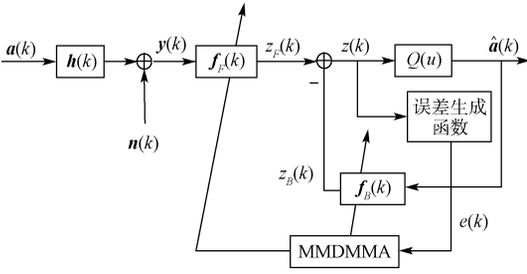


图 2 自相关匹配滤波器

与输入信号的迭代公式为:

$$f(k+1) = f(k) - \mu \cdot \rho \cdot e_{\text{MDDMMA}}(k) \mathbf{y}^*(k) \quad (8)$$

式中:

$$e_{\text{MDDMMA}}(k) = z(k) [ |z(k)|^2 - R_{\text{MDDMMA}}(k) ] \quad (9)$$

为使接收到的探测信号较完整的涵盖频带内  $p(t)$  的频谱,对输入的信号分量与噪声进行卷积处理,得:

$$p_n(t) = p(t) \cdot h_i(t) + n_{p_i}(t) \quad (10)$$

式中:  $h_i(t)$  为  $p(t)$  传输时发射阵元与接收传感器阵列中第  $i$  个节点间的信道冲激响应函数,通过加入固定步长因子执行干扰抑制,把输入的线性调频信号分布在信道冲激响应为  $R_{\text{MDDMMA}_i}$  ( $i = 1, \dots, N$ ) 的星座图圆中,实现码间干扰抑制。

### 3 直接序列扩频及通信信道均衡实现

在上述进行信道模型特性分析和码间干扰抑制处理的基础上,进行 WSN 通信信道均衡设计,改善通信质量,本文提出一种基于直接序列扩频的 WSN 通信信道均衡算法,扩频均衡是利用信息传输带宽远大于信息自身带宽,进行信道自适应均衡处理的信道均衡基础,利用这一原理<sup>[9]</sup>,进行 WSN 信道均衡。改进算法实现过程描述如下,在发射端,调制信号在发射到信道之前,载频信号受伪随机码的控制,接收端被扩展的输入信号为:

$$x(t) = A s(t) r_i + n(t) \theta_i \quad (11)$$

式中:  $r_i$ 、 $\theta_i$  分别为信号发送时刻的码元速率和随机码的切谱宽度。此时,多径信号到达接收端的谱密度  $R_{\text{MDDMMA}}(k)$  满足:

$$\text{abs}[ |z(k)|^2 - R_{\text{MDDMMA}}(k) ] = \min_i \text{abs}[ |z(k)|^2 - R_{\text{MDDMMA}_i} ] \quad (12)$$

采用扩频序列去调制载波,建立估计误差  $e(n)$  和步长因子  $\mu(n)$  之间的线性相关关系,接收到的扩频信号经高放和混频后,WSN 中频调制信号的频率响应表示:

$$C_T(f) = \sum_{k=-K}^K c_k e^{-j2\pi f k T'} \quad (13)$$

式中:  $c_k$  为均衡器抽头系数,  $N$  为恢复出所传输的信息的数据采样长度,  $P$  噪声频谱的信道畸变特征,另外,  $T' = MT/N$ 。在相关解扩器的作用下,假设码元速率为  $R_a$ ,码元宽度为  $T_a$ ,  $T_a = 1/R_a$ 。对于干扰信号和噪声而言,通

过直接序列扩频,自适应滤波后的信道均衡控制方程描述为:

$$\text{sgn}(z_R^2(k) - R_{\text{MDDMMA}_R}) = \text{sgn}(z_R^2(k) - \hat{e}_R^2(k)) \quad (14)$$

$$\text{sgn}(z_I^2(k) - R_{\text{MDDMMA}_I}) = \text{sgn}(z_I^2(k) - \hat{e}_I^2(k)) \quad (15)$$

式中:  $\hat{e}_R^2(k)$  信号通频带内的调制误差,  $z_R^2(k)$  为输入信噪比和信干比的比率,  $z_I^2(k)$  为载频,  $\hat{e}_I^2(k)$  为通频带内的干扰误差,设计多径时延大于一个伪随机码的切比雪夫谱相关器,则通过相关处理后,消除多径干扰的影响,通过主从式脉冲均衡技术实现对信道的有效估计,得到的估计的信息特征结果,调整通信信息传输中接收阵元的多径分量,通过探测信号对无线传输信道进行估计。自适应均衡器的输出结果的自适应调节通过控制均衡器来划分的,基于统计平均的观点(集平均)通过递推得到修正后的权向量  $\mathbf{W}_N$ ,在此,需要知道输入数据  $x_n$  和期望响应  $d_n$  的二阶统计特性,对扩频过程中的伪随机码速率进行模糊控制迭代,迭代系统函数为:

$$d(t) = a(t)c(t) = \sum_{n=0}^{\infty} d_n g_c(t - nT_c) \quad (16)$$

式中:

$$d_n = \begin{cases} +1, & a_n = c_n \\ -1, & a_n \neq c_n \end{cases} \quad (n-1)T_c \leq t \leq nT_c \quad (17)$$

用此扩展后的序列去调制载波,将信号搬移到调制载波的载频上,通过上述处理,采用直接序列扩频,进行 WSN 的信道均衡设计,得到信道均衡的判决误差函数为:

$$\hat{e}(k) = z_R(k) ( |z_R(k)|^2 - \hat{s}_R^2(k) ) + j z_I(k) ( |z_I(k)|^2 - \hat{s}_I^2(k) ) \quad (18)$$

式中:  $\text{sgn}(\cdot)$  表示符号函数,  $\hat{s}_R(k)$  和  $\hat{s}_I(k)$  为调制后得到的信号输出的归一化幅度和相对时延。WSN 接收端天线上感应的信号经高放处理,用本地的伪随机序列  $c'(t)$  与接收到的信号相乘,并引入相位信息,得到扩频信号的解调输出为:

$$J_{\text{MDDMMA}_R} = c'(t) \cdot E[(z_R^2(k) - R_{\text{MDDMMA}_R}(k))^2] \cdot \rho(k) + [1 - \rho(k)] \cdot E[(z_R^2(k) - R_R)^2] \quad (19)$$

化简得:

$$J_{\text{MDDMMA}} = J_{\text{MDDMMA}_R} + J_{\text{MDDMMA}_I} \quad (20)$$

本地产生的伪随机序列  $c'(t)$  与发端产生的伪随机序列  $c(t)$  同步时,有  $c(t) = c'(t)$ ,采用递推最小二乘(RLS)设计自适应均衡器,进行单模判决,实现 WSN 信道的盲均衡,将干扰信号功率分散到一个很宽的频带上,得到信道调制误差为:

$$e(k) = z(k) [ |z(k)|^2 - R ] \quad (21)$$

采用 Lyapunove 稳定性原理<sup>[10]</sup>,在迭代步长固定下,进行稳定性和收敛性分析,得到 WSN 通信信道均衡的收敛迭代函数为:

$$\begin{aligned} f_F(k+1) &= f_F(k) - \mu \cdot \nabla_{f_F(k)} J_{\text{MDDMMA}} = \\ &= f_F(k) - \mu \cdot \nabla_{f_F(k)} (J_{\text{MDDMMA}_R} + J_{\text{MDDMMA}_I}) = \\ &= f_F(k) - \mu_F [ \rho(k) e_{\text{MDDMMA}}(k) + (1 - \rho(k)) e(k) ] \mathbf{y}^*(k) = \end{aligned}$$

$$f_F(k) - \mu_F[\rho(k)(e_{\text{MDMMA}_R}(k) + je_{\text{MDMMA}_I}(k)) + (1 - \rho(k))(e_R(k) + je_I(k))]y^*(k) \quad (22)$$

根据一致性估计原理,得到采用直接序列扩频处理后的 WSN 通信信道的稳态误差估计收敛到零,通过分析可见,采用本文均衡算法,保证 WSN 通信和信道调制的收敛性,有效去除码间干扰,信道均衡性较好,降低了通信误码率。

### 4 仿真实验与结果分析

为了测试本文算法在实现 WSN 通信信道均衡,降低 WSN 通信误码率,改善通信质量等方面的应用性能,进行仿真实验。仿真实验中,无线传感器节点分布在  $2000\text{ m} \times 2000\text{ m}$  的均匀阵列区域,假设无线传感器网络的通信节点的最大辐射距离  $R_{\text{max}}$  为  $100\text{ m}$ 。给出连续 5 个传感器网络监测点的接收数据,进行多径信道模型偶见,WSN 通信信道中,多径扩展时间为  $172.4\text{ ms}$ ,传感器节点探测信号采用频带为  $3\sim 12\text{ kHz}$ 、时宽为  $2\text{ ms}$  的线性调频信号进行数据通信仿真,码间干扰的强度为  $\text{SNR}=0\sim 150\text{ dB}$ ,在上述仿真环境和参数设定的基础上,进行 WSN 通信信道均衡仿真实验,首先分析传感器节点发射信号和接收信号的时频域特性,发射信号由传感器网络通信节点的发射换能器产生,发射频率从  $7.5\sim 40\text{ kHz}$ ,脉冲宽度  $1\text{ ms}$ ,发射换能器为串联谐振方式工作,接收信号经过测量放大器放大、滤波后,用示波器显示并保存,得到发射同步信号和接收信号的时域波形如图 3 所示。

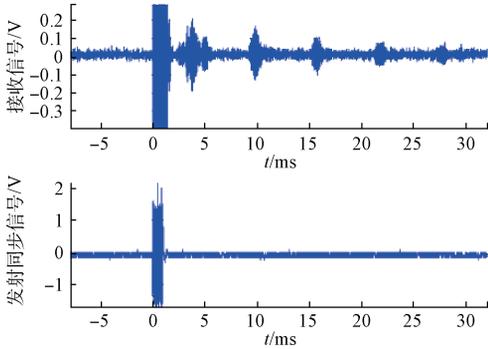


图 3 WSN 通信信号时域波形

上述时域波形为各频率点的典型接收信号,从传感器发射原理样机引出的发射同步信号,分析时域波形可得,该通信系统采样的发射信号最大  $40\text{ kHz}$ ,采样频率是发射信号的  $12.5$  倍以上,满足采样率要求。以此为测试样本,进行 WSN 通信信道均衡性能测试研究,为了测试信道均衡性能,采用通信信号的星座图进行分析参考指标,得到输入通信信号的星座图如图 4 所示,从图可见,原始的输入信号受到多径信道码间干扰的作用,导致信道的均衡性能不好,信号纠缠,辨识度不高。

采用本文方法和文献[4]给出的 CMA 调制方法,进行

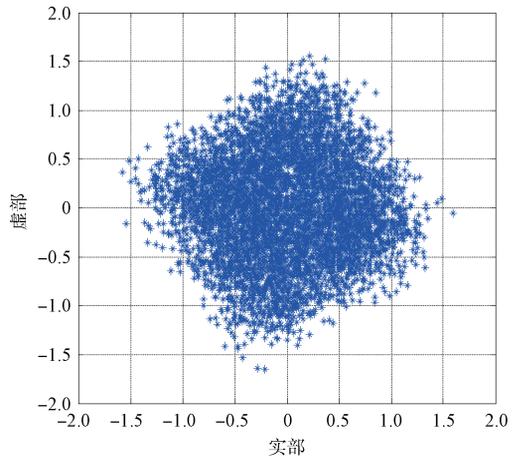
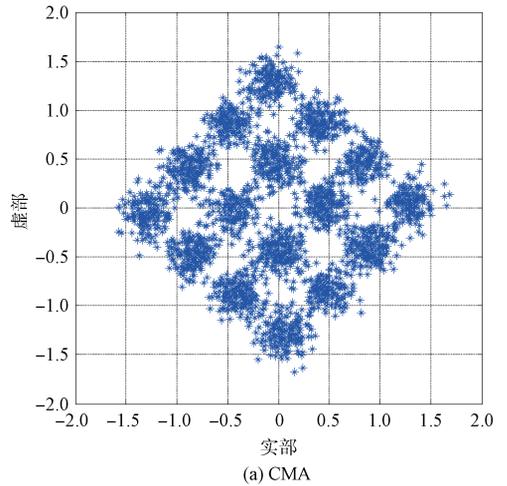
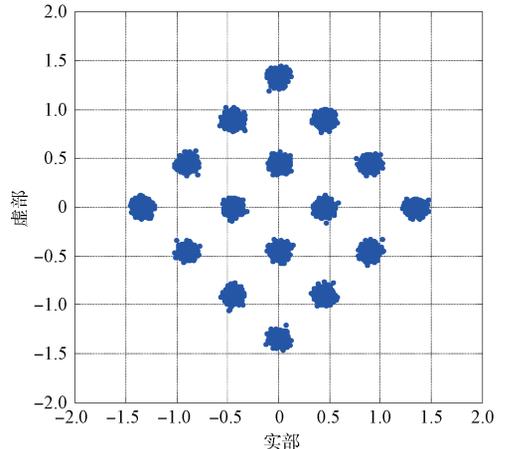


图 4 输入通信信道的发射信号星座图

码间干扰抑制和信号均衡处理,得到输出的通信信号的星座图如图 5 所示,从图中可见,采用本文算法,发射信号沿各个路径到达接收机的信号得到合理的分离,信号的多径分量得到准确接收,展示了较好的信道均衡性能。



(a) CMA



(b) 本文方法

图 5 两种算法下信道均衡输出星座图

为了定量分析本文的信道均衡算法在改善 WSN 通信质量中的性能,在动态的信噪比范围内,采用本文算法和传统算法,以通信误比特率(bit error rate, BER)为定量分析指标,验证通信性能,采用 10 000 次 Monte Carlo 实验,得到仿真结果如图 6 所示,从图中可见,采用本文算法,BER 较低,提高了通信质量。

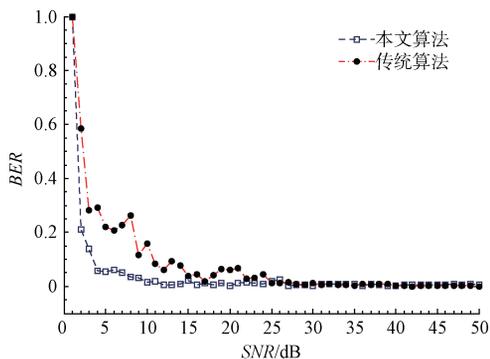


图 8 误比特率性能对比

## 5 结 论

在无线传感器网络通信中,通信信道受到码间干扰,导致通信信道失衡,需要进行信道均衡设计,提高 WSN 无线通信的质量,降低误码率。本文提出一种基于直接序列扩频的 WSN 通信信道均衡算法。研究表明,采用该算法进行 WSN 的通信信道均衡设计,发射信号沿各个路径到达接收机的信号得到合理的分离,信号的多径分量得到准确接收,通信信道均衡效果较好,降低了通信误比特率,改善了 WSN 通信质量。

## 参考文献

[1] 何信旺,芮赟,王宗杰,等. 滤波器组 UMTS 系统的信

道估计研究[J]. 计算机技术与发展,2015(9):57-60.

- [2] 陆兴华,谢辉迪,许剑锐. 基于近场通讯和物联网的饭堂自动计价系统[J]. 智能计算机与应用,2015,5(6):18-21.
- [3] PHAKPHISUT W, SUPNITHI P, PUTTARAK N. EXIT chart analysis of nonbinary protograph LDPC codes for partial response channels [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 1-4.
- [4] 邸珩焯. 基于多径码间干扰滤波的短波通信优化[J]. 物联网技术,2015,5(10):47-48,52.
- [5] 刘艳峰,魏兵,任新成. 近场通信天线场分布特性仿真[J]. 电子测量技术,2015,38(8):132-134.
- [6] 何婷婷,邵晖,陈柯. 有源 RFID—“Dash7”构建智能传感网络[J]. 国外电子测量技术,2014,33(11):1-5.
- [7] 刘茂旭,何恰刚,邓芳明,等. 融合 RFID 的无线湿度传感器节点设计研究[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(8):1171-1178.
- [8] 郭静波,谭博,蔡雄. 基于反相双峰指数模型的微弱瞬态极低频信号的估计与检测[J]. 仪器仪表学报,2015,36(8):1682-1691.
- [9] 陈震华,许肖梅,陈友淦,等. 浅海水声信道中原模图 LDPC 码的设计及性能分析[J]. 电子与信息学报,2016,38(1):153-159.
- [10] 陈友淦,许肖梅,张兰,等. 浅海水声信道模型差异对纠错码性能分析的影响[J]. 兵工学报,2013,34(11):1404-1411.

## 作者简介

张青春 1977 年出生,硕士,讲师,研究方向为无线通信,主要从事无线通信网络关键技术及应用的研究和教学。