

基于非平稳时频分析的无线网络信道均衡算法^①

朱亚东¹, 严锡君²

¹(江苏联合职业技术学院 信息中心, 南京 211135)

²(河海大学 计算机与信息学院, 南京 210098)

摘要: 在无线网络数据通信中, 由于阵元码间干扰导致信道具有非平稳特性, 产生信道失衡效应, 需要进行信道均衡设计, 提高无线网络的数据传输性能. 传统方法采用 Hilbert 变换扩频方法进行通信信道均衡, 通过 Hilbert 变换使离散数据解析化, 由于信道多径扩展导致码间干扰, 为了提高信道均衡效果, 提出一种基于非平稳时频分析的无线网络信道均衡算法. 构建无线网络数据传输的空间多径信道模型, 采用时频分析方法进行通信信号码间干扰抑制处理, 采用提取的时频特征对通信信道进行正交频分复用分解, 采用时频特征分析方法, 对相位偏移进行空间码元重组, 去掉路径相移偏量, 实现信道均衡. 仿真结果表明, 采用该算法具有较好的信道均衡性能, 能有效抑制通信信道的码间干扰, 降低无线网络数据通信的误比特率, 改善通信质量.

关键词: 无线网络; 通信; 信道均衡; 时频分析

Wireless Network Channel Equalization Algorithm Based on Non-Stationary Time-Frequency Analysis

ZHU Ya-Dong¹, YAN Xi-Jun²

¹(Information Center, Jiangsu Union Technical Institute, Nanjing 211135, China)

²(Institute of Computer and Information Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In the wireless data communication network, the array element inter-symbol interference cause the non-stationary characteristics of channels and it also has a channel imbalance effect, so a channel equalization design is required to improve the performance of data transmission of wireless network. Traditional methods use Hilbert transform spread-spectrum for communication channel equalization and discrete data analysis. Due to the expansion of multipath channel which causes inter-symbol interference, and in order to improve the performance of channel equalization, a wireless network channel equalization algorithm based on non-stationary time-frequency analysis is proposed. This algorithm proposes a space multipath channel model for wireless network data transmission and uses time-frequency analysis method to suppress the inter-symbol interference of signal communication. It also uses this extracted time-frequency characteristics for orthogonal frequency division multiplexing decomposition of communication channel. Through time-frequency characteristic analysis, the phase deviation of spatial symbol is reorganized and the path deviator of phase shift is removed to realize channel equalization. Simulation results show that this proposed algorithm has a good performance for channel equalization. It can effectively suppress the inter-symbol interference of communication channel and reduce the bit error rate of the wireless data communication network to improve the quality of the communication.

Key words: wireless network; communication; channel equalization; time-frequency analysis

随着网络技术飞跃发展, 无线网络被广泛应用在民用和军用等领域, 无线网络是一种采用无线通信技术实现的网络. 通过 4G, 3G 或 GPRS 以及无线局域网

(WiFi)等方式, 实现移动数据传输和数据通信, 在无线网络通信系统中, 用户通过建立远距离无线连接实现全球语音和数据传输, 在任何一个角落都可以实现

① 收稿时间:2016-06-06;收到修改稿时间:2016-08-29 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005663]

数据的共享和使用。无线网络通信作为二十一世纪公认的最重要技术之一,网络通信的稳定性和抗干扰性是世界范围的普遍关注的问题,成为一个新兴的研究方向。在无线网络数据通信中,由于阵元码间干扰导致信道具有非平稳特性,产生信道失衡效应,需要进行信道均衡设计,提高无线网络的数据传输性能。研究无线网络通信系统的信道均衡算法具有重要意义,相关的算法研究受到人们的重视^[1,2]。

在无线网络数据通信中,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,随着应用需求的不断扩展,保证无线网络通信稳定的传感设备部署的相对间隔较小,通信数值空间上及时间上存在相对性,无线网络的信道均衡是保证无线网络通信稳定的决定性因素。传统的信道均衡算法主要有基于经验模态分解的信道均衡算法、信道特征尺度调制均衡算法、固有模态函数分量分解算法和小波调制均衡算法等,但是传统算法在进行无线网络数据通信的信道均衡设计中,通常会产码间干扰,特别是在信噪比较低的情况下,难以时间有效的网络通信,质量较差。对此,相关文献进行了算法改进设计,其中,文献[3]提出一种基于非线性失真单周控制无线网络通信信道均衡算法,通过最优分集发射和最优分集接收,降低误码率,然而算法存在的计算开销较大,设计复杂等问题。文献[4]提出一种载波调制失真抑制的无线网络通信信道均衡算法,调制解调信号经过非线性失真抑制,成为解决可见无线网络数据通信相关技术难题,但是该算法对误码率的改善性能不好,系统稳定性不高。文献[5]采用 Hilbert 变换扩频方法进行通信信道均衡,通过 Hilbert 变换使离散数据解析化,由于信道多径扩展导致码间干扰,信道均衡效果不好^[6-10]。针对上述问题,为了克服传统方法存在的缺陷,本文提出一种基于非平稳时频分析的无线网络信道均衡算法。首先构建了无线网络数据通信系统的信道模型,得到无线网络数据传输的空间多径信道模型,采用时频分析方法进行通信信号码间干扰抑制处理,最后采用提取的时频特征对通信信道进行正交频分复用分解,实现信道均衡改进,仿真实验进行了性能测试与验证,展示了本文算法的优越性能,降低了阵元码间干扰导致的信道非平稳特性,提高了网络通信的稳定性和抗干扰性,从而有效提高了无线网络的数据传输性能。

1 无线网络数据通信系统及信道模型

1.1 无线网络数据通信系统描述

首先给出无线网络数据通信系统的系统模型设计,无线网络数据通信系统的多径信道模型采用 BPSK 调制码元的分布设计,在移动通信领域^[11,12],对无线网络数据通信多径信道的时变多径特性进行数学描述,以离散多径情况为例,假设 $W = \{u, w_1, w_2, \dots, w_k\}$ 表示采用相同的调制方法在同一时间内进行无线通信数据传输的发送基站时间序列,构造无线数据传输网络通信图 $G(V, r)$, ($r \leq \delta \cdot r_{\max}$, $\delta \in (0, 1)$, $r_{\max} = (P(N_0\beta)^{-1})^{1/\alpha}$)。无线网络数据通信信道的各条路径的相位偏移失真表示为:

$$R_w(l) = E[w(k)w^H(k+l)] \\ = \int_{-\pi}^{\pi} \left[\delta_l \cdot \frac{1}{\Delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\theta-\theta_0)^2}{2\Delta^2}} \right] a(\theta) a^H(\theta) d\theta \quad (1)$$

式中, θ_0 和 Δ 两个参数分别表示无线网络数据通信串并转换为并行数据的线性调频特征,无线网络数据通信信道的时变多径特性进行数学描述,接收信号为:

$$x(t) = \text{Re}\{a_n(t)e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} s_l(t - \tau_n(t))e^{-j2\pi f_c t}\} \quad (2)$$

无线网络数据通信信道中各路径到达接收端的时间不是固定不变的,此时,采用分段拟合的方式补偿非线性失真,通信道时变脉冲响应可描述为

$$c(\tau, t) = \sum_n a_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} \delta(t - \tau_n(t)) \quad (3)$$

其中, $a_n(t)$ 是第 n 条路径上接收信号的衰减因子,设本征声线有 P 条,无线网络数据通信信道有 P 条路径,可得到无线网络数据通信信道的传播衰减系数为:

$$h(t) = \sum_{i=1}^P a_i p(t - \tau_i) \quad (4)$$

其中, a_i 和 τ_i 分别是对应于不同路径的时间延迟和频率相位差,通过对无线网络数据通信系统的接收信号作拷贝相关,采用射线模型对无线网络数据通信信道中的电磁波信号传播损失作描述为:

$$TL = n \cdot 10 \lg r + \alpha r \quad (5)$$

通过上述系统设计可见,在无线网络数据通信系统中,存在码间干扰,信道均衡算法就行用来克服由于多径而产生的码间干扰。

1.2 信道模型设计

无线网络数据通信信道的多普勒效应会产生强烈的发生码间干扰和相位失衡,导致无线网络数据通信质量降低。本文提出一种基于非平稳时频分析的无线

网络信道均衡算法, 无线网络数据通信系统的信道均衡按照均衡作用可分为时频特征均衡、相位空间均衡或时间延迟均衡, 由此设计无线网络数据通信系统信道模型如图 1 所示。

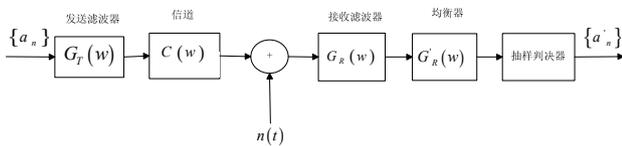


图 1 无线网络数据通信系统信道模型

图 1 中, 接收到的信息信号 $S_i(t)$ 经过该预处理器 (与 $P_i(-t)$ 作卷积运算), 通信信道相干时间长度内, 可简化为相干多途信道, 给出无线网络数据通信的信道冲击响应表达式为:

$$h(t) = \sum_i a_i(t) e^{j\theta_i(t)} \delta(t - iT_S) \quad (5)$$

上式中, $\theta_i(t)$ 表示无线网络数据通信信源数据在多径信道中的相位偏移, 采用时频特征分析方法, 对相位偏移进行空间码元重组, 去掉路径相移偏量, 结合式(4)和式(5), 得到去掉路径相移偏量后的无线网络数据通信的信道冲击响应优化表达式为:

$$h(t) = \sum_i a_i(t) \delta(t - iT_S) \quad (6)$$

上式中, $\tau_i(t)$ 表示每条多径的多普勒频移, 根据上述关系, 调整通信信息传输中接收阵元的多径分量, 以空间信道利用率高的 BPSK 作为调制方式, 得到无线网络数据传输的频信号的上、下包络线的平均值为:

$$s(t) = \cos[2\pi f_0 t + \pi\beta t^2 + \psi_0] \quad (7)$$

其中, f_0 与 ψ_0 分别为起始频率与调频信号的初始相位. 由此得到无线网络数据传输的空间多径信道模型。

2 无线网络信道均衡算法改进实现

2.1 无线网络通信信号特征提取

在上述构建的无线网络数据传输的空间多径信道模型基础上, 本文提出一种基于非平稳时频分析的无线网络信道均衡算法. 采用时频分析方法进行通信信号码间干扰抑制处理, 对于多径信道无线网络数据通信时间序列扩频的过程可以表达为:

$$p_{ri}(t) = p(t) * h_i(t) + n_{pi}(t) \quad (8)$$

根据固有模态函数的两个条件来判断是否实现了码间干扰抑制, 针对上式进行多普勒分解, 判断 $h_{i1} = h_i - m_{i1}$ 是否满足 IMF 的条件, 进行信道模型设

计阵元间的通信信号时频特征提取结果为:

$$S_{ri}(t) = S(t) * h_i(t) + n_{si}(t) \quad (9)$$

式中, $h_i(t)$ 为通信信号 $S(t)$ 的瞬时频率, 去除有意义的振幅波动, 得到振幅恒定的相关输出:

$$\begin{aligned} r_i'(t) &= S_{ri}(t) * p_{ri}(-t) \\ &= S(t) * p(-t) * h_i(t) * h_i(-t) + n_{li}(t) \end{aligned} \quad (10)$$

式中:

$$\begin{aligned} n_{li}(t) &= S(t) * h_i(t) * n_{pi}(-t) \\ &+ n_{si}(t) * p(-t) * h_i(-t) \\ &+ n_{si}(t) * n_{pi}(-t) \end{aligned} \quad (11)$$

通过计算连续两个筛分结果, 进行时间反转, 滤除噪声干扰项, 得到信道模型累加输出为:

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_{i=1}^M r_i'(t) * p(t) \\ &= S(t) * p(t) * p(-t) * \sum_{i=1}^M h_i(t) * h_i(-t) + \sum_{i=1}^M n_i(t) \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $n_i(t)$ 为无线网络数据通信信道之间的码间干扰, 表示为: $n_i(t) = n_{li}(t) * p(t)$. 通过上述设计, 得到无线网络数据通信传输的流程如图 2 所示。

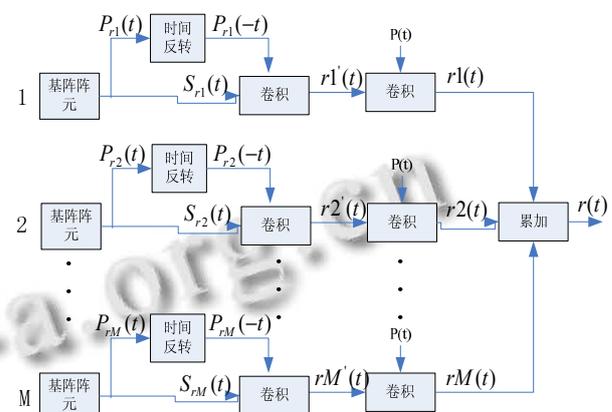


图 2 无线网络数据通信传输的流程

根据上述信号特征提取结构, 进行时频特征的信号分析, 为进行信道均衡算法设计奠定了基础。

2.2 无线网络信道均衡实现

在无线网络通信中, 由于阵元码间干扰导致信道具有非平稳特性, 产生信道失衡效应, 本文采用提取的时频特征对通信信道进行正交频分复用分解, 实现信道均衡改进, 基于正交频分复用技术抗多径干扰, 得到通信信道中线性调频信号幅频特性表示为:

$$|s(f)| = A \sqrt{\frac{1}{2k} \{ [c(v_1) + c(v_2)]^2 + [s(v_1) + s(v_2)]^2 \}} \quad (13)$$

上式中, A 表示无线网络数据通信信息源的辐射增益, $c(v_1)$ 表示滤波器增益, $c(v_2)$ 表示无线网络数据通信信道的聚能增益, 首先假设通信网络中各阵元 $h_i(t) * h_i(-t)$ 的旁瓣是非相干叠加的, 引入限幅噪声, 即 \mathcal{R} 最优, 选择加权系数:

$$\{b'_1, b'_2, \dots, b'_V\} = \arg \min_{\{b_1, b_2, \dots, b_V\}} \max_{\sum_{v=1}^V b_v \cdot x_v < 0, 1 \leq n \leq N} |\sum_{v=1}^V b_v \cdot x_v|^2 \quad (14)$$

将经过 QAM 调制后的通信信道分割为 V 个互不重叠的子序列 $\{X_v, v=1, 2, \dots, V\}$, 得到 $x' = \sum_{v=1}^V b'_v x_v$, 对 x' 进行时频特征提取, 采用时频分析得到通信信道的状态空间谱估计结果, 正信号 s_k^+ 表示为:

$$s_k^+ = \begin{cases} V_{\max} & x_k^+ > V_{\max} \\ x_k^+ & 0 \leq x_k^+ \leq V_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

基于时间翻转技术, 得到翻转负信号 s_k^- 表示为:

$$s_k^- = x_k^- + \mathcal{X}_k \quad (16)$$

通过分段拟合将信号分解后的正信号 s_k^+ 和翻转负信号 s_k^- 再进行线性拟合, 实现消波补偿拼接, 得到接收端信号为:

$$y(t) = r \cdot h(t) \otimes s(t) + z(t) \quad (17)$$

上式中, r 是无线网络数据通信系统光电转换效率, $s(t)$ 是发射信号, $h(t)$ 是无线网络数据通信信道的冲激响应, 引入限幅噪声, 即使得 \mathcal{R} 最优, 选择如下加权系数进行自适应调整, 实现信道均衡:

$$\{b'_1, b'_2, \dots, b'_V\} = \arg \min_{\{b_1, b_2, \dots, b_V\}} \max_{\sum_{v=1}^V b_v \cdot x_v < 0, 1 \leq n \leq N} |\sum_{v=1}^V b_v \cdot x_v|^2 \quad (18)$$

通过上述分析, 用提取的时频特征对通信信道进行正交频分复用分解, 实现信道均衡改进, 提高通信质量.

3 仿真实验与结果分析

为了测试本文设计的无线网络信道均衡算法在改善通信质量, 提高通信性能方面的优越性, 进行仿真实验. 仿真实验建立在 Matlab 7 仿真软件上, 仿真实验的硬件环境为: CPU: Inter Pentium 4 2.0 GHz 或者更高, 采用 1000Mb/s 的以太网交换机进行无线网络通信组网, 操作系统为 Windows 7. 无线网络信道的子载波调制方式分别采用. 假设信源节点个数为 3900, 采样频率为 20 倍载波频率, 码元速率为 2 kBaud, 通信信号采用频带为 5~10 KHz、时宽为 10 ms 的线性调频信号, 接收端天线上接收的信号经高放的选择放大和混频后, 进行产生的伪随机序列与发端产生的伪随机

序列进行码间干扰抑制处理, 数据通信传输中信息序列码元宽度取 5 ms. 在上述参数设置和仿真环境设计的基础上, 进行无线网络通信及信道均衡设计仿真. 建立了无线网络数据通信系统的信道模型, 得到无线网络数据传输的空间多径信道模型, 然后进行信息采样, 求得通信信号的时频分量自相关函数如图 3 所示.

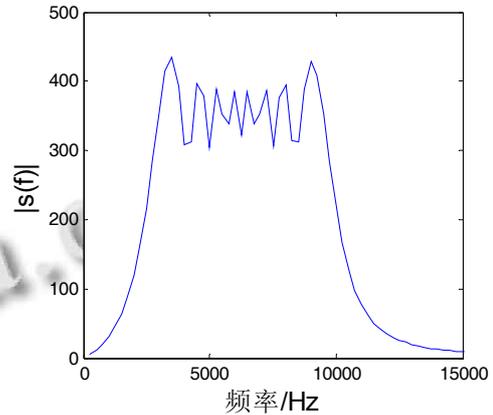
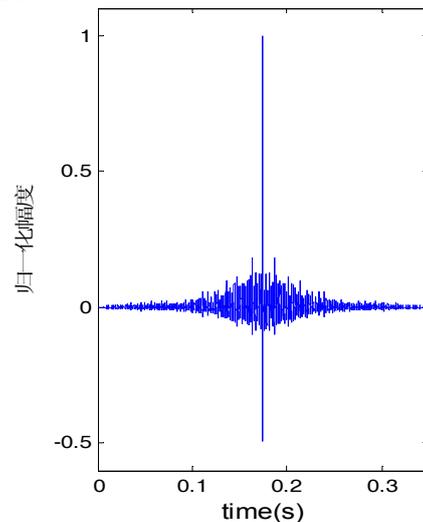
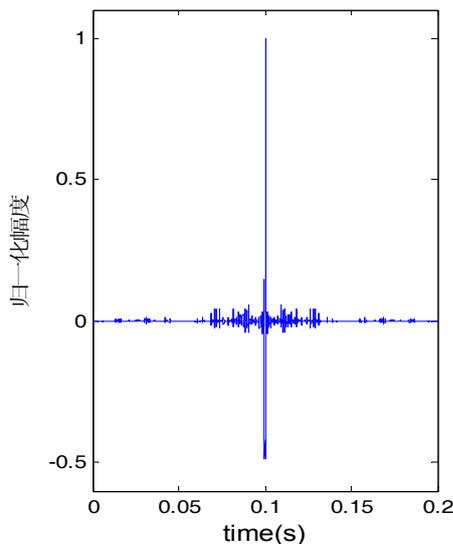


图 3 无线网络通信信号的时频分析结果

从图中可看出, 采用时频分析方法, 提取通信信号的时频特征, 的自相关特性好, 相关峰尖锐, 可以作为一个有效特征实现无线网络数据通信传输, 在此基础上, 采用本文所提取的时频特征对通信信道进行正交频分复用分解, 实现信道均衡, 为了对此信道均衡性能, 采用本文算法和目前常用的传统 Hilbert 变换扩频方法算法, 进行无线网络数据通信传输, 以信道的冲激响应归一化幅度作为对比指标, 得到结果如图 4 所示. 从图可见, 采用本文算法具有较好的信道均衡性能, 信道冲激响应的抗干扰性能较好, 能有效抑制通信信道的码间干扰.



(a) 传统 Hilbert 变换扩频方法



(b) 本文方法

图 4 信道均衡性能对比

最后,以误比特率(Bit Error Rate, BER)为测试指标,进行无线网络数据通信,得到不同算法下的误比特率结果如图 5 所示,从图可见,采用本文算法,有效降低了误比特率,改善通信性能,避免了数据通信的丢包和误码。

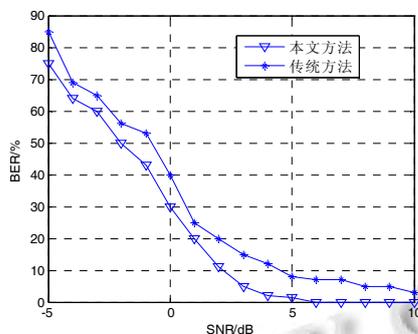


图 5 误比特率对比

4 结论

在无线网络数据通信中,由于阵元码间干扰导致信道具有非平稳特性,产生信道失衡效应,需要进行信道均衡设计,提高无线网络的数据传输性能。本文提出一种基于非平稳时频分析的无线网络信道均衡算法。首先构建了无线网络数据通信系统的信道模型,得到无线网

络数据传输的空间多径信道模型,采用时频分析方法进行通信信号码间干扰抑制处理,实现信道均衡改进,实验结果表明,采用本文算法具有较好的信道均衡性能,信道冲激响应的抗干扰性能较好,能有效抑制通信信道的码间杂波干扰,降低通信的误码率。

参考文献

- 1 Lu K, Xia Y, Zhu Z, et al. Sliding mode attitude tracking of rigid spacecraft with disturbances. *Journal of the Franklin Institute: Engineering and Applied Mathematics*, 2012, 349(2): 413-440.
- 2 刘家亮,王海燕,姜喆,等.垂直线列阵结构对 PTRM 阵处理空间增益的影响. *鱼雷技术*, 2010, 18(4): 263-267.
- 3 杨石,王艳玲,王永利.云计算环境下基于蜜蜂觅食行为的任务负载均衡算法. *计算机应用*, 2015, 35(4): 938-943.
- 4 亮,吴文峻,张飞.面向云计算数据中心的能耗建模方法. *软件学报*, 2014, 25(7): 1371-1387.
- 5 徐晓斌,张光卫,孙其博,等.一种误差可控传输均衡的 WSN 数据融合算法. *电子学报*, 2014, 42(6): 1205-1209.
- 6 琴涛,刘宏波,马俊凯. Raptor 码在卫星通信中抗干扰性能研究. *计算机与数字工程*, 2013, 41(7): 1054-1056.
- 7 沈磊,黄忠华.超宽带无线电信回波信号建模与仿真. *兵工学报*, 2015, 36(5): 795-800.
- 8 刘昊晨,梁红.线性调频信号参数估计和仿真研究. *计算机仿真*, 2010, 10(14): 157-159.
- 9 王红霞,尹建方,潘成胜. Ka 频段卫星通信的信道特性及系统性能仿真. *火力与指挥控制*, 2008, 33(6): 121-124.
- 10 张国良,姚二亮,汤文俊等.一种自适应的 GraphSLAM 鲁棒闭环算法. *信息与控制*, 2015, 44(3): 316-320, 327.
- 11 Zhao ZD, Niu WJ, Han DS, Ding SS. Cell selection algorithm for edge user in heterogeneous wireless network. *Telecommunications Science*, 2015, 31(12): 2015340.
- 12 Li B, Zhao CL, Sun MW, Zhou Z, Nallanathan A. Spectrum sensing for cognitive radios in time-variant flat-fading channels: A joint estimation approach. *IEEE Trans. Communication*, 2014, 62(8): 2665-2680.