

SC-FDE 系统中一种改进的 MMSE-RISIC 均衡算法

齐永磊, 陈西宏, 谢泽东

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 单载波频域均衡(SC-FDE)系统中的最小均方误差残留码间干扰消除(MMSE-RISIC)均衡算法对最小均方误差(MMSE)均衡后的残留码间干扰(RISI)进行了估计并消除,但判决数据中仍存在噪声干扰,而且 RISI 估计的偏差会造成额外干扰,影响了均衡的精度。为此详细分析了 MMSE-RISIC 算法存在的问题,并针对帧结构基于特殊字(UW)的 SC-FDE 系统提出一种改进的 MMSE-RISIC 均衡算法,该算法增加了噪声预测模块,利用 UW 估计噪声和数据估计噪声的相关性,由 UW 噪声预测和抵消 MMSE-RISIC 均衡后数据的噪声,由此 RISI 的估计精度也会提高。最后利用我国华北地区 300 km 的 9 径散射链路参数进行仿真,结果表明:改进的 MMSE-RISIC 均衡算法在低信噪比(SNR)下相比 MMSE-RISIC 均衡算法误码率(BER)有所降低,当 BER 为 10^{-3} 时 SNR 大约有 2 dB 的性能增益。

关键词 单载波频域均衡;MMSE-RISIC 均衡;噪声预测

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.03.015

中图分类号 TN92 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)03-0083-05

An Improved MMSE-RISIC Equalization Algorithm in SC-FDE System

QI Yonglei, CHEN Xihong, XIE Zedong

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: This article analyzes the problems existed in the MMSE-RISIC algorithm in detail and proposes an improved MMSE-RISIC equalization algorithm for SC-FDE whose frame structure applied Unique Word (UW). This algorithm adds a noise prediction module to utilize the correlation between the estimated noise in UW and the estimated noise in data. The noise in data after MMSE equalization is predicted and eliminated by the estimated noise in UW. The estimation accuracy of RISI will also improve. Finally, the parameters based on the 300 km troposcatter channel in north China are utilized for making a simulation. The results show that the improved MMSE-RISIC equalization can lower a bit of error rate (BER) under condition of low signal to noise ratio (SNR). And SNR gains about 2 dB when $BER = 10^{-3}$ compared with the MMSE-RISIC equalization.

Key words: SC-FDE; MMSE-RISIC equalization; noise prediction

单载波频域均衡(SC-FDE)的概念^[1-2]由 H. Sari 等人在 1994 年提出,SC-FDE 借鉴了正交频分复

用(OFDM)技术通过频域均衡方法对抗频率选择性衰落的优点,同时保留了单载波信号峰均比(PA-

收稿日期: 2017-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(61671468)

作者简介: 齐永磊(1995-),男,山东德州人,硕士生,主要从事单载波调制解调研究. E-mail:15529306572@163.com

引用格式: 齐永磊,陈西宏,谢泽东. SC-FDE 系统中一种改进的 MMSE-RISIC 均衡算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(3): 83-87. QI Yonglei, CHEN Xihong, XIE Zedong. An Improved MMSE-RISIC Equalization Algorithm in SC-FDE System[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(3): 83-87.

PR)低的优势^[3-4],相比单载波时域均衡,在大多径时延时,频域均衡的复杂度明显降低^[5];相比OFDM,SC-FDE具有相似复杂度的同时,降低了PAPR以及对相位噪声、频偏的敏感性^[6-7]。基于以上优点,文献[8~11]将其应用到散射通信中以改善散射通信性能。

传统的SC-FDE均衡算法有迫零(ZF)均衡和最小均方误差(MMSE)均衡^[12]。ZF均衡在消除码间干扰方面理论上最佳的,但在信道频域深衰落点上会放大噪声的影响,使性能恶化;MMSE均衡目的是为了使得误比特率(BER)最小,相当于在信道噪声和码间干扰二者之间作了折衷,但是残留码间干扰(RISI)仍然较为严重。文献[13]提出一种最小均方误差残留码间干扰消除(MMSE-RISIC)均衡算法,通过对判决数据直接估计来消除MMSE均衡的RISI,但是仍然受到噪声干扰以及RISI估计偏差所带来的额外干扰的影响;文献[14]提出一种在时域逐符号消除RISI的改进MMSE-RISIC均衡算法,虽然在高信噪比的情况下性能有所提高,但受噪声影响,在低信噪比时性能恶化更加严重;文献[15]提出对于帧结构基于特殊字(UW)的SC-FDE系统可以利用UW估计噪声和数据估计噪声的相关性由UW估计噪声预测数据估计噪声,但是其未考虑到MMSE均衡后的RISI,由于数据的RISI与UW的RISI并不具有相关性,造成了噪声估计的偏差。

为此本文针对帧结构基于UW的SC-FDE系统提出一种改进的MMSE-RISIC均衡算法。

1 SC-FDE系统

图1为SC-FDE系统模型,数据序列经星座映射,然后插入保护间隔(GI),经信道传输后去除GI,然后进行快速傅里叶变换(FFT)、频域均衡、逆快速傅里叶变换(IFFT),解映射后得到时域接收数据。

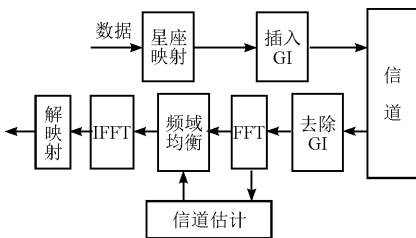


图1 SC-FDE系统模型

Fig. 1 The system model of SC-FDE

本文中SC-FDE系统采用基于UW的帧结构^[16],见图2,所选UW块幅度应为常数且具有良好的周期自相关性^[17],其长度须大于信道最大时延扩展长度 L 以避免码间干扰。

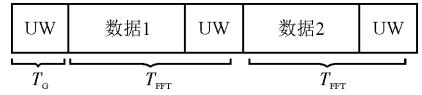


图2 SC-FDE系统帧结构

Fig. 2 The frame structure for SC-FDE system

假设在一个数据块中信道冲击响应不变,插入UW的数据块可以表示为:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_d \\ \mathbf{x}_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: \mathbf{x}_d 为 $M \times 1$ 的数据向量; \mathbf{x}_w 为 $N \times 1$ 的UW向量,记 $K = M + N$ 。

数据经信道传输,去除循环前缀后可以表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}\mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (2)$$

式中:接收信号向量 $\mathbf{y} = [y_0, y_1, \dots, y_{K-1}]^T$; \mathbf{v} 为均值为0,其中元素方差为 σ_v^2 的加性高斯白噪声向量; \mathbf{h} 为信道脉冲响应构成的 $K \times K$ 循环矩阵,其第1列元素为 $[h(0) h(1) \dots h(L-1) 0 \dots 0]^T$ 。

数据经快速傅里叶变换(FFT)后可以表示为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{F}\mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{h}\mathbf{x} + \mathbf{v}) = \mathbf{F}\mathbf{h}\mathbf{F}^H\mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{F}\mathbf{v} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V} \quad (3)$$

式中:

$$\mathbf{H} = \mathbf{F}\mathbf{h}\mathbf{F}^H \quad (4)$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{F}\mathbf{x} \quad (5)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{F}\mathbf{v} \quad (6)$$

式中: \mathbf{F} 为 $K \times K$ 维FFT矩阵; \mathbf{F}^H 为其共轭转置矩阵。

$$[\mathbf{F}]_{p,q} = \frac{1}{\sqrt{K}} \exp\left(\frac{-j2\pi pq}{K}\right), p, q = 0, 1, \dots, K-1 \quad (7)$$

式中: $\mathbf{Y}, \mathbf{X}, \mathbf{V}$ 分别为 y, x, v 的频域形式; \mathbf{H} 为频域信道转移矩阵,由于 h 为循环矩阵故 \mathbf{H} 为对角矩阵^[18],其第 k 个对角元素为:

$$[\mathbf{H}]_{k,k} = \sum_{l=0}^{L-1} h(l) \exp\left(\frac{-j2\pi lk}{K}\right), k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (8)$$

令 Y_k 表示第 k 个频域接收信号,则:

$$Y_k = H_k X_k + V_k \quad (9)$$

式中: H_k 为第 k 点频域信道冲击响应, $H_k = [\mathbf{H}]_{k,k}$, X_k, V_k 分别为第 k 个频域发射信号和噪声信号。

2 改进的MMSE-RISIC均衡算法

2.1 MMSE-RISIC均衡算法

图3为MMSE-RISIC均衡算法示意图。

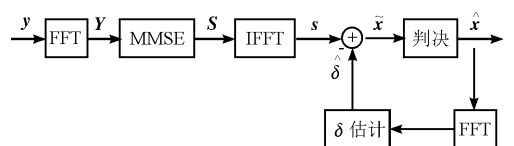


图3 MMSE-RISIC均衡算法结构

Fig. 3 The structure of MMSE-RISIC equalization algorithm

经 MMSE 均衡后的数据可以表示为:

$$S_k = W_k Y_k \quad (10)$$

式中: W_k 为 MMSE 均衡器第 k 个均衡系数,为便于分析将数据信号的功率归一化为单位 1,即 $\sigma_x^2 = 1$,则 W_k 的表达式为:

$$W_k = \frac{H_k^*}{|H_k|^2 + \sigma_v^2 / \sigma_x^2} = \frac{H_k^*}{|H_k|^2 + \sigma_v^2} \quad (11)$$

将式(9)、(11)代入式(10)后化简可得:

$$S_k = X_k - \frac{X_k \sigma_v^2}{|H_k|^2 + \sigma_v^2} + \frac{H_k^* V_k}{|H_k|^2 + \sigma_v^2} = X_k + \Delta_k + \tilde{V}_k \quad (12)$$

式中:

$$\Delta_k = \frac{X_k \sigma_v^2}{|H_k|^2 + \sigma_v^2} \quad (13)$$

$$\tilde{V}_k = \frac{H_k^* V_k}{|H_k|^2 + \sigma_v^2} \quad (14)$$

令 $\mathbf{A} = [\Delta_0, \Delta_1, \dots, \Delta_{K-1}]^T$, $\tilde{\mathbf{V}} = [\tilde{V}_0, \tilde{V}_1, \dots, \tilde{V}_{K-1}]^T$,则 \mathbf{A} 为 MMSE 均衡后 RISI 的频域形式, $\tilde{\mathbf{V}}$ 为 MMSE 均衡后噪声的频域形式。

对式(12)进行逆快速傅里叶变换后可得:

$$s_k = x_k + \delta_k + \tilde{v}_k \quad (15)$$

其对应向量的关系为:

$$\mathbf{s} = \mathbf{x} + \boldsymbol{\delta} + \tilde{\mathbf{v}} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_{K-1}]^T$, $\boldsymbol{\delta} = [\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_{K-1}]^T$, $\tilde{\mathbf{V}} = [v_0, v_1, \dots, v_{K-1}]^T$,则 \mathbf{s} , $\boldsymbol{\delta}$ 与 $\tilde{\mathbf{v}}$ 分别为 MMSE 均衡后数据, RISI 与噪声的时域形式。

传统 MMSE 均衡直接对 \mathbf{s} 进行判决,由式(16)可以看出 \mathbf{s} 中仍然存在 $\boldsymbol{\delta}$ 和 $\tilde{\mathbf{v}}$,从而影响判决精度。MMSE-RISIC 均衡算法首先进行 $\boldsymbol{\delta}$ 估计,由式(13)可得:

$$\hat{\Delta}_k = \frac{\sigma_v^2}{|H_k|^2 + \sigma_v^2} \hat{X}_k \quad (17)$$

即可得估计码间干扰的频域形式 $\hat{\mathbf{A}} = [\hat{\Delta}_0, \hat{\Delta}_1, \dots, \hat{\Delta}_{K-1}]^T$,然后对 $\hat{\mathbf{A}}$ 进行 IFFT 变换即可得残余码间干扰估计值 $\hat{\boldsymbol{\delta}}$,在 \mathbf{s} 中去除 $\hat{\boldsymbol{\delta}}$,令:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{s} - \hat{\boldsymbol{\delta}} \quad (18)$$

最后对 $\tilde{\mathbf{x}}$ 进行判决。由于对 RISI 进行了估计并去除,MMSE-RISIC 均衡算法相比 MMSE 在精度上有所提升,但是由式(16)、(18)可得:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} + (\boldsymbol{\delta} - \hat{\boldsymbol{\delta}}) + \tilde{\mathbf{v}} \quad (19)$$

从式(19)可以看出 $\tilde{\mathbf{x}}$ 中依然存在噪声干扰 $\tilde{\mathbf{v}}$,从而影响判决结果;而在 $\boldsymbol{\delta}$ 估计中默认判决是正确(式(17)即基于此得出),因此估计得出的 $\hat{\boldsymbol{\delta}}$ 与 $\boldsymbol{\delta}$ 之间存在偏差,又进一步造成了额外干扰。当信噪比较低时,额外干扰增大,会恶化系统性能,虽然 MMSE-RISIC 均衡可以通过迭代来提高精度,但是这会使计算量成倍增长^[13]。

2.2 改进的 MMSE-RISIC 均衡算法

针对 MMSE-RISIC 均衡存在的问题,本文提出一种改进的 MMSE-RISIC 均衡算法。其结构见图 4。

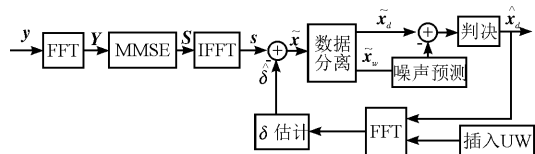


图4 改进的 MMSE-RISIC 均衡算法结构

Fig. 4 The structure of improved MMSE-RISIC equalization algorithm

对比式(1)可得:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_d \\ \tilde{\mathbf{x}}_w \end{bmatrix} \quad (20)$$

因此可将 $\tilde{\mathbf{x}}$ 进行数据分离为数据向量 $\tilde{\mathbf{x}}_d$ 和 UW 向量 $\tilde{\mathbf{x}}_w$ 。假设进行了理想的 $\boldsymbol{\delta}$ 估计,则由式(1)、(19)、(20)可得:

$$\tilde{\mathbf{v}}_d = \tilde{\mathbf{x}}_d - \mathbf{x}_d \quad (21)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_w = \tilde{\mathbf{x}}_w - \mathbf{x}_w \quad (22)$$

式中: $\tilde{\mathbf{v}}_d$ 为数据噪声向量; $\tilde{\mathbf{v}}_w$ 为 UW 噪声向量,二者来自于同一噪声向量 $\tilde{\mathbf{v}}$ 的线性变换,因此相关。因为 \mathbf{x}_w 为已知的,所以 $\tilde{\mathbf{v}}_w$ 可由接收机准确求出,由文献[15]可知可利用 $\tilde{\mathbf{v}}_w$ 来预测 $\tilde{\mathbf{v}}_d$ 。

由 $\tilde{\mathbf{v}}_w$ 来预测 $\tilde{\mathbf{v}}_d$ 的问题可转化为线性最优滤波问题,优化性能可考虑用某种最小代价函数衡量,一般有以下几种选择:①估计误差的均方值;②估计误差绝对值的期望值;③估计误差绝对值的三阶或高阶期望值。相比其它 2 项,选项①更容易进行数学处理,而且该代价函数有一个独特的最小值可以唯一定义统计优化设计^[19]。因此本文选择选项①即线性 MMSE 准则来衡量优化性能。

设线性 MMSE 预测矩阵为 \mathbf{B} ,则估计误差的最小均方值可表示为:

$$J_{\min} = E[\|\tilde{\mathbf{v}}_d - \mathbf{B}\tilde{\mathbf{v}}_w\|] \quad (23)$$

由维纳-霍夫方程可得:

$$\mathbf{B} = E[\tilde{\mathbf{v}}_d \tilde{\mathbf{v}}_w^H] \{E[\tilde{\mathbf{v}}_w \tilde{\mathbf{v}}_w^H]\}^{-1} \quad (24)$$

由式(14)可得:

$$\tilde{\mathbf{v}}_d = \mathbf{F}_d^H \frac{\mathbf{H}^* \mathbf{V}}{\mathbf{H} \mathbf{H}^* + \sigma_v^2} \quad (25)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_w = \mathbf{F}_w^H \frac{\mathbf{H}^* \mathbf{V}}{\mathbf{H} \mathbf{H}^* + \sigma_v^2} \quad (26)$$

式中: \mathbf{F}_d 为矩阵 \mathbf{F} 的前 M 列; \mathbf{F}_w 为矩阵 \mathbf{F} 的后 N 列, \mathbf{F}_d^H 与 \mathbf{F}_w^H 分别为 \mathbf{F}_d 和 \mathbf{F}_w 的共轭转置。则 $\tilde{\mathbf{v}}_d$ 的预测值为:

$$\hat{\tilde{\mathbf{v}}}_d = \mathbf{B}\tilde{\mathbf{v}}_w \quad (27)$$

在数据向量 \hat{x}_d 中除去预测数据噪声并对除去噪声后的数据 $(\hat{x}_d - \hat{v}_d)$ 进行判决, 然后对判决数据 \hat{x}_d 插入 UW 块并 FFT 变换后进行 δ 估计。

由于对数据噪声进行了预测并进行去除, 使得判决结果 \hat{x}_d 的准确度提升, 更接近于 x_d , 另一方面, 由于 UW 已知, 所以对判决后数据插入的 UW 块肯定是准确的, 也就减小了 δ 估计的偏差, 从而进一步提高了均衡的精度。

3 仿真结果与系统性能分析

对本文提出的新型均衡算法进行计算机仿真, 仿真参数设置见表 1, 信源采用 QPSK 映射, 插入 UW 采用长度为 32 的 Fran-Zadoff 序列^[20], 为简化仿真, 假定采用理想信道估计和同步。表 2 为我国华北地区 300 km 的 9 径散射链路参数表^[21-23], 本文采用此散射信道验证性能,

表 1 SC-FDE 系统频域均衡仿真参数表

Tab. 1 The table of simulation parameters for the frequency domain equalization of SC-FDE

符号速率	5M symbol/s
符号周期	0.2 μ s
映射方式	QPSK
FFT 长度	256
UW 长度	32
数据长度	224
信道编码	无

图 5 为在表 2 散射信道模型下的仿真结果, 从图中可以看出直接历经散射信道即未利用 SC-FDE 技术的系统性能曲线出现了误码率平台, 而采用 SC-FDE 技术的调制系统在低信噪比时误码率与 QPSK 相近, 随着信噪比的增强, 系统性能提高, 这是因为 SC-FDE 技术在抗多径衰落方面具有优势。在使用 SC-FDE 调制的系统中, MMSE-RISIC 均衡结果优于 MMSE 均衡, 这是由于信道存在深衰落点, MMSE 均衡后存在较强 RISI, 而 MMSE-RISIC 均衡则估计并消除了 RISI。但在信噪比较低时, MMSE-RISIC 均衡结果恶化, 这是因为在低信噪比时, 噪声干扰以及 RISI 估计偏差带来的额外干扰增大, 使得系统性能恶化。改进的 MMSE-RISIC 均衡算法在低信噪比下相比 MMSE-RISIC 均衡算法误码率有所降低, 当误码率为 10^{-3} 时信噪比大约有 2 dB 的性能增益。这是因为改进的 MMSE-RISIC 均衡算法考虑了噪声干扰, 而且额外干扰也因此减轻。

表 2 300 km 散射链路参数表

Tab. 2 The table of parameters for scatter link of 300 km

路径号	延迟/ μ s	归一化功率	多普勒频移/Hz
0	0.0	0.277 2	100
1	0.1	0.413 0	120
2	0.2	0.707 7	110
3	0.3	0.851 8	100
4	0.4	0.818 4	80
5	0.5	0.671 3	90
6	0.6	0.481 3	85
7	0.7	0.305 5	105
8	0.8	0.173 0	86

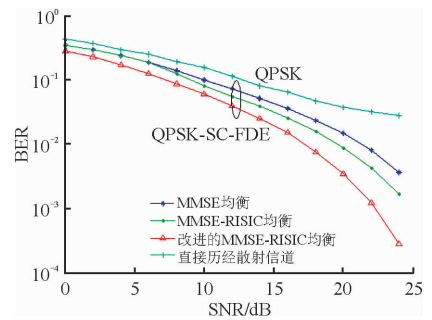


图 5 不同均衡算法在散射信道下性能

Fig. 5 The performance of different equalization algorithms in scattering channel

4 结语

本文针对帧结构基于 UW 的 SC-FDE 系统提出一种改进的 MMSE-RISIC 均衡算法, 该算法利用 UW 估计噪声和数据估计噪声的相关性, 由 UW 噪声预测和抵消 MMSE-RISIC 均衡后数据的噪声, 而且因此降低了 RISI 的估计偏差, 减少了额外干扰, 具有明显的性能增益。

参考文献 (References):

- [1] SARI H, KARAM G, JEANCLAUD I. Frequency-Domain Equalization of Mobile Radio and Terrestrial Broadcast Channel[C]//GLOBECOM '94. San Francisco, CA: IEEE, 1994:1-5.
- [2] SARI H, KARAM G, JEANCLAUD I. Transmission Techniques for Digital Terrestrial[J]. IEEE Communication Magazine, 1995, 33(2):100-109.
- [3] ADACHI F, TOMEBA H, TAKEDA K, et al. Introduction of Frequency-Domain Signal Processing to Broadband Single-Carrier Transmissions in a Wireless Channel[J]. IEICE Transactions on Communica-

- tions, 2009, 92(9): 2789-2808.
- [4] PANCALDI F, VITETTA G, KALBASI R, et al. Single-Carrier Frequency Domain Equalization [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(5): 37-56.
- [5] HAN S H, LEE J H. An Overview of Peak-to-Average Power Ratio Reduction Techniques for Multicarrier Transmission [J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(2): 56-65.
- [6] 李朝辉. 单载波频域均衡技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
LI Z H. Technology Research and Development of the Single Carrier Frequency Domain Equalization [D]. Xi'an: Xidian University, 2012. (in Chinese)
- [7] 张伟民. 单载波频域均衡方法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
ZHANG W M. Research on The Methods of Single Carrier Frequency Domain Equalization [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014. (in Chinese)
- [8] 吴新华. 单载波频域均衡技术在散射通信中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
WU X H. Application in Troposcatter Communication of Single-Carrier Frequency Domain Equalization Technology [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
- [9] 吴新华, 陈鸣. 基于散射信道的单载波频域均衡算法仿真[J]. 无线电通信技术, 2011, 37(3): 19-22.
WU X H, CHEN M. Simulation of SC-FDE Algorithm Based on Troposcatter Channel [J]. Radio Communications Technology, 2011, 37(3): 19-22. (in Chinese)
- [10] 陈晓明. 高速率对流层散射通信的合并技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
CHEN X M. Study of Combination Technology for High Speed Troposcatter Communication [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [11] 章渊. 单载波传输系统均衡技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
ZHANG Y. Study of Equalization Technology in Single Carrier Communication Systems [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [12] BENVENUTO N, TOMASIN S. On the Comparison between OFDM and Single Carrier Modulation with a DFE Using a Frequency-Domain Feedforward Filter [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002(50): 947-955.
- [13] 杨志, 刘泽民. SC-FDE系统的一种新型判决反馈均衡器[J]. 半导体技术, 2007, 32(9): 800-803.
YANG Z, LIU Z M. A Novel Decision Feedback Equalizer for SC-FDE System [J]. Semiconductor Technology, 2007, 32(9): 800-803. (in Chinese)
- [14] 卢建春. 单载波频域均衡多天线系统关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
LU J C. Research on Key Techniques of Multi-antenna System for Single Carrier Frequency Domain Equalization [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [15] 车小林, 何晨, 蒋铃鸽. 基于噪声预测的单载波MIMO系统的频域均衡[J]. 电子学报, 2009, 37(1): 43-47.
CHE X L, HE C, JIANG L G. Noise-Predictive Frequency Domain Equalization for Unique-Word Based Single-Carrier MIMO System [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(1): 43-47. (in Chinese)
- [16] DENEIRE L, GYSELINCKX B, ENGELS M. Training Sequence Versus Cyclic Prefix-A New Look on Single Carrier Communication [J]. IEEE Communications Letters, 2001, 5(7): 292-294.
- [17] HUEMER M, WITSCHNIG H, HAUSNER J. Unique Word Based Phase Tracking Algorithms for SC-FDE systems [C]//IEEE Global Telecommunications Conference. San Francisco, USA: IEEE, 2003: 70-74.
- [18] FALCONER D, ARIYAVISITAKUL S L, BENYAMIN S A, et al. Frequency Domain Equalization for Single Carrier Broadband Wireless Systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(4): 58-66.
- [19] 西蒙·赫金. 自适应滤波器原理 [M]. 5版. 郑宝玉, 译, 北京: 电子工业出版社, 2016.
Simon Haykin. Adaptive Filter Theory [M]. The 5th ed. ZHENG B Y, Translated, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016. (in Chinese)
- [20] HEIMILLER R. Phase Shift Pulse Codes with Good Periodic Correlation Properties [J]. IRE Transactions on Information Theory, 1961, 7(4): 254-257.
- [21] FITTING R C. Wideband Troposcatter Radio Channel Simulator [J]. IEEE Transactions on Communications Technology, 1967, 15(4): 565-570.
- [22] 胡茂凯, 陈西宏, 刘斌. 对流层散射通信中基于改进SVD的信道估计算法[J]. 电讯技术, 2009, 49(8): 69-72.
HU M K, CHEN X H, LIU B. An Improved Singular-Valued-Decomposition Channel Estimation Algorithm in Troposcatter Communications [J]. 2009, 49(8): 69-72. (in Chinese)
- [23] 谢泽东, 陈西宏. 对流层散射信道下MIMO-OFDM系统性能分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2013, 14(6): 64-67.
XIE Z D, CHEN X H. Performance Analysis of MIMO-OFDM System in Troposcatter Channel [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2013, 14(6): 64-67. (in Chinese)