

基于空时域压缩的大规模 MIMO 导频污染抑制算法

龙 恩, 闫冰冰, 刘月贞, 杜 飞

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 导频污染问题是限制大规模多输入多输出(MIMO)系统性能的主要因素。为此, 提出一种新的大规模 MIMO 导频污染抑制算法, 建立空时域二维压缩感知模型, 并利用传统的匹配追踪算法进行导频信号重构。仿真结果表明, 与基于最小均方误差的预编码算法相比, 该算法可在相同系统需求的前提下进一步减少导频使用数量, 从而有效抑制导频污染, 提升大规模 MIMO 系统整体性能。

关键词: 导频污染; 大规模多输入多输出系统; 空时域; 压缩感知; 重构

中文引用格式: 龙 恩, 闫冰冰, 刘月贞, 等. 基于空时域压缩的大规模 MIMO 导频污染抑制算法[J]. 计算机工程, 2017, 43(7): 141-145.

英文引用格式: Long Ken, Yan Bingbing, Liu Yuezheng, et al. Pilot Contamination Mitigation Algorithm in Massive MIMO Based on Spatial-Temporal Domain Compression[J]. Computer Engineering, 2017, 43(7): 141-145.

Pilot Contamination Mitigation Algorithm in Massive MIMO Based on Spatial-Temporal Domain Compression

LONG Ken, YAN Bingbing, LIU Yuezheng, DU Fei

(College of Communication and Information Engineering,

Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

[Abstract] The problem of pilot contamination is the main factor which influences the performance of Massive Multiple Input Multiple Output (MIMO) system. In order to solve this problem, this paper proposes a new pilot contamination mitigation algorithm in massive MIMO. Firstly, a two-dimensional compression sensing model in spatial and temporal domains is built. Then, pilot signal reconstruction is carried out by using Orthogonal Matching Pursuit (OMP) algorithm. The simulation results show that compared with precoding algorithm based on Minimum Mean Square Error (MMSE), under the condition of the same system demand, this algorithm can further reduce the number of pilots to mitigate pilot contamination effectively and improve the whole performance of massive MIMO system.

[Key words] pilot contamination; massive Multiple Input Multiple Output (MIMO) system; spatial-temporal domain; compressive sensing; reconstruction

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.07.023

0 概述

大规模多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 系统相对于传统 MIMO 系统具有能量消耗及硬件成本低、信道容量及空间区分度高的特点, 因此, 大规模 MIMO 系统得到越来越广泛的应用^[1]。但由于大规模 MIMO 系统是通过信道的互易性来获得信道状态信息^[2], 因此有限的导频空间维数将导致接收基站无法识别不同小区用户之间同时发送的相同导频, 即所谓的导频污染。针对该问

题, 目前已取得一些研究成果。文献[3]提出一种通过将各小区所发送的导频帧和邻近小区所发送的数据对齐的方法来抑制导频污染的发生。该方法可以有效降低导频污染带来的影响, 但其对信号的对齐精度要求较高。文献[4]提出一种基于最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 估计准则的多小区预编码算法, 从一定程度上降低了导频污染对大规模 MIMO 造成的性能损失。文献[5]提出一种基于信道估计的均方误差 (Mean Square Error, MSE) 算法并结合导频的功率控制来降低导频污染

基金项目: 国家科技重大专项 (2014ZX03003004-003)。

作者简介: 龙 恩 (1978—), 男, 讲师、博士, 主研方向为新一代移动通信系统; 闫冰冰、刘月贞、杜 飞, 硕士研究生。

收稿日期: 2016-05-03 修回日期: 2016-06-24 E-mail: 1374150313@qq.com

对大规模 MIMO 的系统影响,从而提升系统的整体性能。文献[6]提出利用盲估计的方法来减轻导频污染,但是盲估计算法的计算复杂度高、收敛速度慢。文献[7]提出利用导频调度的方法来减轻导频污染,但是该方法需要基于基站间的相互协作,因此,在实际应用中有一定的局限性^[8]。由于上述研究均存在一定问题,如数据传输效率低,对数据发送时间精度要求严格等,因此本文提出一种基于空域联合压缩感知算法的大规模 MIMO 导频污染抑制方法,建立空域二维压缩感知模型,并给出一种响应重构算法。

1 大规模 MIMO 系统模型

本文研究的是一个由多小区多用户构成的时分双工模式 (Time Division Duplex, TDD) 的大规模 MIMO 系统,该系统中共有 L 个小区,每个小区中基站有 M 根天线,且移动用户均为单天线移动终端设备,其数量为 K ,并且假设信道满足互易性^[9-10]。基本信道模型表示如图 1 所示,其中, R 为小区半径; r_0 为中心半径。

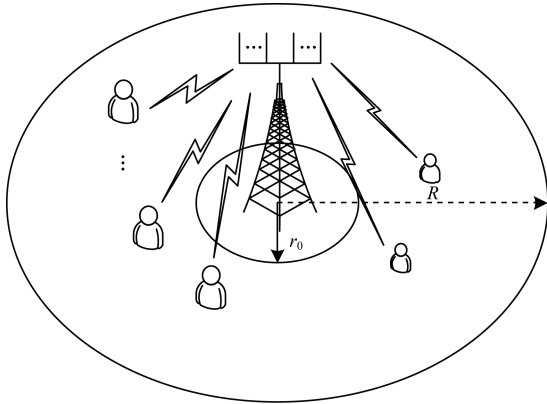


图 1 大规模 MIMO 系统模型

如图 1 所示,假设小区 i 中基站的第 m 根天线和小区 j 中第 k 个移动终端之间的信道传输系数为 $g_{j,k}^{i,m}$,其数学表达式为:

$$g_{j,k}^{i,m} = h_{j,k}^{i,m} \times \sqrt{\beta_{j,k}^i} \quad (1)$$

其中, $h_{j,k}^{i,m}$ 是快衰落系数; $\beta_{j,k}^i$ 是小区 i 中基站 M 根天线和小区 j 中第 k 个移动终端之间的慢衰落系数,其表达式为:

$$\beta_{j,k}^i = \frac{z_{j,k}^i}{d_{j,k}^{i,m,\gamma}} \quad (2)$$

其中, $z_{j,k}^i$ 是小区 i 中基站 M 根天线和小区 j 中第 k 个移动终端之间的阴影衰落的随机变量,服从均值为 0 的正态分布; $d_{j,k}^{i,m,\gamma}$ 是小区 i 中基站第 m 根天线和小区 j 中第 k 个移动终端之间的距离,且路径衰落指数

为 γ 。

对于式(1),所有的 M 根天线对应的信道传输系数可以通过式(3)表示:

$$\mathbf{G}_{i,j} = \mathbf{H}_{i,j} (\mathbf{D}_{i,j})^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{H}_{i,j}$ 为快衰落系数 $h_{j,k}^{i,m}$ 的矩阵形式,其维度为 $M \times K$; $\mathbf{G}_{i,j}$ 为信道传输系数 $g_{j,k}^{i,m}$ 的矩阵形式,其维度为 $M \times K$; $\mathbf{D}_{i,j}$ 为慢衰落系数 $\beta_{j,k}^i$ 的矩阵形式,其维度为 $K \times K$ 。

在 TDD 模式下,上行时小区 j 基站接收到的导频信号为:

$$\mathbf{y}_j = \sqrt{p_{\text{pilot}}} \sum_{i=1}^L \mathbf{g}_j^i \boldsymbol{\varphi}_i^T + \mathbf{n}_j \quad (4)$$

其中, p_{pilot} 为导频功率; $\boldsymbol{\varphi}_i = [\varphi_i^1, \varphi_i^2, \dots, \varphi_i^K]$ 为小区 i 中移动终端对应的导频序列,且满足正交性; $\mathbf{n}_j$ 为高斯白噪声矢量。

2 空域压缩及导频信号重构

2.1 大规模 MIMO 导频污染

由于大规模 MIMO 系统在 TDD 模式下基于信道的互易性,并通过上行导频来估计下行信道,因此当系统中各个小区发射的导频不满足正交性时,会导致导频污染问题。

根据式(3)和式(4)的矩阵形式,小区 j 基站接收到的导频信号的矩阵表达式为:

$$\mathbf{Y}_j = \sqrt{p_{\text{pilot}}} \sum_{i=1}^L \boldsymbol{\varphi}_i^T (\mathbf{D}_{i,j})^{\frac{1}{2}} \mathbf{H}_{i,j} + \mathbf{n}_j \quad (5)$$

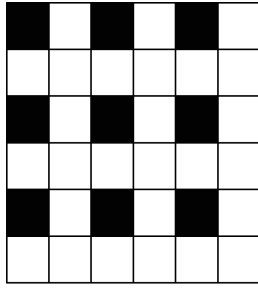
小区 j 基站接收到的导频信号可以分解为来自第 j 个小区终端的导频信息以及其他小区内的终端导频信息两部分,因此,式(5)可以修改为:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_j = & \sqrt{p_{\text{pilot}}} \boldsymbol{\varphi}_j^T (\mathbf{D}_{j,j})^{\frac{1}{2}} \mathbf{H}_{j,j} \\ & + \sqrt{p_{\text{pilot}}} \sum_{i=1, i \neq j}^L \boldsymbol{\varphi}_i^T (\mathbf{D}_{i,j})^{\frac{1}{2}} \mathbf{H}_{i,j} + \mathbf{n}_j \end{aligned} \quad (6)$$

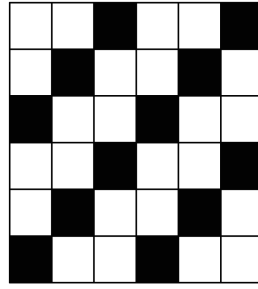
由式(6)可知,小区 j 基站接收到的导频信号和第 j 个小区终端的导频信息以及其他小区内的终端导频信息相关。为了提升大规模 MIMO 多小区的性能,必须通过有效的方法来减轻式(6)右边第 2 个部分导频污染带来的干扰。

2.2 3D MIMO 导频

通过导频对信道进行估计,从而获得信道的冲击响应函数。导频在信号的时域、空域以及频域摆放的间隔将影响信道估计的精度。在通常情况下,导频摆放的间隔越紧密,信道估计越准确,但信号的传输效率也越低,图 2 为传统的导频放置方式,其中,时域和空域为纵向放置;频域为横向放置。



(a) 时域与频域



(b) 空域与频域

图 2 传统导频放置方式

由图 2 可知, 传统的导频放置方式通过在时域、频域以及空域产生固定的间隔, 保证导频之间满足正交性来实现抑制导频污染的问题。然而, 这种导频放置方式需要大量的导频开销。随着天线数量的增加, 导频所占用的资源将大幅增加, 并最终影响实际的通信效果。因此, 需要在保证抑制导频污染的前提下, 充分压缩导频占用的资源来减少导频开销, 提高信号传输效率。

2.3 基于空时域联合压缩的导频污染抑制

为了获得最优的导频图案, 在进行压缩感知时, 需要根据观测矩阵的设计准则来计算导频符号以及插入导频的位置。

首先对导频数据进行空域上的压缩, 假设基站接收到的导频信号的频谱是由 N 个不重叠的子带组成, 在某时刻, 第 j 个子带上的感知数据为 $\mathbf{R}_j^{N_s} = [r_{1,j}, r_{2,j}, \dots, r_{N_s,j}]^T$, 根据参考文献[11-14]介绍的提升小波技术可知, 感知数据在小波基 ψ 上可以进行稀疏变换, 其具体实现过程可以通过式(7)表示:

$$\mathbf{R}_j^{N_s} = \psi_{N_s \times N_s} \boldsymbol{\theta}_j^{N_s} \quad (7)$$

其中, 小波基变换系数为 $\boldsymbol{\theta}_j = [\lambda_{j,0}, \bar{\gamma}_{j,0}, \dots, \bar{\gamma}_{j,L-1}]^T$, 且 $L = N_s$, 若 $\boldsymbol{\theta}_j$ 具有 k -稀疏性, 则应满足如下公式:

$$k = \|\lambda_0\|_0 + \sum_{j=0}^{L-1} \|\bar{\gamma}_j\|_0 \quad (8)$$

式(8)的含义为小波基变换系数中存在 k 个非零项。假设小波基变换系数 $\boldsymbol{\theta}_j$ 中具有 k 个非零元素和 $L - k$ 个近似零元素。通过阈值判决方法, 将 $L - k$ 个近似零元素赋值为 0, 而其余 k 个元素为非

零元素。此时小波基变换系数 $\boldsymbol{\theta}_j$ 满足稀疏度为 k 的稀疏性。

假设其观测数据为 $\mathbf{Y}_j^{M_s} = [Y_{1,j}, Y_{2,j}, \dots, Y_{M_s,j}]^T$, 得到:

$$\mathbf{Y}_j^{M_s} = \Phi_s \psi \boldsymbol{\theta}_j \quad (9)$$

其中, Φ_s 表示某一个随机矩阵, $\Phi_s = \text{rand } n(M_s, N_s)$, $\Phi_s \psi$ 即所构成的空域压缩感知矩阵。对应的稀疏向量 $\boldsymbol{\theta}_j$ 可以通过如下函数进行求解。

$$\min \|\boldsymbol{\theta}_j\|_{l_0}, \text{ s. t. } \mathbf{Y}_j = [\Phi_s \psi] \boldsymbol{\theta}_j \quad (10)$$

根据式(10)所获得的最优稀疏解 $\bar{\boldsymbol{\theta}}_j$ 即可重构出所有子带上的感知数据, 即 $\bar{\mathbf{r}}_j = \psi \bar{\boldsymbol{\theta}}_j$ 。

然后在空域压缩的基础上进一步对导频数据做时间域上的压缩。当导频信号获得空域压缩数据 $\mathbf{Y}_j^{M_s}$ 后, 将待检测信号的时间域进行等分, 将其分割为 N_t 个等时间间隔的子带, 第 i 个子带上的感知数据为 $\mathbf{R}_i^{N_t} = [r_{1,i}, r_{2,i}, \dots, r_{N_t,i}]^T$ 。在空域压缩感知时, 对于空白子带, 其压缩后依旧为空白子带。因此, 空域压缩后的数据在时域上依旧具有稀疏性^[15]。

针对式(9)的结果做时域上的压缩, 其第 i 行上的压缩数据可以用式(11)进行表示:

$$\begin{aligned} (\mathbf{G}_i^{M_t})^T &= \Phi_i^{M_t \times N_t} (\mathbf{Y}_i^{N_t})^T = \Phi_i^{M_t \times N_t} (\Phi_s \psi \boldsymbol{\theta}_i^{N_t})^T \\ &= \Phi_i^{M_t \times N_t} \Phi_s \psi (\boldsymbol{\theta}_i^{N_t})^T \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\Phi_i^{M_t \times N_t} \Phi_s \psi$ 为时域上的压缩感知矩阵, 相应的稀疏向量 $\boldsymbol{\theta}_i$ 可以通过如下函数进行求解。

$$\min (\boldsymbol{\theta}_i), \text{ s. t. } \mathbf{G}_i^{M_t} = [\Phi_i^{M_t \times N_t} \Phi_s \psi] (\boldsymbol{\theta}_i)^T \quad (12)$$

根据式(12)所获得的最优解即可重构出所有子带上的感知数据。因为本文的重点是空时域压缩模型的提出, 所以本文对空域和时域上的压缩数据进行重构时, 主要采用经典的基追踪算法。通过寻找残差与测量矩阵乘积的最大值来获得最优的稀疏系数进而完成信号重构。

最后考虑导频信号空时压缩后的性能, 通过计算其均方误差来分析其性能:

$$M_{\text{MSE}} = \frac{E(\sum_k |r_{i,j} - \bar{r}_{i,j}|^2)}{E(\sum_k |r_{i,j}|^2)} \quad (13)$$

通过上文介绍, 小区 i 中基站第 m 根天线接收到的导频数据在空域和时域上具备稀疏性, 又由于空域和时域具有正交性, 因此对导频数据进行空域压缩后并不影响其时域上的稀疏性。

3 仿真与结果分析

为了验证基于空时域联合压缩感知的导频污染抑制算法的性能, 建立仿真模型进行验证, 具体参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

仿真参数	参数值
用户数	16
小区数	4
基站天线数目	10 ~ 200
导频序列长度	10 ~ 100
系统映射方式	QPSK
信噪比/dB	0 ~ 10
基站发射功率/dBm	20
用户发送功率/dBm	10

本文对基于 MMSE 的预编码算法与本文算法在不同天线数目下对应的信道估计性能进行仿真分析。从图 3 的 Matlab 仿真结果可知,随着大规模 MIMO 系统的天线数目逐渐增加,本文所提出的基于空时域联合压缩感知的导频污染抑制算法的信道估计 MMSE 值明显小于传统基于 MMSE 的预编码算法。当天线数目较少时,2 种算法的性能差异较小,而当天线数目逐渐增加时,本文算法具有更加明显的性能优势。

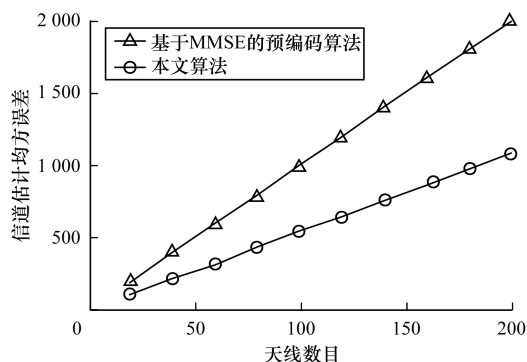


图 3 信道估计均方误差随基站天线数的变化

本文对基于 MMSE 的预编码算法与本文算法在不同天线数目下对应的小区下行速率进行仿真分析。从图 4 的 Matlab 仿真结果可知,随着大规模 MIMO 系统的天线数目逐渐增加,本文提出的基于空时域联合压缩感知的导频污染抑制算法对应的小区下行速率大于传统基于 MMSE 的预编码算法。这是由于传统基于 MMSE 的预编码算法无法有效抑制导频污染所带来的影响,因此随着天线数目的增加,小区下行速率无法得到明显提升。

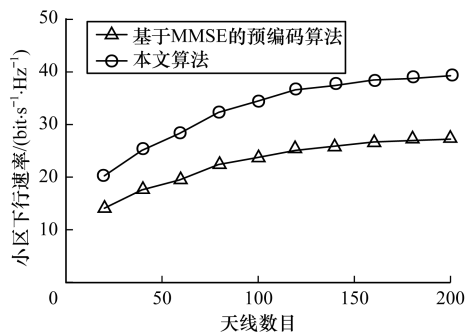


图 4 小区下行速率随基站天线数的变化

本文对基于 MMSE 的预编码算法与本文算法在不同导频长度下对应的小区下行速率进行仿真分析。从图 5 的 Matlab 仿真结果可知,小区的下行速率随着导频长度增加而增加,但当存在导频污染的情况下,对于传统基于 MMSE 的预编码算法,导频序列长度的增加并不能改善性能。对于本文算法,由于在很大程度上抑制了导频污染的影响,因此导频序列长度的增加可以从一定程度上提升小区的下行速率。

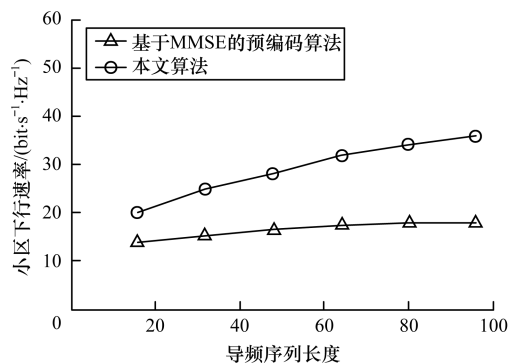


图 5 小区下行速率随导频长度的变化

本文对基于 MMSE 的预编码算法与本文算法的系统误码率进行仿真分析,结果如图 6 所示。从图 6 的 Matlab 仿真结果可知,本文算法系统误码率性能明显优于基于 MMSE 的预编码算法,当信噪比为 10 dB 时,其系统的误码率在 10^{-4} 以下,说明导频污染得到了明显的抑制。

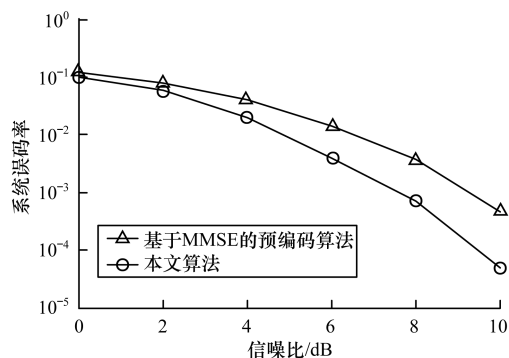


图 6 系统误码率对比

4 结束语

本文提出一种基于空时域联合压缩感知的导频污染抑制算法。由仿真结果可知,通过空时域联合压缩后的大规模 MIMO 系统具有更低 MSE 和系统误码率,且其小区下行速率也得到了明显的提升。下一步将对发射端未知信道状态信息的情形进行研究,从而获得更好的上行链路污染抑制方法,达到在源头上有效抑制污染的目的。

参考文献

- [1] Rusek F, Persson D, Lau B K, et al. Scaling up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2012, 30(1): 40-46.
- [2] 余 强, 毕大平, 陈 璐. 对 ELINT 系统信道化接收机的干扰技术研究[J]. 现代雷达, 2016, 38(2): 78-83.
- [3] Marzetta T L. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [4] Appaiah K, Ashikhmin A, Marzetta T L. Pilot Contamination Reduction in Multi-user TDD Systems[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [5] Jose J, Ashikhmin A, Marzetta T L, et al. Pilot Contamination and Precoding in Multi-cell TDD Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(8): 2640-2651.
- [6] 王海荣, 王玉辉, 黄永明, 等. 大规模 MIMO 多小区 TDD 系统中的导频污染减轻方法[J]. 信号处理, 2013, 29(2): 171-180.
- [7] Muller R R, Cottatellucci L, Vehkaperä M. Blind Pilot Decontamination[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 773-786.
- [8] 付晓慧. 导频污染下 Massive MIMO 系统的信道估计与导频调度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [9] Xu Peng, Wang Jinkuan, Wang Jiangzhou. Effect of Pilot Contamination on Channel Estimation in Massive MIMO Systems[C]//Proceedings of International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 1-6.
- [10] Dai Linglong, Wang Zhaocheng, Yang Zhixing. Spectrally Efficient Time-frequency Training OFDM for Mobile Large-scale MIMO Systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(2): 251-263.
- [11] 袁 泉, 张 骋, 陈建军, 等. 基于小波变换的图像压缩感知[J]. 计算机工程, 2012, 38(20): 209-211.
- [12] Chen Hongyang, Wang Gang, Wang Zizhuo, et al. Non Line of Sight Node Localization Based on Semi-definite Programming in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(1): 108-116.
- [13] Edward P, Liang Yingchang. Optimization for Cooperative Sensing in Cognitive Radio Networks[C]//Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007: 27-32.
- [14] Yang Haifeng, Zhen Jianmin. Wavelet Transform Based Distributed Compressed Sensing in Wireless Sensor Networks [J]. China Communications, 2012, 9(2): 1-12.
- [15] Unnikrishnan J, Veeravalliv V. Cooperative Sensing for Primary Detection in Cognitive Radio[J]. IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(1): 18-27.

编辑 陆燕菲

(上接第 140 页)

- [8] Wu J, Wang G, Zheng Y R. Energy Efficiency and Spectral Efficiency Tradeoff in Type-I ARQ Systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(2): 356-366.
- [9] Cui S G, Goldsmith A J, Bahai A. Energy-constrained Modulation Optimization [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(6): 2349-2360.
- [10] Xu K, Howitt I. Realistic Energy Model-based Energy Balanced Optimization for Low Rate WPAN Network [C]//Proceedings of IEEE Southeastcon'09. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009: 261-266.
- [11] Amin O, Bedeer E, Ahmed M H, et al. Energy Efficiency-spectral Efficiency Trade-off: A Multi-objective Optimization Approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 125-136.
- [12] Wang G, Pham K, Blasch E, et al. Optimum Design for Robustness of Frequency Hopping System [C]//Proceedings of IEEE Military Communication Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 326-337.
- [13] Wang G, Wu J, Zheng Y R. An Accurate Frame Error Rate Approximation of Coded Diversity Systems with Non-identical Diversity Branches [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 159-168.
- [14] Wei S. Simulation Study of Unmanned Aerial Vehicle Communication Networks Addressing Bandwidth Disruptions [C]//Proceedings of IEEE SPIE'14. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 254-265.
- [15] Wang G, Chen G, Shen D, et al. Performance Evaluation of Avionic Communication System with Jamming Interference[C]//Proceedings of the 33rd IEEE Digital Avionics Systems Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 596-609.
- [16] He C L, Sheng B, Zhu P C, et al. Energy and Spectral-efficiency Trade off for Distributed Antenna Systems with Proportional Fairness[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(5): 223-236.

编辑 索书志