

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.02.001

引用格式:易伟明,王佐,王晶.基于 CP 分解的 MIMO-OFDM 系统接收信号盲检测[J].电讯技术,2015,55(2):119-123. [YI Weiming, WANG Zuo, WANG Jing. Blind Detection of Received Signal Based on CP Decomposition in MIMO-OFDM System[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(2):119-123.]

基于 CP 分解的 MIMO-OFDM 系统接收信号盲检测*

易伟明¹,王 佐²,王 晶^{3,**}

(1. 北京理工大学 管理与经济学院,北京 100081;2. 中国联通 北京分公司,北京 100038;
3. 北京理工大学 信息与电子学院,北京 100081)

摘 要:多输入多输出-正交频分复用(MIMO-OFDM)无线通信系统中接收信号从空间、时间、频率的维度形成多因素的阵列信号,传统的矢量或者矩阵代数的建模方法在处理多因素信号问题上显得不足,无法利用多因素间的关系,而张量分析在解决多维阵列信号处理的问题上具有优势。针对 MIMO 无线通信系统,结合 OFDM 技术,研究了张量信号的建模及分解方法,并充分利用张量信号的分解唯一性提高无线接收信号的检测能力。提出了基于 CP(CANDECOMP/PARAFAC)张量分解方法对未知信道状态(CSI)的 MIMO-OFDM 系统进行接收端的张量信号建模和盲检测,并通过仿真分析验证了模型的可行性。仿真结果表明,在接收天线数目大于发送天线数目且各径信道独立情况下,基于 CP 分解的接收信号盲检测算法在误码率为 10^{-4} 时,随着接收天线数目增加,信噪比可获得约 5 dB 的增益。

关键词:多输入多输出;正交频分复用;接收信号盲检测;张量分析;频率分集

中图分类号:TN911.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)02-0119-05

Blind Detection of Received Signal Based on CP Decomposition in MIMO-OFDM System

YI Weiming¹, WANG Zuo², WANG Jing³

(1. School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Beijing Branch, China Unicom, Beijing 100038, China;
3. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The received signal of multiple input multiple output-orthogonal frequency division multiplexing (MIMO-OFDM) wireless communication system forms a multi-factor array signal from the view of space, time and frequency dimension. The traditional vector or matrix algebraic methods cannot perform well when processing multi-factor signals and cannot make use of the relationship among factors. Tensor analysis has an advantage in processing multi-dimension array signal. Considering the MIMO wireless communication system with OFDM technique, this paper researches on the tensor modeling and decomposition methods and aims to increase the detection ability of wireless received signal by use of the uniqueness of tensor decomposition. The received tensor signal with unknown channel state information (CSI) in MIMO-OFDM system is modelled and detected blindly based on the CANDECOMP/PARAFAC (CP) decomposition method. Simulation results verify the feasibility of the modeling. When the number of receiving antennas is larger than that of the transmitting antennas and the multi-path signals are independent, the blind detection algorithm based on CP decomposition can obtain about 5 dB gain in terms of signal-to-noise ratio (SNR) for bit error rate (BER) 10^{-4} with the number of receiving antennas increasing.

Key words: MIMO; OFDM; blind detection of received signal; tensor analysis; frequency diversity

* 收稿日期:2014-11-14;修回日期:2015-01-12 Received date:2014-11-14;Revised date:2015-01-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(11161140319);北京市高等学校青年英才计划资助项目(YETP1202);北京理工大学基础研究基金项目(20120542011)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 11161140319); Beijing Higher Education Young Elite Teacher Project(YETP1202); The Fund for Basic Research from Beijing Institute of Technology(No. 20120542011)

** 通讯作者:wangjing@bit.edu.cn **Corresponding author:** wangjing@bit.edu.cn

1 引 言

近几年,多输入多输出(Multiple Input Multiple Output,MIMO)技术一直都作为无线通信技术以及阵列信号处理领域的热门研究主题,已经成为第四代移动通信(4G)系统的关键技术。MIMO 系统通过空间上的分集增益和复用增益可以在不增加系统带宽的前提下,成倍地提高通信系统传输速率,有效地提高频谱利用率。4G 物理层里的另一个关键技术就是正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing,OFDM)。未来的宽带无线通信系统面临多径衰落和频带利用率两个最严峻的挑战。MIMO 技术能够利用空间复用技术提高频谱利用率,并能利用空间分集技术提高传输的可靠性;OFDM 技术通过在传输符号前面加入一定长度的冗余保护间隔,能够有效对抗多径传播引起的符号间串扰。MIMO-OFDM 技术结合了 MIMO 和 OFDM 两者的优点,能够解决带宽效率和多径衰落问题。

MIMO-OFDM 无线通信系统的接收端信号同时受到多个因素的影响,通过对接收天线、子载波、一个时隙内发送的符号块数目等参数建模,可使其成为一个“三维”信号,亦即张量信号。而对多维阵列信号的处理可以应用近年来发展迅速的数学领域中的张量工具来解决。由于该方法提供了其他工具和方法所不具备特点和优点,使之尤其适用于多维阵列信号的分析 and 处理。自 2000 年张量分析开始被尝试用于多天线通信系统中进行接收信号检测^[1],近年来,有国外学者对多用户 MIMO 系统的阵列信号进行张量建模^[2],并研究了多天线码分多址(Code Division Multiple Access,CDMA)系统的盲信号检测问题^[3];文献^[4]在多用户情况下为 MIMO-OFDMA 系统设计了一种低复杂度的 PARAFAC 接收机。目前,MIMO-OFDM 系统的张量分析研究刚起步,尚缺少实验验证和分析,尤其是未知信道状态下的接收信号盲检测问题还有待深入研究。

本文针对 MIMO-OFDM 无线通信系统受到多个因素影响的特点,引入张量分析的思想对 MIMO-OFDM 无线通信系统的接收信号进行建模,并利用张量分解的唯一性对接收信号在未知信道状态(Channel State Information,CSI)的情况下进行盲检测,最后通过仿真分析验证了张量建模和张量分解的可行性。

2 MIMO-OFDM 系统模型

MIMO 通信系统通过在收发两端设置多根发射和接收天线可以带来一定的分集增益和复用增益。OFDM 技术是一种特殊的多载波调制技术,它在频域里将信道分成若干相互正交的子信道,同时将串行的高速数据流通过串并转换成并行的低速子数据流,再调制到各个子信道上进行传输。OFDM 技术能够有效抵抗多径衰落引起的码间串扰,并提高频谱利用率。

由于子信道的频谱相互重叠,这就对 OFDM 的子载波的正交性提出了严格的要求。然而实际中的无线信道存在时变性所引起多普勒频移的影响,同时发射机载波频率与接收机本地振荡器之间存在频率偏差,都会使得 OFDM 系统的正交性得到破坏。发射机载波频率与接收机本地振荡器之间存在频率偏差会产生载波频率偏移(Carrier Frequency Offset,CFO)。CFO 会造成星座点的相位旋转,解调时会影响符号的判断,也会使得 OFDM 子载波之间的正交性遭到破坏,形成子载波之间的串扰(Inter-Carrier Interference,ICI),使系统性能急剧恶化^[5]。因而在实际问题的分析中,必须要考虑 CFO 对系统的影响。

考虑频率选择性多径信道,在 MIMO 通信系统中采用 OFDM 多载波调制方式。图 1 给出了一个有 N_T 根发射天线的 MIMO-OFDM 通信系统发射端示意图。

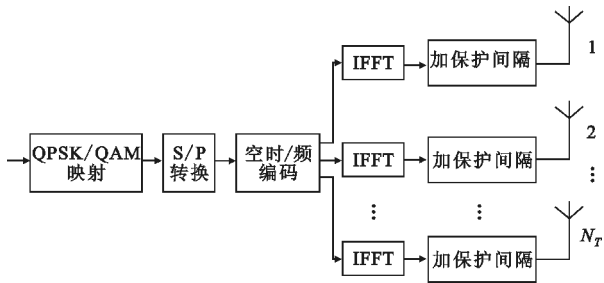


图 1 MIMO-OFDM 发射系统示意图
Fig. 1 MIMO-OFDM transmit system

3 CP 张量分解方法

CANDECOMP/PARAFAC 分解简称为 CP 分解,在 1970 年以 Carroll 和 Chang 提出的 CANDECOMP^[6]和 Harshman 提出的 PARAFAC^[7]的介绍中才得到相应的关注。鉴于 CP 张量分解兼具张量的高

维阵列的特性和分解的唯一性,因此是目前通信信号处理领域应用最为广泛的张量分解方法。

对于一个三阶张量 $\chi \in \mathbb{R}^{I \times J \times K}$, CP 分解可以写成下面的向量和的形式:

$$\chi \approx \sum_{r=1}^R \mathbf{a}_r \circ \mathbf{b}_r \circ \mathbf{c}_r. \quad (1)$$

式中,符号 $\circ$ 表示向量的外积, R 是一个正整数, $\mathbf{a}_r \in \mathbb{R}^I$, $\mathbf{b}_r \in \mathbb{R}^J$, $\mathbf{c}_r \in \mathbb{R}^K$, $r=1,2,\dots,R$ 。公式(1)中的三阶张量可以写成下面元素乘积和的等价形式:

$$\chi_{ijk} \approx \sum_{r=1}^R a_{ir} b_{jr} c_{kr}. \quad (2)$$

式中, $i=1,2,\dots,I$; $j=1,2,\dots,J$; $k=1,2,\dots,K$ 。

这样,根据公式(2),CP 分解就将张量表示为有限数目的 rank-one 张量之和,如图 2 所示。

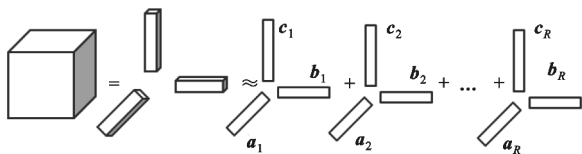


图 2 CP 分解示意图
Fig. 2 CP decomposition

定义如下 3 个矩阵:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= (\mathbf{a}_1 \quad \mathbf{a}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{a}_R), \\ \mathbf{B} &= (\mathbf{b}_1 \quad \mathbf{b}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{b}_R), \\ \mathbf{C} &= (\mathbf{c}_1 \quad \mathbf{c}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{c}_R). \end{aligned}$$

把张量 $\chi \in \mathbb{R}^{I \times J \times K}$ 进行矩阵展开,其中第 k 个切片矩阵可以表示为

$$\mathbf{X}_k \approx \mathbf{A} \mathbf{D}_k(\mathbf{C}) \mathbf{B}^T, k=1,2,\dots,K. \quad (3)$$

式中, $\mathbf{D}_k(\mathbf{C})$ 表示一个对角阵,对角线上的元素是矩阵 $\mathbf{C}$ 的第 k 行元素;矩阵 $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{C}$ 也叫做张量 χ 的因子矩阵。

CP 分解的唯一性实质上指的是张量的秩分解是唯一的^[8],而传统的矩阵分解并不是唯一的。目前没有一个特定的方法来决定张量的秩,但是后来学者转而研究在 CP 分解中如何去求得 rank-one 张量的数目(即 R 的值)。很多计算 CP 分解的方法是尝试利用不同数目的 rank-one 张量的和去拟合原张量。在没有噪声的理想化情况下,理论上可以通过穷举来找到一个合适的 R 值进行拟合来准确计算出 CP 张量的值,但是这种方法存在很多弊端。实际上,对于给定的 R 个 rank-one 张量或者一组因子矩阵,并没有一个成熟的方法来拟合成 CP 张量;

另外,当有噪声存在时,仅仅利用拟合的方法是无法准确得到 R 的值的。

目前已有多种方法可以计算 CP 分解,而最常用的是交替最小二乘(Alternating Least Square, ALS)的方法。对于三阶张量 $\chi \in \mathbb{R}^{I \times J \times K}$, ALS 的思想是找到 R 个 rank-one 张量或者一组因子矩阵($\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{C}$)来逼近 χ 。具体的步骤是:首先初始化矩阵 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{C}$ 的值,通过矩阵 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{C}$ 的值来求得矩阵 $\mathbf{B}$ 的估值;利用求得的 $\mathbf{B}$ 的估值和之前 $\mathbf{C}$ 的值来求得 $\mathbf{A}$ 的估值;利用 $\mathbf{A}$ 的估值和 $\mathbf{B}$ 的估值来求得 $\mathbf{C}$ 的估值。重复以上步骤,迭代直到达到设定的收敛值。用公式表示如下:

$$\text{迭代目标: } \min_{\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}} \|\chi - (\mathbf{C} \odot \mathbf{A}) \mathbf{B}^T\|;$$

$$\text{初始化: } \mathbf{A} = \hat{\mathbf{A}} \text{ 和 } \mathbf{C} = \hat{\mathbf{C}};$$

$$\text{迭代: } \hat{\mathbf{B}}^T = (\hat{\mathbf{C}} \odot \hat{\mathbf{A}}) \mathbf{X}^{(1)},$$

$$\hat{\mathbf{A}}^T = (\hat{\mathbf{B}} \odot \hat{\mathbf{C}}) \mathbf{X}^{(2)},$$

$$\hat{\mathbf{C}}^T = (\hat{\mathbf{A}} \odot \hat{\mathbf{B}}) \mathbf{X}^{(3)}.$$

式中,符号 $\odot$ 表示 Khatri-Rao 积,当满足一定的迭代条件时,迭代终止。

4 基于 CP 分解的接收信号盲检测方案

对于一个有 N_T 根发射天线和 N_R 根接收天线的 MIMO-OFDM 系统,每一对收发天线之间的信道都是频率选择性信道,且信道是准静态的,收发天线之间的最大多径数目是 L_p ,假设各条路径的衰落系数都服从独立的零均值复高斯分布,一个 OFDM 符号内子载波的数目是 N 。来自 N_T 根发射天线的信号经过各自的信道传输,到达第 i 根接收天线后可表示为多维矩阵形式:

$$\mathbf{Y}_i = \mathbf{A} \mathbf{D}_i(\mathbf{G} \tilde{\mathbf{H}}) \mathbf{S} + \mathbf{W}_i. \quad (4)$$

式中, $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{N \times (N \times N_T)}$ 表示受到 CFO 频率偏移影响后的 DFT 变换矩阵,它是满秩的,即 $k_A = N$; $\mathbf{D}_i(\cdot)$ 表示构造一个对角阵,其对角线上的元素是内含矩阵的第 i 行元素; $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{(N \times N_T) \times K}$ 表示含有 K 个符号的发送信号矩阵; $\mathbf{W}_i = [\mathbf{w}_{i,1}, \mathbf{w}_{i,2}, \dots, \mathbf{w}_{i,K}]$ 为信道噪声矩阵; $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{R_T \times (N \times R_T)}$ 是由 0 和 1 组成的转换矩阵; $\tilde{\mathbf{H}} \in \mathbb{C}^{(N \times R_T) \times (N \times N_T)}$ 中的每个元素 $\tilde{H}_{ij}$ 都是一个对角阵,对角线上的元素是第 (j,i) 天线对之间多径信道的频率响应。

假设接收端已经实现了时间同步和 CFO 捕获,我们可以得到所有接收天线上的接收信号的张量形

式($\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{(N_R \times N) \times K}$):

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_1 \\ \mathbf{Y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_{N_R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}\mathbf{D}_1(\tilde{\mathbf{G}}\mathbf{H}) \\ \mathbf{A}\mathbf{D}_2(\tilde{\mathbf{G}}\mathbf{H}) \\ \vdots \\ \mathbf{A}\mathbf{D}_{N_R}(\tilde{\mathbf{G}}\mathbf{H}) \end{pmatrix} \mathbf{S} + \begin{pmatrix} \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{W}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{W}_{N_R} \end{pmatrix} = [(\tilde{\mathbf{G}}\mathbf{H}) \odot \mathbf{A}] \mathbf{S} + \mathbf{W}. \tag{5}$$

这样,我们利用上一节提到的 ALS 算法进行 CP 分解,通过迭代方法可以估计得到因子矩阵 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{GH}$ 和 $\mathbf{S}$,设置两次迭代误差小于 10^{-6} ,则迭代停止。而在实际研究中,我们发现很多情况下只要满足接收天线的数量是发射天线数量的 2~3 倍或者更多倍数, N 值很小,并且总的发送符号数 K 大于 NN_T ,则是可以实现 CP 分解的唯一性的。这种情况在未来的大规模阵列天线系统里实现起来比较容易。

5 仿真结果与分析

首先通过 Matlab 编程建立 MIMO 传输信道模型^[9],仿真中着重考察在不同收发天线个数和多径数情况下基于 CP 分解的信号盲检测的算法效果。由于 CP 分解所使用的 ALS 迭代算法收敛速度较慢,尤其是天线个数、子载波数、符号数太大会造成因子矩阵过大,参数设置在仿真性能和计算复杂度间进行折衷。码元符号采用正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制,一个 OFDM 符号的子载波数目 N 为 16 和 32,各收发天线之间的信道采用 2~4 径独立的瑞利衰落信道模型,传输符号个数 K 为 32~256,信道加性高斯白噪声服从零均值复高斯分布。考虑到计算复杂度对仿真时间的影响,每一组我们都进行 500~1000 次蒙特卡洛实验。

信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)定义为 $SNR = 10\lg(\|\mathbf{Y}\|^2 / \|\mathbf{W}\|^2)$ dB。⁽⁶⁾ 式中,一个 N 阶张量 $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \cdots \times I_N}$ 的范数就等于其所有元素平方和的平方根:

$$\|\mathbf{X}\| = \sqrt{\sum_{i_1=1}^{I_1} \sum_{i_2=1}^{I_2} \cdots \sum_{i_N=1}^{I_N} x_{i_1 i_2 \cdots i_N}^2}. \tag{7}$$

考虑无线通信系统存在频率偏移的情况,信道状态信息在接收端是未知的,即在接收端进行信号的盲检测。传输的符号数目 $K=64$ 。图 3 是一根发射天线 $N_T=1$ 的情况,接收天线数分别是 2 和 4;图 4 是 $N_T=2$, N_R 为 3、4、5 的情况。

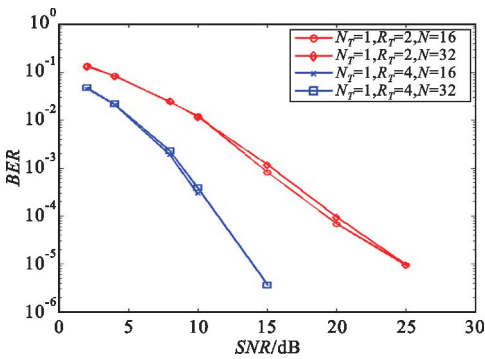


图 3 单发射天线 BER 随信噪比 SNR 变化曲线
Fig. 3 SNR-BER curve with single transmit antenna

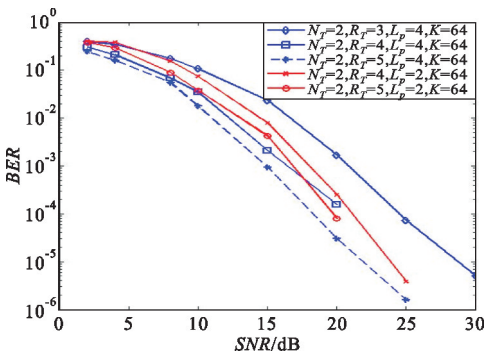


图 4 BER 与接收天线数和多径数的关系
Fig. 4 SNR-BER curve with multiple receive antennas

结合图 3 和图 4 可以看出,基于 CP 分解的 ALS 算法可以实现对信号的盲检测,并且随着信噪比的增加,误码率快速下降。从图中可见,当误码率为 10^{-4} 时,接收天线数目增加可以使信噪比有约 5 dB 的增益,随着接收天线的增加,误码率下降,说明接收分集对系统性能的提升起到了明显的作用。当多径数目从 2 径增加到 4 径时,系统性能也在一定程度得到提升,这说明基于张量分解的 MIMO-OFDM 系统充分利用了信道的多径环境,实现了系统的频率分集。

6 结 论

本文将张量分析的思想引入到 MIMO 无线通信系统中进行研究,对存在载波频率偏移的 MIMO-OFDM 系统利用张量分解实现了接收端信号的盲检测,并具体分析了 CP 分解唯一性条件和 ALS 算法的使用。实验仿真结果表明,在无线通信系统中引入张量可以有效地解决由载波频率偏移和未知的信道状态信息所带来的困难,在接收端可以得到较为满意的误比特率指标,并为今后在大规模天线技术中应用张量分析提供了有益的参考。本文所应用的

ALS 算法是最基本的方法,没有应用快速 ALS 算法,在后续工作中可以尝试使用快速 ALS 加快迭代速度。

此外,本文研究只考察了载波频率偏移对系统产生的影响,实际中 OFDM 系统子载波对相位噪声也非常敏感。现有的先估计相位噪声再检测信号的算法大多都是通过增加虚拟子载波或者导频的方式,这样做会降低传输有效数据的效率,进一步可以通过基于 CP 分解的方法免去额外增加虚拟子载波或者导频的环节,从而提高传输效率。

参考文献:

- [1] Sidiropoulos N D, Bro R, Giannakis G B. Blind PARAFAC receivers for DS/CDMA systems[J]. IEEE Transactins on Signal Processing, 2000, 48(3): 810-823.
- [2] Almeida A L F, Favier G, Mota J C M. Multiuser MIMO system using block space-time spreading and tensor modeling[J]. Signal Processing, 2008, 88(6): 2388-2402.
- [3] Almeida A, Favier G, Mota J. Constrained tensor Modeling approach to blind multiple- antenna CDMA schemes[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(6): 2417-2428.
- [4] Santra A, Hari K V S. Low complexity PARAFAC receiver for MIMO-OFDMA system in the presence of multi-access interference [C]// Proceedings of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. California, USA: IEEE, 2010: 1473-1477.
- [5] Armstrong J. Analysis of new and existing methods of reducing intercarrier interference due to carrier frequency offset in OFDM [J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(3): 365-369.
- [6] Carroll J D, Chang J J. Analysis of individual differences in multidimensional scaling via an N-way generalization of "Eckart-Young" decomposition [J]. Psychometrika, 1970, 35(3): 283-319.

- [7] Harshman R A. Foundations of the PARAFAC procedure: Models and conditions for an "explanatory" multi-modal factor analysis [J]. Phonetics, 1970, 16(1): 1-8.
- [8] Sidiropoulos N D, Bro R. On the Uniqueness of Multilinear Decomposition of N-Way Arrays [J]. Journal of Chemometrics, 2000, 14(3): 229-239.
- [9] Cho Y, Kim J, Yang W, et al. MIMO wireless communications with MATLAB [M]. New York: Wilkey, 2010.

作者简介:



易伟明(1978—),男,黑龙江齐齐哈尔人,2007年于北京理工大学获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为复杂系统建模与仿真;

YI Weiming was born in Qiqihaer, Heilongjiang Province, in 1978. He received the M. S. degree from Beijing Institute of Technology in 2007. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns modeling and simulation of complex systems.

Email: ywm@bit.edu.cn

王佐(1986—),男,辽宁锦州人,2014年于北京理工大学获硕士学位,现为中国联通北京分公司助理工程师,主要研究方向为无线通信技术;

WANG Zuo was born in Jinzhou, Liaoning Province, in 1986. He received the M. S. degree from Beijing Institute of Technology in 2014. He is now an assistant engineer. His research concerns wireless communication technology.

Email: wangzuo789@126.com

王晶(1980—),女,山东烟台人,2007年于北京理工大学获博士学位,现为北京理工大学信息与电子学院副教授,主要研究方向为语音信号处理、移动通信。

WANG Jing was born in Yantai, Shandong Province, in 1980. She received the Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2007. She is now an associate professor. Her research concerns speech signal processing and mobile communication.

Email: wangjing@bit.edu.cn