

基于 MUSIC 算法的 OFDM 信号识别方法

张海川 雷迎科

(电子工程学院 合肥 230037)

摘要 针对多径信道下传统的 OFDM 信号识别方法存在循环前缀较短时估计性能不高、所需 OFDM 符号数过多等问题,提出一种基于 MUSIC 算法的 OFDM 信号识别方法。该方法首先分析了 OFDM 信号和单载波信号的结构特点,然后对两类信号的自相关矩阵进行奇异值分解,提取奇异值矩阵,最后根据奇异值矩阵中较大非零奇异值的个数实现 OFDM 信号的识别。仿真实验表明,该方法仅需较少的 OFDM 符号就可以实现短循环前缀 OFDM 信号的识别,且识别性能优于传统方法。

关键词 OFDM,循环前缀,MUSIC 算法,奇异值分解

中图分类号 TN911 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.03.025

Identification Method for OFDM Signal Based on MUSIC Algorithm

ZHANG Hai-chuan LEI Ying-ke

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract Aiming at the poor performance and the large required OFDM symbol number of conventional identification methods for the short cyclic prefix OFDM signal, we proposed a identification method for OFDM signal based on MUSIC algorithm. The method first analyzes the structure characteristic of OFDM signal, then implements singular value decomposition for the autocorrelation matrix and extracts all the singular value matrix. Finally, the algorithm identifies the OFDM signal according to the number of larger non-zero singular values of the matrix. The experimental results shows that the proposed algorithm just need less OFDM symbols to be able to effectively identify the short cyclic prefix OFDM signal and has better performance than the conventional algorithm.

Keywords OFDM, Cyclic prefix, MUSIC algorithm, Singular value decomposition

近年来,正交频分复用(OFDM)技术因其抗码间串扰能力强、频谱利用率高等特点,已被广泛应用于软件无线电、电子对抗、自适应调制、通信监视和频谱管理等领域,成为非协作通信的核心技术之一^[1-3]。因此,在无线通信中对 OFDM 信号的识别研究显得尤为重要。

目前,国内外对 OFDM 信号的识别进行了广泛的研究。文献[4]提出了基于四阶累积量的 OFDM 信号识别方法,但该方法只适用于高斯白噪声信道,且在不同信噪比下需要变换识别门限,增加了算法复杂度。文献[5]在文献[4]的基础上,对双径等功率多径信道中的 OFDM 信号进行了识别,但该方法在低信噪比条件下识别率较低。文献[6-8]利用联合迭代算法对 OFDM 信号进行识别,通过每一次的数据检测信息完善信道估计性能,实现了对 OFDM 信号的识别,但该方法需要已知信道基本模型且未考虑迭代模型误差,因此算法识别性能不高,收敛速度较慢。文献[9]提出了基于自相关矩阵的 OFDM 信号识别方法,该方法通过移动时延位移检测 OFDM 信号自相关矩阵的峰值,实现 OFDM 信号的识别,但该方法在循环前缀长度比例较小时估计性能不高。文献[10-11]采用双边一致性识别 OFDM 信号,但算法运算量较大,且

要求严格的双谱时延边界。文献[12]对高斯白噪声信道下 OFDM 信号的循环自相关函数进行了详细分析,通过观察特定频率上的循环时延出现的周期性峰值实现 OFDM 信号的检测,但该方法需要上百个 OFDM 符号才能获得较高的估计精度。

综上所述,现有的 OFDM 信号识别方法大多都是基于循环前缀引入的系统特性来实现的,但当循环前缀长度较短或 OFDM 符号较少时,OFDM 信号的系统特性减弱,这些方法的检测性能也会急剧下降甚至不再适用。针对以上问题,本文提出一种基于 MUSIC 算法的 OFDM 信号识别方法,该方法利用噪声子空间和信号子空间之间的正交性,根据 OFDM 信号各路子载波调制方式各不相同的特点,采用 MUSIC 算法对 OFDM 信号进行奇异值分解,通过判断奇异值矩阵中信号奇异值的个数实现 OFDM 信号的识别。实验结果验证了该方法识别短循环前缀 OFDM 信号的鲁棒性。

1 信号模型

单载波发射信号可以表示为:

到稿日期:2016-02-17 返修日期:2016-05-04 本文受安徽省自然科学基金资助项目(1308085QF99,1408085MF129),国家自然科学基金资助项目(61272333,61473237)资助。

张海川(1991-),男,硕士生,主要研究方向为 OFDM 信号处理;雷迎科(1975-),男,博士,副教授,主要研究方向为机器学习与流形学习。

$$r_{\text{single}}(t) = A \sum_{k=0}^{K-1} x_k g(t-kT) \quad (1)$$

其中, x_k 表示的是第 k 个调制信息发送符号, A 是符号幅度, T 是符号周期, $g(t)$ 是成型脉冲函数, K 表示的是信息符号数。

OFDM 发射信号可以表示为:

$$r_{\text{OFDM}}(t) = A \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{N-1} x_{k,n} e^{j2\pi k \Delta f (t-kT)} g(t-kT) \quad (2)$$

其中, N 是 OFDM 信号的子载波数; $x_{k,n}$ 表示的是第 k 个 OFDM 符号中第 n 个子载波上的发送符号; T 是 OFDM 符号周期, $T = T_p + T_u$, T_p 表示的是循环前缀长度, T_u 是有用符号长度; $\Delta f = 1/T_u$ 表示子载波之间的频率间隔。

发射信号经过多径信道后,接收端的信号可以表示为:

$$s(t) = \sum_{l=1}^L h_l r(t-\tau_l) e^{j(2\pi(f_c+f_p)t+\theta)} + w(t) \quad (3)$$

其中, h_l , τ_l 分别表示的是第 l 条路径的衰落增益和时延, θ 表示的是相位旋转偏移, L 是多径信道数, f_c 是载波频率, f_d 是频率偏移, $w(t)$ 表示的是加性高斯白噪声。

对接收信号进行数字采样后得到的离散序列为:

$$s(n) = \sum_{l=1}^L h_l r(n-n_l) e^{j2\pi(f_c+f_p)nT} + w(n) \quad (4)$$

其中, $1/T$ 是采样频率, $n_l = \tau_l/T$, $r(n)$ 与 $w(n)$ 之间是相互独立的。

由上述信号模型可知,单载波信号只有一路子载波信号,而 OFDM 信号是由若干路子载波复合而成的,各路子信号的调制方式不同,可以看作是互不相关的信号源,因此多路传播的 OFDM 信号与 MUSIC 算法适用的信号模型相近,可以将 MUSIC 算法应用于 OFDM 系统。

2 基于 MUSIC 算法的 OFDM 信号与单载波信号识别算法原理

MUSIC 算法是一种基于矩阵特征空间分解的方法,该算法利用噪声子空间和信号子空间之间的正交性对接收信号进行处理和分析^[13]。本文采用 MUSIC 算法对接收信号的自相关矩阵进行奇异值分解,根据分解后的奇异值分布特性实现 OFDM 信号与单载波信号的识别。现将接收信号以矩阵形式表示:

$$S(n) = A(w)R(n) + W(n) \quad (5)$$

其中, $S(n)$ 表示接收信号矩阵, $A(w)$ 表示多径衰落矩阵, $R(n)$ 表示发射信号矩阵, $W(n)$ 表示高斯白噪声矩阵。则接收信号的自相关矩阵为:

$$R_{SS} = E(S(n)S^H(n)) \quad (6)$$

将式(5)代入到式(6)得:

$$R_{SS} = A(w)E(R(n)R^H(n))A^H(w) + E(W(n)W^H(n)) = AR_{ov}A^H + \sigma_w^2 I \quad (7)$$

其中, $(\cdot)^H$ 表示复共轭, I 表示单位矩阵, R_{ov} 是接收信号的协方差矩阵, σ_w^2 是噪声的协方差矩阵。对 $AR_{ov}A^H$ 进行奇异值分解得:

$$AR_{ov}A^H = \sum_{i=1}^M \lambda_i' u_i u_i^H = P \Lambda P^H \quad (8)$$

其中, M 为接收信号的样本数, P 与 Λ 分别表示如下:

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_N) \quad (9)$$

$$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1', \lambda_2', \dots, \lambda_N') \quad (10)$$

结合式(8)~式(10),对接收信号的自相关矩阵 R_{SS} 进行奇异值分解得:

$$R_{SS} = \sum_{i=1}^N (\lambda_i' + \sigma_w^2) u_i u_i^H + \sigma_w^2 \sum_{i=N+1}^M u_i u_i^H = \sum_{i=1}^M \lambda_i u_i u_i^H \quad (11)$$

由式(11)可知, R_{SS} 的奇异值为:

$$\lambda_i = \begin{cases} \lambda_i' + \sigma_w^2, & i=1, \dots, N \\ \sigma_w^2, & i=N+1, \dots, M \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可知,接收信号自相关矩阵的奇异值由两部分组成,一部分是含有 N 个子载波的信号奇异值 λ_i' 和噪声奇异值 σ_w^2 ,另一部分是不含有信号的 $M-N$ 个噪声奇异值 σ_w^2 。当信噪比较高时,信号奇异值 λ_i' 远大于噪声奇异值 σ_w^2 。

根据 OFDM 信号和单载波信号的结构特点,单载波信号只有一路子载波信号,对其自相关矩阵进行奇异值分解后只有一个信号奇异值,而 OFDM 信号是由若干路子载波复合而成,各路子载波信号的调制方式不同,可以看作是互不相关的信号源,对其自相关矩阵进行奇异值分解后得到多个信号奇异值。因此,可以根据接收信号自相关矩阵的奇异值分布特性实现 OFDM 信号的识别。

3 算法步骤

将基于 MUSIC 算法的 OFDM 信号识别方法的步骤归纳如下:

步骤 1 根据式(1)和式(2)单载波信号和 OFDM 信号的模型,结合式(6)计算接收信号的自相关矩阵 R_{SS} 。

步骤 2 利用式(8)对自相关矩阵 R_{SS} 进行奇异值分解,得到矩阵 R_{SS} 的奇异值向量。

步骤 3 对得到的奇异值进行降序排列,同时进行归一化处理,以消除奇异值本身数值变换对估计结果的影响。

步骤 4 根据降序处理后的奇异值设置合理的判决门限,奇异值大于门限即为信号奇异值;小于门限即为噪声奇异值。

步骤 5 根据奇异值中信号奇异值的个数对 OFDM 信号进行识别,信号奇异值大于 1,则判定为 OFDM 信号。

4 仿真实验

为了验证上述理论分析的正确性和本文算法的有效性,通过 Matlab 仿真平台对本文提出的基于 MUSIC 算法识别 OFDM 信号的方法进行仿真实验。仿真参数设置如下: OFDM 信号的子载波数为 256,子载波之间的频率间隔是 3.125kHz,OFDM 符号数是 100,循环前缀长度占有有效符号长度的 1/4,调制载波频率为 300kHz,符号周期长度是 0.8ms,采样频率是 500kHz,成型脉冲为矩形,接收端过采样率为 4,成型脉冲为矩形。信道环境设置为 5 条路径的多径衰落信道,多径时延分别为 $[0, 4, 8, 12, 16]$ ns,平均衰减功率分别为 $[0, -2, -6, -10, -14]$ dB。

实验 1 不同子载波调制方式的 OFDM 信号正确识别率

为验证本文算法对 OFDM 信号的识别性能,分别在 BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM 4 种不同的子载波调制方式下对 OFDM 信号进行识别。信噪比变化范围为 $-10 \sim 10$ dB,

步长为 2dB。仿真曲线如图 1 所示。

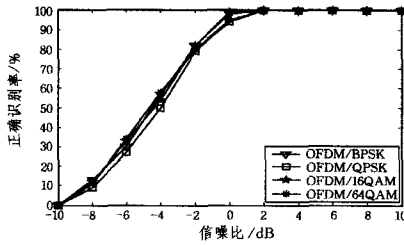


图 1 不同子载波调制方式的 OFDM 信号正确识别率

图 1 示出了不同子载波调制方式的 OFDM 信号正确识别率,从中可以看出,不同子载波调制方式的 OFDM 信号正确识别率随信噪比变化基本一致,当信噪比达到 0dB 时,不同子载波调制方式的 OFDM 信号正确识别率均可达到 90% 以上,说明本文识别 OFDM 信号的方法并不受子载波调制方式的影响,不同子载波调制方式下 OFDM 信号的识别性能是一致的。

实验 2 不同信噪比的正确识别率

为检验本文算法对不同循环前缀长度比例的 OFDM 信号识别的鲁棒性,在不同信噪比条件下分别仿真出循环前缀长度占有有效符号长度比例 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 4 种模式下 OFDM 信号的正确识别率。子载波调制方式为 QPSK, 信噪比变化范围为 -10~10dB, 步长为 2dB, 在每个信噪比上进行 500 次蒙特卡洛仿真实验, 并与传统的自相关法识别 OFDM 信号进行性能对比。仿真曲线如图 2、图 3 所示。

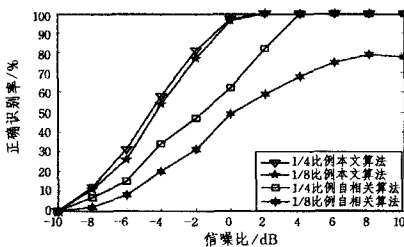


图 2 循环前缀长度比例为 1/4 和 1/8 时两种算法的正确识别率

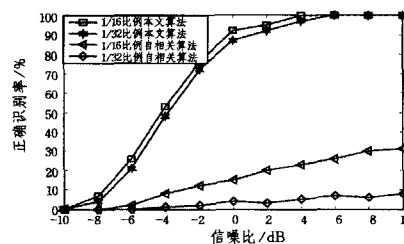


图 3 循环前缀长度比例为 1/16 和 1/32 时两种算法的正确识别率

从图 2 中可以看出,当循环前缀长度比例为 1/4 时,自相关法在各个信噪比点上的正确识别率略低于本文算法,本文算法的正确识别率在信噪比为 2dB 时即可达到 100%,而自相关法的正确识别率只有当信噪比达到 4dB 时才能达到 100%,在相同正确识别率下对信噪比的要求更高。当循环前缀长度比例为 1/8 时,本文算法的正确识别率与循环前缀长度比例为 1/4 时的大致相同;而自相关法的正确识别率相对循环前缀长度比例为 1/4 时有所下降,虽然正确率识别率随着信噪比提高而上升,但在信噪比达到 10dB 时,自相关法的

正确率识别率仍低于 60%。从图 3 中可以看出,当循环前缀长度比例为 1/16 时,本文算法的正确识别率在信噪比为 4dB 时可达到 100%,相比之下,自相关法的正确识别率在信噪比达到 10dB 时的正确识别率已经下降到 30%,无法正确识别出 OFDM 信号;而当循环前缀长度比例为 1/32 时,本文算法的正确识别率在信噪比为 4dB 时仍接近 100%,而此时自相关法的正确识别率已经很低,不再适用于此条件下的 OFDM 信号识别。通过以上分析可知,在循环前缀长度比例较短的情况下,本文算法的识别性能明显优于自相关法,这是由于自相关法识别 OFDM 信号是基于循环前缀引入的相关性实现的,当循环前缀长度比例较小时,OFDM 信号的自相关性较弱,识别性能会下降,而本文算法识别 OFDM 信号并未涉及 OFDM 信号的自相关性,因此本文算法的识别性能在循环前缀长度较短时优于传统算法。

实验 3 不同 OFDM 符号数的正确识别率

本节实验中,为考察 OFDM 符号数对识别性能的影响,在信噪比为 10dB 条件下分别仿真出循环前缀长度占有有效符号长度比例 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 4 种模式下的正确识别率与 OFDM 符号数的关系。符号数变化范围为 5~40, 步长为 5。仿真曲线如图 4、图 5 所示。

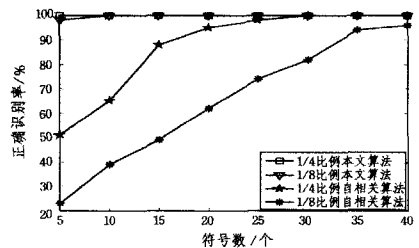


图 4 循环前缀长度比例为 1/4 和 1/8 时两种算法正确识别率与符号数的关系

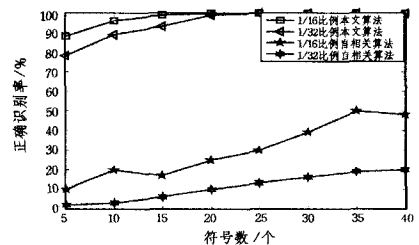


图 5 循环前缀长度比例为 1/16 和 1/32 时两种算法正确识别率与符号数的关系

图 4 和图 5 描述了不同循环前缀长度比例下本文算法和自相关法的识别性能与符号数的关系。由于自相关法识别 OFDM 信号是基于循环前缀引入的自相关性实现的,符号数越多,自相关性越大,因此图 4 和图 5 中自相关法的正确识别率是随着符号数的增多而提高的;而本文算法并未涉及 OFDM 信号的自相关性,正确识别率对 OFDM 符号数的变化并不敏感。从图 4 中可以看出,循环前缀长度比例为 1/4 时,两种算法在符号数达到 30 时的正确识别率均接近 100%,而本文算法在符号数小于 25 时的正确识别率要明显高于自相关法;而当循环前缀长度比例为 1/8 时,本文算法的正确识别率在相同 OFDM 符号数下与循环前缀长度比例为 1/4 时基

本相同,而自相关法的正确识别率则有所下降。从图5中可以看出,循环前缀长度比例为1/16,1/32时,本文算法的正确率识别率受循环前缀长度比例影响不大,符号数大于15时的正确识别率均能达到90%以上。相比之下,自相关法的正确识别率则受循环前缀长度比例影响较大,循环前缀长度比例为1/16时,自相关法的正确识别率最高还不到50%,无法有效识别OFDM信号;而当循环前缀长度比例为1/32时,自相关法的正确识别率已经很低,不再适用于此条件下的OFDM信号识别。由此可见,相比自相关法识别OFDM信号,本文算法的识别性能对符号数变化不敏感,受循环前缀长度比例影响不大,估计性能更优,适用范围更广。

结束语 针对多径信道下传统的OFDM信号识别方法存在循环前缀较短时估计性能不高、所需OFDM符号数过多等问题,提出一种基于MUSIC算法的OFDM信号识别方法。该算法利用噪声子空间和信号子空间之间的正交性实现OFDM信号的识别,并从信噪比和OFDM符号数两个角度考察对实验结果的影响。仿真实验表明,该方法仅需要较少的OFDM符号就可以实现短循环前缀OFDM信号的识别,且识别性能优于传统方法。

参 考 文 献

- [1] HAN N, ZHENG G, SOHN S H, et al. Cyclic autocorrelation based blind OFDM detection and identification for cognitive radio[C]//IEEE 4th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing. 2008:1-5.
- [2] 张晶晶. 基于小波变换的OFDM信号识别技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.
- [3] QI T, YANG H, ZHANG H M. Application Research of Military Wireless Multimedia Communication Based on OFDM Technology[J]. Computer Knowledge and Technology, 2010(4):951-952. (in Chinese)
齐涛,杨浩,张宏珉. 基于OFDM的军事无线多媒体通信应用研究[J]. 电脑知识与技术,2010(4):951-952.
- [4] REDDY S B, YÜCEK T, ARSLAN H. An efficient blind modulation detection for adaptive OFDM systems[C]// Vehicular Technology Conference, IEEE 58th. 2003:1895-1899.
- [5] CHATTERJEE S, FERNADNO W A C. Blind estimation of channel and modulation scheme in adaptive modulation schemes for OFDM-CDMA based 4G systems[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(4):1065-1075.
- [6] HIJAZI H, ROS L. Polynomial estimation of time-varying multipath gains with intercarrier interference mitigation in OFDM systems[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2009, 58(1):140-151.
- [7] PANAYIRCI E, ŞENOL H, POOR H V. Joint channel estimation, equalization, and data detection for OFDM systems in the presence of very high mobility[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(8):4225-4238.
- [8] ABOUTORAB N, HARDJAWANA W, VUCETIC B. A new iterative Doppler-assisted channel estimation joint with parallel ICI cancellation for high-mobility MIMO-OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(4):1577-1589.
- [9] LI G H, WANG K R, JIN H. Robust method of detecting OFDM signals based on cyclic autocorrelation[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(2): 714-716. (in Chinese)
李国汉,王可人,金虎. 一种基于循环相关的OFDM信号稳健检测法[J]. 计算机应用研究,2012,29(2):714-716.
- [10] HAN G, LI J D, LI C L. Study of blind detection techniques in adaptive OFDM[J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(4): 602-606. (in Chinese)
韩钢,李建东,李长乐. 自适应OFDM中信号盲检测技术[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版),2006,33(4):602-606.
- [11] EDFORS O, SANDELL M, JAN-JAAP V D B, et al. OFDM channel estimation by singular value decomposition[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(7):931-939.
- [12] 刘汝哲. 基于循环平稳的非合作OFDM信号检测与识别[D]. 北京:北京邮电大学,2013.
- [13] YANG W, HUANG D S, MA Z H. Root-MUSIC with real-valued eigen-decomposition for coherent signals based on cross-correlation vector reconstruction[J]. Application Research of Computers, 2010(11):4254-4256. (in Chinese)
杨武,黄登山,马振华. 基于互相关矢量重构的解相干实值Root-MUSIC算法[J]. 计算机应用研究,2010(11):4254-4256.
- (上接第78页)
- [10] GROZEV N, BUYYA R. Performance modelling and simulation of three-tier applications in cloud and multi-cloud environments[J]. The Computer Journal, 2015, 58(1):1-22.
- [11] PULLARA S, HALPERN E, PEDDADA P, et al. Method and apparatus for session replication and failover; CN1549978 A [P]. 2003.
- [12] REVANURU N, TORSTENSSON P, AGARWAL P, et al. System and method for supporting one-way remote method invocation for session replication in a server cluster; US8856352 [P]. 2014.
- [13] CALHEIROS R N, RANJAN R, BELOGLAZOV A, et al. CloudSim: a toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms [J]. Software: Practice and Experience, 2011, 41(1):23-50.
- [14] RUBiS. RUBiS: Rice University Bidding System [EB/OL]. [2015-3-1]. <http://rubis.ow2.org>.
- [15] MAO M, HUMPHREY M. A performance study on the vm startup time in the cloud [C]// 2012 IEEE 5th International Conference on Cloud Computing (CLOUD). 2012:423-430.
- [16] CAO J, Andersson M, Nyberg C, et al. Web server performance modeling using an M/G/1/K * PS queue [C]// 10th International Conference on Telecommunications, 2003 (ICT 2003). 2003:1501-1506.
- [17] MENASCE, DANIEL. TPC-W: A benchmark for e-commerce [J]. Internet Computing, IEEE, 2002, 6(3):83-87.