

基于高阶累积量的 LCP - GLSTBC - OFDM 信号调制识别

战金龙¹, 门 健^{2,1}

(1. 西安邮电学院通信与信息工程学院, 陕西西安, 710061; 2. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

摘要 提出了频率选择性衰落信道条件下基于高阶累积量的 LCP (Linear Constellation Precoding) - GLSTBC (Group Layered Space - Time Block Coding architecture) - OFDM (Orthogonal Frequency - Division Multiplexing) 信号识别算法, 用以区分 LCP - GLSTBC 结构下的多载波信号 (OFDM) 和单载波信号 (MPSK、MQAM)。该算法不需要预先知道信号和信道噪声的先验信息, 也不需要接收的信号进行解调, 只需从接收的中频信号直接进行识别处理, 分别求出接收信号的 2 阶和 4 阶累积量, 然后构造特征参数消除信道衰落的影响。仿真结果表明: 在 SNR 高于 5dB 时, 对多载波和单载波信号的识别率大于 90%。

关键词 调制识别, 高阶累积量, OFDM, GLSTBC

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.04.017

中图分类号 TN911.72 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)04-0086-05

将分组的分层空时结构 GLSTBC (Group Layered Space - Time Block Coding architecture, GLSTBC) 和 LCP - OFDM (Orthogonal Frequency - Division Multiplexing, OFDM) 结合起来的 LCP - GLSTBC - OFDM 技术已成为未来无线通信核心技术的解决方案^[1-6]。在未来的无线通信中, LCP - GLSTBC - OFDM 调制信号必然是一种重要的通信信号。

如何在没有任何先验知识的条件下对 LCP - GLSTBC 结构下的单载波和多载波信号进行有效地识别, 从而正确地检测信号是非常值得研究的问题。目前, 单载波数字调制信号在 AWGN 信道中的调制方式盲识别技术已经比较成熟^[7-12], 但是针对 OFDM 信号尤其 MIMO - OFDM 信号调制盲识别的研究较少。文献 [13] 提出了基于高阶累积量的 SFBC - OFDM 信号调制识别算法, 仅针对 2 发 1 收的 Alamouti 编码结构。

本文提出了基于高阶累积量的 LCP - GLSTBC - OFDM 信号调制盲识别算法, 对于频率选择性衰落信道下的 LCP - GLSTBC 结构, 给定集合 {MPSK, MQAM, OFDM} 进行多载波与单载波信号的类间识别。

1 LCP - GLSTBC 单载波和多载波信号发射机和接收机

LCP - GLSTBC 单载波信号和 LCP - GLSTBC OFDM 多载波信号发射机结构见文献 [6], 接收机结构见图 1。对于单载波只需去掉 OFDM 调制和解调模块, LCP - GLSTBC 单载波信号 S_i 分别经过 LCP 和 STBC 后, 由第 i 组的 2 个发射天线发射, 接收天线 j 接收的第 k 个 LCP - GLSTBC 单载波信号可以表示为:

$$r(j, k) = \sum_{i=1}^n \sum_{l=0}^{L-1} h_{ji}(l) S(i, k-l) e^{j2\pi f_d k T_0} + n(j, k) \quad (1)$$

式中: $n(j, k)$ 表示噪声项, 服从均值为 0、方差为 σ_n^2 的高斯分布; $h_{ji}(l)$ 表示第 j 个接收天线与第 i 个发射天线

¹ 收稿日期: 2012-01-05

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目 (1090275); 陕西省教育厅科研计划资助项目 (11JK1011; 09JK726); 智能机器人湖北省重点实验室基金资助项目 (HBR 201102); 2010 年科技部科研院所基金资助项目 (2010EG126237)

作者简介: 战金龙 (1979-), 男, 山东荣成人, 讲师, 博士, 主要从事 MIMO、OFDM 技术以及多载波信号识别研究。
E-mail: zjl_8855@163.com

之间的频率选择性衰落信道的第 l 条路径的衰落系数,服从复 Rayleigh 分布。 L 表示多径数; f_d 表示 Doppler 频移; $S(i, k - l)$ 表示 \hat{S} 的第 i 行第 $k - l$ 列的元素, \hat{S} 表示经过 LCP 和 GLSTBC 后的编码矩阵^[6]:

$$\hat{S} = \begin{bmatrix} \hat{s}_{1,q} & -\hat{s}_{1,q+1}^* & \hat{s}_{1,q+2} & -\hat{s}_{1,q+3}^* & \cdots \\ \hat{s}_{1,q+1} & -\hat{s}_{1,q}^* & \hat{s}_{1,q+3} & -\hat{s}_{1,q+2}^* & \cdots \\ \hat{s}_{2,q} & -\hat{s}_{2,q+1}^* & \hat{s}_{2,q+2} & -\hat{s}_{2,q+3}^* & \cdots \\ \hat{s}_{2,q+1} & -\hat{s}_{2,q}^* & \hat{s}_{2,q+3} & -\hat{s}_{2,q+4}^* & \cdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

\hat{S} 的前 2 行表示第 1 组的编码矩阵,后 2 行表示第 2 组的编码矩阵。 $\hat{s}_{1,q}$ 和 $\hat{s}_{1,q+1}$ (q 为偶数) 表示经过 LCP 后的 2 个相邻符号。单载波信号 S 的可能集合包括 $\{S_{\text{MPSK}}(t), S_{\text{MQAM}}(t)\}$, 信号表达式分别表示如下:

$$S_{\text{MPSK}} = A \sum_k c_k e^{j2\pi f_c t} g(t - kT_s) \quad (3)$$

$$S_{\text{MQAM}} = A \sum_k m_k e^{j2\pi f_c t} g(t - kT_s) \quad (4)$$

式中: A 、 T_s 、 f_c 分别表示接收信号的幅度、码元周期、载波频率; c_k 、 m_k 表示各种调制方式的传输符号; Δf_0 为频率间隔; $g(t)$ 为脉冲成型函数。

对于 LCP - GLSTBC - OFDM 信号, S_1 和 S_2 经过 LCP 后得到 $\bar{S}_1 = [\bar{S}_{11} \quad \bar{S}_{12}]$ 和 $\bar{S}_2 = [\bar{S}_{21} \quad \bar{S}_{22}]$, 将 \bar{S}_1 和 \bar{S}_2 分别进行 STBC 和 OFDM 调制, 即对于第 1 组和第 2 组的 2 个发射天线, 编码矩阵分别为:

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & -\bar{S}_{12}^* \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{11}^* \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \bar{S}_{21} & -\bar{S}_{22}^* \\ \bar{S}_{22} & \bar{S}_{21}^* \end{bmatrix}。$$

假设 t 和 $t + T$ 时刻信道衰落保持不变, t 和 $t + T$ 时刻第 j 个接收天线的接收信号分别为:

$$\begin{cases} r_j^t = \bar{H}_{j1} T_{\text{CP}} F^H \bar{S}_{11} + \bar{H}_{j2} T_{\text{CP}} F^H \bar{S}_{12} + \bar{H}_{j3} T_{\text{CP}} F^H \bar{S}_{21} + \bar{H}_{j4} T_{\text{CP}} F^H \bar{S}_{22} + N_j^t = \\ \quad \bar{H}_{j1} S_{1,\text{OFDM}}^t + \bar{H}_{j2} S_{2,\text{OFDM}}^t + \bar{H}_{j3} S_{3,\text{OFDM}}^t + \bar{H}_{j4} S_{4,\text{OFDM}}^t + N_j^t \\ r_j^{t+T} = -\bar{H}_{j1} T_{\text{CP}} F^H \bar{S}_{12}^* + \bar{H}_{j2} T_{\text{CP}} F^H \bar{S}_{11}^* - \bar{H}_{j3} T_{\text{CP}} F^H \bar{S}_{22}^* + \bar{H}_{j4} T_{\text{CP}} F^H \bar{S}_{21}^* + N_j^{t+T} = \\ \quad \bar{H}_{j1} S_{1,\text{OFDM}}^{t+T} + \bar{H}_{j2} S_{2,\text{OFDM}}^{t+T} + \bar{H}_{j3} S_{3,\text{OFDM}}^{t+T} + \bar{H}_{j4} S_{4,\text{OFDM}}^{t+T} + N_j^{t+T} \end{cases} \quad (5)$$

式中: \bar{H}_{ji} , $i = 1, 2, 3, 4$, 表示第 j 个接收天线和第 i 个发射天线之间等效的信道矩阵^[6], 其元素为 $h_{ji}(l)$; N_j^t 表示 t 时刻的噪声矩阵; $S_{i,\text{OFDM}}^t$, $i = 1, 2, \dots, 4$, 表示第 i 个发射天线发送的 OFDM 信号矢量, 其中的元素为:

$$S_{\text{OFDM}} = N_p \sum_k \sum_{n=0}^{N-1} s_{n,k} e^{j2\pi(f_c + \Delta f_k)t} g(t - kT_s) \quad (6)$$

式中: $s_{n,k}$ 表示 OFDM 调制前的传输符号; N 表示子载波个数, $\Delta f_k = \left[i = \left(\frac{M-1}{1} \right) \right] \Delta f_0$, $i = 0, 1, \dots, M-1$ 。发射信号、信道衰减因子以及高斯白噪声互相独立。

2 基于高阶累积量的 LCP - GLSTBC - OFDM 多载波信号调制识别

由于采用的 LCP 矩阵为 FFT 矩阵, 因此, LCP - GLSTBC 单载波信号会具有多载波特性的, 而 LCP - GLSTBC - OFDM 信号由于 LCP 矩阵和 OFDM 调制互相抵消, 从而呈现单载波特性的。接收端如果要对 LCP - GLSTBC 结构进行检测, 采用 SVD 组间干扰抑制至少需要 3 个接收天线, 这里只是对 LCP - GLSTBC 多载波信号进行识别, 只需要一个接收天线。而且, 直接对接收的数字中频信号进行处理。令 LCP - GLSTBC 单载波接收数字中频信号 $x = HS$, 则 $r = x + N$, 考虑到各发射天线和接收天线之间的信道衰落系数相互独立, 信道衰落系数与信号之间也相互独立, $x(j, k) = \sum_{l=0}^n \sum_{i=0}^{L-1} h_{ji}(l) S_i(k-l) = e^{j2\pi f_d t + kT_0}$ 的各阶矩为:

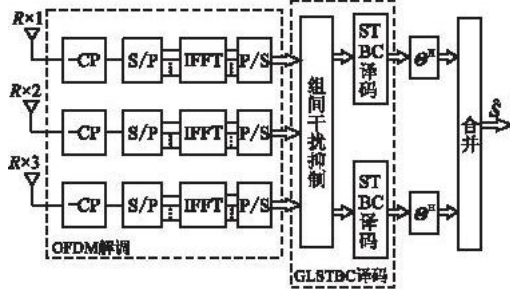


图 1 LCP - GLSTBC 单载波信号接收端结构框图

Fig.1 The receiver block diagram of LCP - GLSTBC OFDM multi - carrier signal

$$M_{2,0}(x(j,k)) = E(x^2(j,k)) = e^{j2\pi f_d + kT_0} E\left(\sum_{i=1}^n \sum_{l=0}^{L-1} (h_{ji}^2(l)) (S_i^2(k-l))\right) \quad (7)$$

$$M_{2,1}(x(j,k)) = E(x(j,k)x^*(j,k)) = E\left(\sum_{i=1}^n \sum_{l=0}^{L-1} (|h_{ji}(l)|^2) (|S_i(k-l)|^2)\right) \quad (8)$$

$$M_{4,2}(x(j,k)) = E(x^2(j,k)(x^*(j,k))^2) = E\left(\sum_{i=1}^n \sum_{l=0}^{L-1} (|h_{ji}(l)|^4) (|S_i(k-l)|^4)\right) \quad (9)$$

由于 $h_{ji} = \alpha_{ji} + j\beta_{ji}$, α_{ji} 和 β_{ji} 相互独立并同时服从均值为零、方差为 σ_h^2 的正态分布,则:

$$E(h_{ji}^2) = E(\alpha_{ji}^2 + 2j\alpha_{ji}\beta_{ji} - \beta_{ji}^2) = 0 \quad (10)$$

Rayleigh 信道衰落系数 h_{ji} 具有如下特点^[14]:

$$E(|h_{ji}|^p) = (2\sigma_h^2)^{p/2} \Gamma(1/2)(2+p), p \geq 0 \quad (11)$$

将式(10) - (13) 代入式(7) - (9), $x(j,k)$ 的各阶矩为: $M_{2,0}(x(j,k)) = 0, M_{2,1}(x(j,k)) = 2nL\sigma_h^2$

$E(|S|^2), M_{4,2}(x(j,k)) = 8nL\sigma_h^4 E(|S|^4), x(j,k)$ 的各阶累积量为:

$$C_{2,0}(x(j,k)) = M_{2,0}(x(j,k)) = 0 \quad (12)$$

$$C_{2,1}(x(j,k)) = M_{2,1}(x(j,k)) = 2nL\sigma_h^2 E(|S|^2) = 2nL\sigma_h^2 M_{2,1}(S) \quad (13)$$

$$C_{4,2}(x(j,k)) = 8nL\sigma_h^4 (M_{4,2}(S) - nLM_{2,1}^2(S)) \quad (14)$$

$r(j,k)$ 的累积量为:

$$C_{4,2}(r(j,k)) = 2nL\sigma_h^2 M_{2,1}(S) + \sum_{i=1}^n M_{2,1}(w_i) \quad (15)$$

当 SNR 足够大时,噪声可以忽略。此时, $C_{2,1}(r(j,k)) \approx 2nL\sigma_h^2 M_{2,1}(S)$ 。由于高斯噪声 2 阶以上的累积量恒为 0,所以:

$$C_{4,2}(r(j,k)) = C_{4,2}(x(j,k)) 8nL\sigma_h^4 (M_{4,2}(S) - nLM_{2,1}^2(S)) \quad (16)$$

为了消除频率选择性衰落信道的影响,选取特征参数 d_{20}, d_{20} 由下式给出:

$$d_{20} = C_{4,2}(r(j,k)) / C_{2,1}^2(r(j,k)) = 2/nL (M_{4,2}(S) - nLM_{2,1}^2(S)) / M_{2,1}^2(S) \quad (17)$$

根据文献[13]单发单收下 d_{20} 的结果,不难计算在 4 个发射天线、多径数为 L 的条件下 d_{20} (OFDM - PSK) = 0 (表示采用 PSK 调制的 LCP - GLSTBC - OFDM 信号), d_{20} (OFDM - 16QAM) = 0.04 (表示采用 16QAM 调制的 LCP - GLSTBC - OFDM 信号), d_{20} (MPSK) = 0.5/L, d_{20} (MQAM) = 0.5/L。考虑到高斯噪声尤其在低 SNR 时的影响,各种调制类型的 d_{20} 实际上都略小于上面的理论值,此时的门限值应设置得较小。本文门限值设为 0,即当高于 0 时就认为是单载波调制,否则为 OFDM 调制。

3 仿真分析

仿真的条件如下:以 4 发 1 收的 LCP - GLSTBC 结构为例,每种调制方式取 4 096 个数据,经过解复用后每个发射天线的数据为 1 024,OFDM 子载波个数为 1 024,所有子载波均采用 16QAM 或 16PSK 调制,循环前缀的长度为 10。频率选择性衰落信道用 FIR 滤波器来仿真,抽头系数服从复 Rayleigh 分布。SNR 的变化范围为 0 - 30 dB,噪声为均值为 0,方差为 $\sigma_w^2 = 1$ 的复高斯随机变量。所有仿真结果均进行 200 次的 Monte - Carlo 实验。

图 2 和图 3 分别给出了多径数为 2 和 4 时特征参数 d_{20} 随 SNR 的变化情况。可以看出,由于预编码矩阵采用了 FFT 矩阵,LCP - GLSTBC 结构下的 QPSK、16PSK、64QAM 和 256QAM 都具有多载波特性和多径数为 2 时, $d_{20} \approx 0.25$;多径数为 4 时, $d_{20} \approx 0.125$ 特征参数理论值 $d_{20} \approx 2/nL$ 一致。

图 4 和图 5 分别给出了多径数为 2 和 4 时特征参数 d_{20} 的方差随 SNR 的变化情况。可以看出, LCP - GLSTBC 结构下的 QPSK、16PSK、64QAM 和 256QAM 信号的方差是 LCP - GLSTBC - OFDM 信号的 2 倍左右。

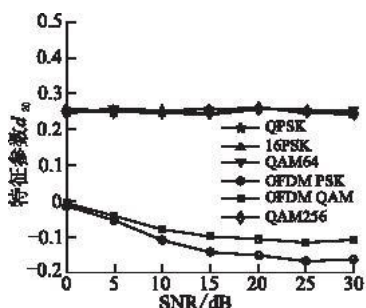


图 2 不同调制方式的特征参数 d_{20} (多径数为 2) 比较

Fig. 2 d_{20} of different modulation (multi - path number = 2)

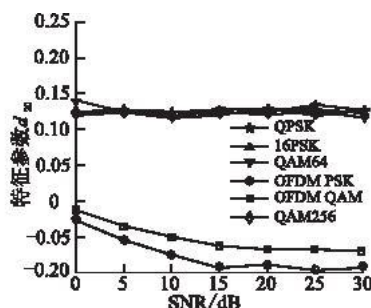


图 3 不同调制方式的特征参数 d_{20} 比较 (多径数为 4)

Fig. 3 d_{20} of different modulation (multi - path number = 4)

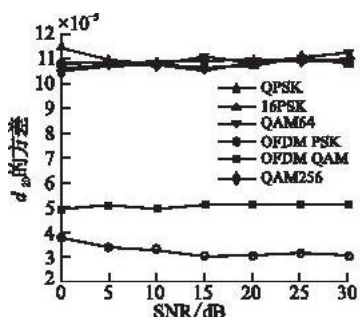


图 4 不同调制方式 d_{20} 的方差 (多径数为 2) 比较

Fig. 4 The variance of d_{20} (multi - path number = 2)

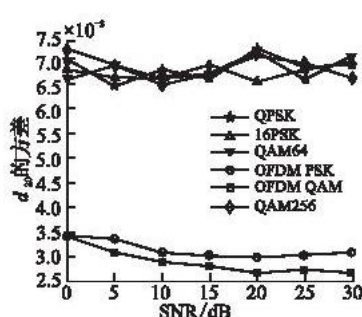


图 5 不同调制方式 d_{20} 的方差比较 (多径数为 4)

Fig. 5 The variance of d_{20} (multi - path number = 4)

图 6 和图 7 分别给出了多径数为 2 和 4 时识别率 (CCR) 随 SNR 的变化情况。可以看出,对于 QPSK、16PSK、64QAM 和 256QAM (此时具有多载波特性) 识别率均可以达到 100%;对于 OFDM 信号 (此时具有单载波特性),当 SNR 高于 5 dB 时,识别率可以达到 90% 以上。

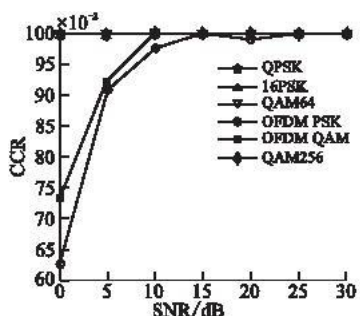


图 6 不同调制方式的识别率比较 (多径数为 2)

Fig. 6 CCR of different modulation (multi - path number = 2)

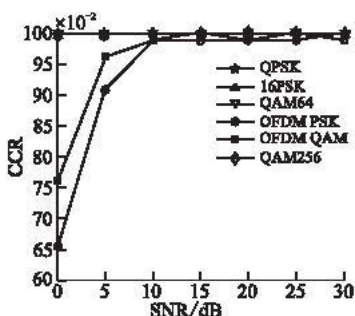


图 7 不同调制方式的识别率比较 (多径数为 4)

Fig. 7 CCR of different modulation (multi - path number = 4)

5 结论

论文提出了频率选择性衰落信道条件下基于高阶累积量的 LCP - GLSTBC - OFDM 信号识别算法,用以区分 LCP - GLSTBC 结构下的 OFDM 信号和单载波信号。该算法对中频信号直接进行识别处理,不需要信号和信道的先验知识。仿真结果表明,SNR 高于 5 dB 时识别率可达到 90% 以上。

参考文献 (References):

[1] Tarokh V, Naguib A, Seshadri N. Combined array processing and space - time coding [J]. IEEE trans inform theory, 1999, 45 (4): 1121 - 1128.

[2] Zheng L, Tse D N C. Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple - antenna channels [J]. IEEE trans inf theory, 2003, 49(5): 1073 - 1096.

[3] Dai Lin, Sfar Sana, Letiaief K B. An efficient detector for combined space - time coding and layered processing [J]. IEEE trans

commun, 2005, 53(9): 1438 – 1442.

- [4] Wang Z, Giannakis G B. Wireless multicarrier communications: where fourier meets shannon[J]. IEEE signal processing mag, 2000, 17(3): 29 – 48.
- [5] Liu Z, Xin Yan, Giannakis G B. Linear constellation precoding for OFDM with maximum multipath diversity and coding gains [J]. IEEE trans comm, 2003, 51(3): 416 – 427.
- [6] 门健, 李晓亮, 战金龙, 等. 一种新的带有预编码的 GLSTBC – OFDM 技术[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2009, 10(6): 65 – 69.
MEN Jian, LI Xiaoliang, ZHAN Jinlong, et al. GLSTBC – OFDM with linear constellation precoding over frequency – selective fading channels[J]. Journal of air force engineering university; natural science edition, 2009, 10(6): 65 – 69. (in Chinese)
- [7] Swami A, Sadler B M. Hierarchical digital modulation classification using cumulants[J]. IEEE transactions on communications, 2000, 48(3): 416 – 429.
- [8] Nandi A K, Azzouz E E. Algorithms for automatic modulation recognition of communication signals[J]. IEEE trans commun, 1998, 46(4): 431 – 436.
- [9] Mobasseri B B. Digital modulation classification using constellation shape[J]. Signal processing, 2000, 80(2): 251 – 277.
- [10] Walter Akmouche. Detection of multicarrier modulations using 4th – order cumulants[C]//Military communications conference proceedings. [S. l.]: IEEE press, 1999: 432 – 436.
- [11] Wang B, Ge Lindong. A novel algorithm for identification of OFDM signals[C]//International conference on wireless communications, networking and mobile computing. [S. l.]: IEEE press, 2005: 261 – 264.
- [12] Yucek T, Arslan H. A novel sub – optimum maximum likelihood modulation classification algorithm for adaptive OFDM systems [C]//Wireless communications and networking conference. [S. l.]: IEEE press, 2004: 739 – 744.
- [13] Chen Jian, Kuo Yonghong, Liu Xianling. Modulation identification for MIMO – OFDM signals[C]//Wireless, mobile and sensor networks. [S. l.]: IEEE press, 2007: 1013 – 1016.
- [14] Proakis J G. Digital communications [M]. New York: McGraw – hill, 2001.

(编辑: 徐楠楠)

Modulation Recognition Based on HOC for LCP – GLSTBC – OFDM Signals

ZHAN Jin – long¹, MEN Jian²

(1. Institute of Communication and Information Engineering, Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China; 2. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Based on high – order cumulates, a novel recognition algorithm is proposed for LCP – GLSTBC (Group Layered Space – Time Block Coding) OFDM (Orthogonal Frequency – Division Multiple) signals to distinguish multi – carrier modulated signals (OFDM) from single – carrier modulated signals (MPSK and MQAM). The proposed algorithm can be used to directly process inter – frequency signals without the prior information about the transmit signal and the channel noise. Simulation results confirm the validity of the proposed algorithm and show that over 90% correct classification rate could be reached when SNR is above 5 dB.

Key words: modulation recognition; high – order cumulates; OFDM; GLSTBC