

文章编号:1001-893X(2012)08-1260-05

V-BLAST OFDM 信号调制识别算法*

战金龙¹,郭永明²,卢建军¹

(1.西安邮电大学 通信与信息工程学院,西安 710061; 2.国家无线电频谱管理研究所,西安 710061)

摘要:提出了基于高阶累积量的 V-BLAST OFDM 信号识别算法,用以区分频率选择性衰落信道条件下 V-BLAST 结构的多载波信号(OFDM)和单载波信号(MFSK、MPSK、MQAM)。该算法不需要预先知道信号的载波频率、波特率以及信道的先验信息,直接在中频对信号进行识别处理。仿真结果表明该算法具有良好的识别性能。

关键词:OFDM;V-BLAST;调制识别;盲识别;高阶累积量

中图分类号:TN911.72 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.08.008

Modulation Recognition for V-BLAST OFDM Signals

ZHAN Jin-long¹, GUO Yong-ming², LU Jian-jun¹

(1. Institute of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China;

2. The National Research Institute of Radio Spectrum Management, Xi'an 710061, China)

Abstract: Based on high-order cumulants(HOC), a novel recognition algorithm is proposed for V-BLAST (Vertical Bell Labs Layered Space-Time) OFDM(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) signals to distinguish multi-carrier modulated signals(OFDM) from single-carrier modulated signals(MFSK, MPSK and MQAM). The proposed algorithm directly processes intermediate frequency signals without the prior information about the carrier frequency and symbol rate of the transmit signal and the channel. Simulation results confirm the validity of the proposed algorithm.

Key words: OFDM; V-BLAST; modulation recognition; blind recognition; high-order cumulants

1 引言

垂直分层空时结构(Vertical Bell Labs Layered Space-Time, V-BLAST)作为一种多输入多输出(Multiple-input Multiple-output, MIMO)技术,利用多个天线实现多发多收,在不需要增加频谱资源和

天线发送功率的前提下,可以成倍地提高信道容量^[1-4]。OFDM(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)技术将频率选择性衰落信道转化为若干个平坦衰落的子信道,可以有效地抵抗频率选择性衰落^[5]。因此,充分开发这两种技术的潜力,将两者结合起来的 V-BLAST OFDM 技术已成为第 4 代移动通信核心技术的解决方案,也是目前研究的热点^[6]。

* 收稿日期:2012-02-27;修回日期:2012-05-15

基金项目:国家科技重大专项基金项目(2010ZX03006-002-03);陕西省自然科学基金资助项目(1090275);陕西省教育厅科研计划项目(11JK1011);智能机器人湖北省重点实验室基金项目(HBIR 201102)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2010ZX03006-002-03); The Natural Science Foundation of Shanxi Province (No.1090275); Foundation of the Education Department of Shanxi Province (11JK1011); Foundation of Hubei Provincial Key Laboratory of Intelligent Robot(HBIR 201102)

所以,在未来的移动通信中, V - BLAST OFDM 调制信号必然是通信信号的重要组成部分。

调制信号识别能够在没有任何先验知识的条件下自动识别信号的调制方式,在多体制通信、软件无线电、电子侦察和电子监听等领域有重要作用。目前,国内外对单载波数字调制信号在加性高斯白噪声信道中的调制方式盲识别技术进行了广泛而深入的研究^[7-12],并取得了良好的识别效果,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。

本文提出了频率选择性衰落信道下基于高阶累积量的 V - BLAST OFDM 信号调制盲识别算法,对于 V - BLAST 结构,给定集合 {MFSK, MPSK, MQAM, OFDM} 进行多载波与单载波类间识别。

2 系统模型和传统的检测方法

V - BLAST 单载波信号和 V - BLAST OFDM 多载波信号发射机和接收机结构分别如图 1 和 2 所示。

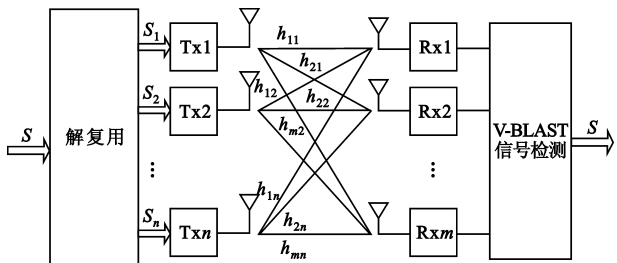


图 1 V - BLAST 单载波系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of V - BLAST single carrier system

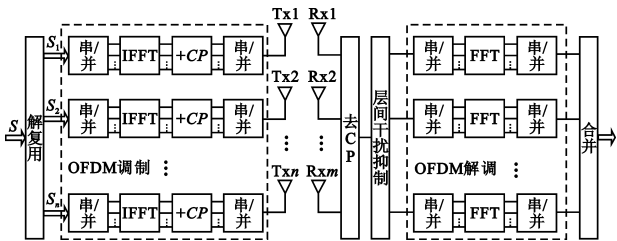


图 2 V - BLAST OFDM 多载波系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of V - BLAST OFDM system

假设发射天线个数为 n , 接收天线个数为 m 。发射的数据序列 S 解复用为 n 层, 第 i 层的数据为 S_i , 对于 V - BLAST 单载波信号 S_i 直接由第 i 个发射天线发射, 接收天线 j 接收的第 p 个 V - BLAST 单载

波信号可以表示为

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

式中, $w(j, p)$ 表示噪声分量, 服从均值为 0、方差为 σ_w^2 的高斯分布; $h_{ji}(l)$, $l = 0, 1, \dots, L - 1$ 表示第 j 个接收天线与第 i 个发射天线之间的频率选择性衰落信道的第 l 条路径的衰落系数(共 L 条多径), 服从复 Rayleigh 分布; f_d 表示 Doppler 频移。单载波信号 S 的可能集合包括 $\{s_{\text{MPSK}}(t), s_{\text{MQAM}}(t), s_{\text{MFSK}}(t)\}$, 信号表达式如下:

$$s_{\text{MPSK}} = A \sum_k c_k e^{j2\pi f_c t} g(t - kT_s) \quad (2)$$

$$s_{\text{MQAM}} = A \sum_k m_k e^{j2\pi f_c t} g(t - kT_s) \quad (3)$$

$$s_{\text{MFSK}} = A \sum_k a_k e^{j2\pi(f_c + \Delta f) t} g(t - kT_s) \quad (4)$$

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 、 a_k 表示各种调制方式的传输符号, Δf_0 为频率间隔, $g(t)$ 为脉冲成形函数。

对于 V - BLAST OFDM 信号, 第 i 层的数据为 S_i , 则需经过串/并(S/P)转换后, 变为 n 个并行的符号, 然后进行 OFDM 调制, 由第 i 个发射天线发射, 接收信号的形式与 V - BLAST 单载波信号相同。OFDM 信号的表达式为

$$s_{\text{OFDM}} = N_P \sum_k \sum_{n=0}^{N-1} s_{n,k} e^{j2\pi(f_c + \Delta f_k) t} g(t - kT_s) \quad (5)$$

$$\Delta f_k = \left[i - \left(\frac{M-1}{2} \right) \right] \Delta f_0, i = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (6)$$

式中, $s_{n,k}$ 表示 OFDM 调制前的传输符号, N 表示子载波个数。发射信号、信道衰减因子以及高斯白噪声互相独立。

3 基于高阶累积量的 V - BLAST OFDM 多载波信号调制识别

直接对接收的数字中频信号进行处理。令

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

则 $r(j, p) = v(j, p) + w(j, p)$, 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, $v(j, p)$ 的各阶矩为 $M_{2,0}(v(j, p)) = E(v^2(j, p)) =$

$$e^{j4\pi f_d p T_0} E \left(\sum_{i=1}^n \sum_{l=0}^{L-1} (h_{ji}^2(l)) (S^2(i, p - l)) \right) \quad (7)$$

$$M_{2,1}(v(j,p)) = E(v(j,p) \times v^*(j,p)) =$$

$$E\left(\sum_{i=1}^n \sum_{l=0}^{L-1} (|h_{ji}(l)|^2) (|S(i,p-l)|^2)\right) \quad (8)$$

$$M_{4,2}(v(j,p)) = E(v^2(j,p) \times (v^*(j,p))^2) =$$

$$E\left(\sum_{i=1}^n \sum_{l=0}^{L-1} (|h_{ji}(l)|^4) (|S(i,p-l)|^4)\right) \quad (9)$$

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:

$$E(h_{ji}^2) = E(\alpha_{ji}^2 + 2j\alpha_{ji}\beta_{ji} - \beta_{ji}^2) = 0 \quad (12)$$

Rayleigh 信道衰落系数 h_{ji} 具有如下特点^[14]:

$$E(|h_{ji}|^q) = (2\sigma_h^2)^{q/2} \Gamma\left(\frac{1}{2}(2+q)\right), q \geq 0 \quad (13)$$

因此,

$$M_{2,1}(h_{ji}) = E(|h_{ji}|^2) = 2\sigma_h^2,$$

$$M_{4,2}(h_{ji}) = E(|h_{ji}|^4) = 8\sigma_h^4,$$

代入式(7)~(9), $v(j,p)$ 的各阶矩可以表示为

$$M_{2,0}(v(j,p)) = 0, M_{2,1}(v(j,p)) = 2nL\sigma_h^2 E(|S|^2),$$

$$M_{4,2}(v(j,p)) = 8nL\sigma_h^4 E(|S|^4)。$$

$v(j,p)$ 的各阶累积量为

$$C_{2,0}(v(j,p)) = M_{2,0}(v(j,p)) = 0 \quad (14)$$

$$C_{2,1}(v(j,p)) = M_{2,1}(v(j,p)) =$$

$$2nL\sigma_h^2 E(|S|^2) = 2nL\sigma_h^2 M_{2,1}(S) \quad (15)$$

$$C_{4,2}(v(j,p)) = M_{4,2}(v(j,p)) -$$

$$|M_{2,0}(v(j,p))|^2 - 2M_{2,1}^2(v(j,p)) =$$

$$8nL\sigma_h^4 (E(|S|^4) - nL(E(|S|^2))^2) =$$

$$8nL\sigma_h^4 (M_{4,2}(S) - nLM_{2,1}^2(S)) \quad (16)$$

接收信号 $r(j,p)$ 的二阶累积量为

$$C_{2,1}(r(j,p)) = M_{2,1}(v(j,p)) + M_{2,1}(w(j,p)) =$$

$$2nL\sigma_h^2 M_{2,1}(S) + \sum_{i=1}^n M_{2,1}(w) \quad (19)$$

当 SNR 足够大时,噪声可以忽略。此时, $C_{2,1}(r(j,p)) \approx 2nL\sigma_h^2 M_{2,1}(S)$ 。由于高斯噪声二阶以上的累积量恒为 0,所以, $r(j,p)$ 的四阶累积量为

$$C_{4,2}(r(j,p)) = C_{4,2}(x(j,p)) =$$

$$8nL\sigma_h^4 (M_{4,2}(S) - nLM_{2,1}^2(S)) \quad (20)$$

从式(19)和(20)可以看出, $r(j,p)$ 的各阶累积量都与频率选择性衰落信道以及发射信号调制类型

有关,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:

$$d_{20} = C_{4,2}(r(j,p)) / C_{2,1}^2(r(j,p)) =$$

$$\frac{2}{nL} (M_{4,2}(S) - nLM_{2,1}^2(S)) / M_{2,1}^2(S) \quad (21)$$

根据文献[13]单发单收下 d_{20} 的结果,不难计算本文 4 个发射天线, $d_{20}(\text{OFDM}) = 0.5/L$, $d_{20}(\text{MF-SK}) = 0$, $d_{20}(\text{MPSK}) = 0$, $d_{20}(64\text{QAM}) = 0.189/L$, $d_{20}(128\text{QAM}) = 0.176/L$ 。此时的门限值应设为 $(0.5 + 0.189)/(2 \times L)$, 即当高于该门限时就认为是 OFDM 调制,否则为单载波调制。然而,计算 $r(j,p)$ 的二阶累积量 $C_{2,1}(r(j,p))$ 时忽略了噪声能量,因此各调制方式的 d_{20} 值实际上都略小于上面计算的理论值,因此门限值需设置得略小,这里设置为 $(0.5 + 0.189)/(3 \times L)$ 。

算法流程如图 3 所示。可以看出,算法中最重要的步骤就是上面提出的计算各种调制方式的特征参数 d_{20} 。

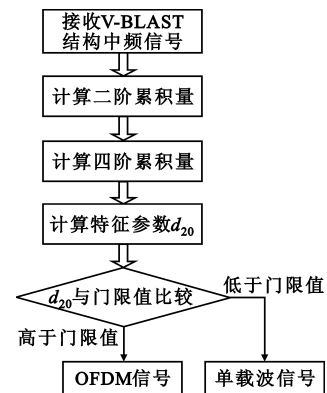


图 3 V-BLAST OFDM 多载波信号识别算法流程图

Fig.3 Flow chart of the proposed recognition algorithm

4 仿真结果

仿真条件如下:以 4 发 4 收的 V-BLAST 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 调制,进行 500 次的 Monte-Carlo 实验,SNR 的变化范围为 0~30 dB,噪声为均值为 0、方差为 $\sigma_h^2 = 1$ 的复高斯随机变量。

图 4 和图 5 分别给出了多径数为 1(平坦衰落)时特征参数 d_{20} 和识别率(CCR)随 SNR 的变化情况。

可以看出, d_{20} 值与理论计算结果一致; 对于 2FSK、QPSK、16PSK、64QAM 和 128QAM 识别率均可以达到 100%; 对于 OFDM 信号, 当 SNR 高于 5 dB 时, 识别率可以达到 95% 以上。

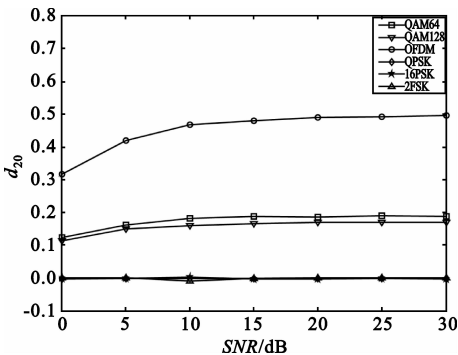


图 4 不同调制方式的特征参数 d_{20} 比较 ($L = 1$)
Fig.4 d_{20} of different modulations vs SNR ($L = 1$)

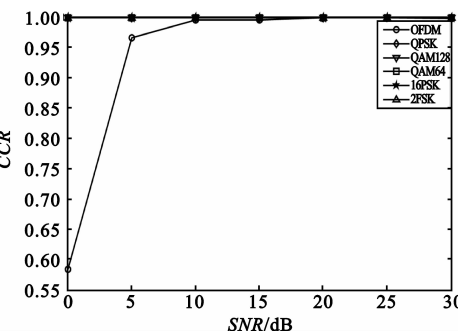


图 5 不同调制方式的识别率比较 ($L = 1$)
Fig.5 CCR of different modulations vs SNR ($L = 1$)

图 6 和图 7 分别给出了多径数为 2 时特征参数 d_{20} 和 CCR 随 SNR 的变化情况。可以看出, d_{20} 值与理论计算结果一致; 此时, 由于各种调制方式 d_{20} 值都较小, 因此, 识别率有所降低, 对于 OFDM 信号, 当 SNR 高于 15 dB 时, 识别率可以达到 95% 以上。

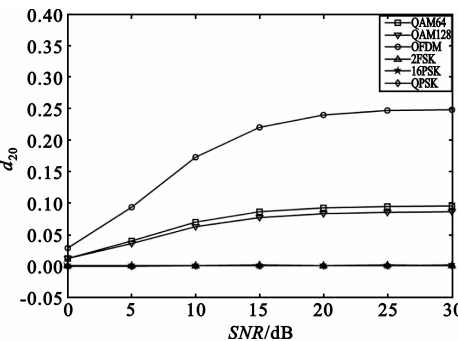


图 6 不同调制方式的特征参数 d_{20} 比较 ($L = 2$)
Fig.6 d_{20} of different modulations vs SNR ($L = 2$)

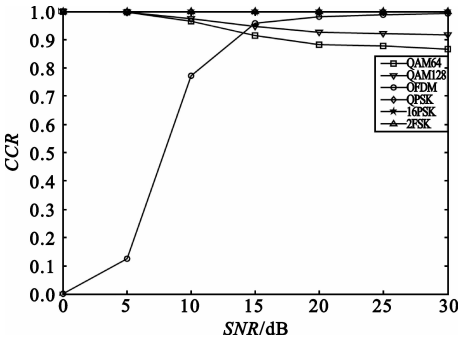


图 7 不同调制方式的识别率比较 ($L = 2$)
Fig.7 CCR of different modulations vs SNR ($L = 2$)

5 结 论

针对频率选择性衰落信道条件下 V - BLAST 结构多载波信号盲识别问题, 本文提出了一种有效的基于高阶累积量的识别算法, 该算法直接从接收的中频信号进行处理, 在信道多径数较小时, 具有较高的识别率; 随着多径数的增加, 各种调制方式的特征参数都趋于 0, 识别率也随之降低。因此, 还需进一步研究新的特征参数。

参考文献:

[1] Foschini G J. Layered space - time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi - element antennas[J]. Bell Labs Technical Journal, 1996, 1 (2):41 - 59.

[2] Wolniansky P W, Foschini G J. V - BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich - scattering wireless channel[C]//Proceedings of 1998 IEEE International Symposium on Signals, Systems, and Electronics. Pisa, Italy: IEEE, 1998: 295 - 300.

[3] Liu Lingjia, Chen Runhua, Stefan G, et al. Downlink MIMO in LTE - Advanced: SU - MIMO vs. MU - MIMO[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(2): 140 - 147.

[4] Dipankar R, Narayan B M. Frontiers of Wireless and Mobile Communications[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100 (4):824 - 840.

[5] Gordon L S, John R B, McLaughlin S W. Broadband MIMO - OFDM Wireless Communications[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(2): 271 - 294.

[6] Yan Wu, Sun Sumei, Lei Zhongding. A Low Complexity VBLAST OFDM Detection Algorithm for Wireless LAN Systems [J]. IEEE Communication Letters, 2004, 8(6): 374 - 376.

[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 Transactions on Communications, 1998, 46(4):431 – 436.
- [9] Mobasser B B. Digital modulation classification using constellation shape[J]. Signal Processing, 2000, 80(2): 251 – 277.
- [10] Akmouche W. Detection of multicarrier modulations using 4th – order cumulants[C]// Proceedings of 1999 IEEE Military Communications Conference. Atlantic, USA: IEEE, 1999: 432 – 436.
- [11] Wang Bin, Ge Lindong. A novel algorithm for identification of OFDM signals[C]// Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 261 – 264.
- [12] Yucek T, Arslan H. A novel sub – optimum maximum likelihood modulation classification algorithm for adaptive OFDM systems[C]// Proceedings of 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Atlanta, USA: IEEE, 2004: 739 – 744.
- [13] Chen Jian, Kuo Yonghong, Liu Xianling. Modulation Identification for MIMO – OFDM Signals[C]// Proceedings of 2007 IET Conference on Wireless, Mobile and Sensor Networks. Shanghai: IEEE, 2007: 1013 – 1016.
- [14] Proakis J G. Digital communications[M]. 4th ed. New York: McGraw – Hill Press, 2001.

作者简介:

战金龙(1979—),男,山东荣成人,2007 年于西安电子科技大学获博士学位,现为讲师,主要研究方向为 MIMO、OFDM 技术以及多载波信号识别;

ZHAN Jin-long was born in Rongcheng, Shandong Province, in 1979. He received the Ph.D. degree from Xidian University in 2007. He is now a lecturer. His research concerns MIMO, OFDM and multi – carrier signal identification techniques.

Email: zjl_8855@163.com

郭永明(1966—),男,陕西西安人,2010 年于西安电子科技大学获博士学位,现为教授级高级工程师,主要研究方向为频谱管理、信号识别;

GUO Yong-ming was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1966. He received the Ph.D. degree from Xidian University in 2010. He is now a senior engineer of professor. His research concerns spectrum management and signal identification.

Email: ym_guo@126.com

卢建军(1962—),男,山东兖州人,1984 年于北京邮电大学获硕士学位,现为教授,主要研究方向为现代移动通信中的信号处理、专用移动通信系统。

LU Jian-jun was born in Yanzhou, Shandong Province, in 1962. He received the M.S. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 1984. He is now a professor. His research concerns signal processing in modern mobile communications and special mobile communication systems.

Email: lj@163.com