

## 多频带正交频分复用系统的双载波 32-QAM 调制技术\*

杨润丰<sup>1</sup>, 李铭钊<sup>2</sup>

(1. 东莞职业技术学院电子工程系, 广东 东莞 523808;

2. 中国电子信息产业集团有限公司, 北京 100846)

**摘要:** 四相相移键控信号(QPSK)和双载波调制(DCM)是目前使用在由 ECMA-368 标准所定义的基于多频带正交频分复用技术的超宽带无线电平台中的调制方案。为了传输高速率数据, ECMA-368 可提供高达 480 Mb/s 的瞬时比特率给媒体访问控制层。但由于无线电信道存在着不稳定因素致使数据包丢失, 从而产生较低的吞吐量。提出一种高数据速率的双载波 32-QAM 调制方案, 适合配置在现行标准的基础上提高系统吞吐量。

**关键词:** 多频带正交频分复用; 频率分集; 双载波 32-QAM

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)08-0058-04

## Dual carrier 32-QAM for MB-OFDM system

Yang Runfeng<sup>1</sup>, Li Mingzhao<sup>2</sup>

(1. Electronic Engineering Department, Dongguan Polytechnic, Dongguan 523808, China;

2. China Electronics Corporation, Beijing 100846, China)

**Abstract:** Quadrature phase shift keying(QPSK) and dual carrier modulation(DCM) are the current modulation scheme for ECMA-368 defined multiband orthogonal frequency division multiplexing(MB-OFDM) UWB radio platform. To transmit high data rate, ECMA-368 offers up to 480 Mb/s instantaneous bit rate to media access layer. However radio channel conditions causes dropped packets unfortunately result in a lower throughput. This paper presents a modulation called dual carrier 32-QAM that fits within the configuration of the current standard increasing system throughput.

**Key words:** MB-OFDM; frequency diversity; dual carrier 32-QAM

超宽带无线电平台已被计划用于对占用较大带宽的无线通信系统进行标准化, 特别是在无线个人局域网中使用的无线通信设备, 以取代亿万条数据线的使用。在 2002 年, 美国联邦通讯委员会(FCC)批准了免授权使用的 3.1 GHz~10.6 GHz(共 7 500 MHz)频带向 UWB 设备开放并限定了超宽带的有效等向辐射功率为 -41.3 dBm/MHz。在 2005 年, WiMedia 联盟与 ECMA 国际组织合作并宣布建立以 WiMedia 联盟的多频带正交频分复用(MB-OFDM)技术方案的超宽带无线电平台作为全球的超宽带标准。ECMA-368<sup>[1]</sup>被选择为高数据速率的无线电平台标准, 用于实现高速无线通用串行总线、快速蓝牙以及无线高清多媒体接口。

以 ECMA-368 标准的多频带正交频分复用系统采

用正交相移键控(QPSK)和双载波调制(DCM)作为调制方案。ECMA-368 可提供高达 480 Mb/s 的瞬时比特率的高速率传输模式。然而在实际环境中最大数据传输速率 480 Mb/s 无法实现, 这是因为无线电频率条件不稳定, 导致数据包被丢弃, 需要重新发送被丢弃的数据包, 造成吞吐量较低。为了提高比特率, 并在实际的系统中适量丢包情况下保证有效的 480 Mb/s 性能, 16-QAM 可以用作一种替代 DCM 的调制方案来增加系统的吞吐量。然而, 使用 16-QAM 只能以速率 640 Mb/s 完成近 1 m 的传输。本文提出一种低成本、高性能的调制方案, 称为双载波 32-QAM, 并根据 ECMA-368 中的要求进行测试, 使超宽带系统的吞吐量得以提高。

\* 基金项目: 东莞市高等院校科研机构科技项目(2011108102061)

# 网络与通信 Network and Communication

## 1 ECMA-368 标准的 MB-OFDM

ECMA-368 标准指定了超宽带系统占用 14 个子频段。每个子频段为 528 MHz 的 OFDM 符号。每个 OFDM 符号由计算 128 点快速傅里叶逆变换 (IFFT) 输出组成,也就是 128 个子载波,其中包括 100 个数据子载波、12 个导频子载波、6 个零值和 10 个保护子载波。10 个保护子载波用于减少符号间干扰 (ISI),位于 OFDM 符号的两边缘与最外面的 5 个数据子载波有相同的值。利用保护子载波可以作为另一形式的时间和频率分集来提高接收机性能<sup>[2]</sup>。

物理层汇聚协议 (PLCP) 用于完成物理层对媒体访问控制层的接口服务,并为物理层服务数据单元 (PSDU) 转换物理层汇聚协议数据单元 (PPDU) 提供了合适方法。故使 PPDU 由 PLCP 前导符 PLCP 包头和 PSDU 三部分组成并按照传输顺序排列。为了传输一个包含信息的 PSDU, ECMA-368 应用了不同层次的编码和不同类型的复用构造造成 8 个传输模式,以 53.3 Mb/s、80 Mb/s、106.7 Mb/s、160 Mb/s、200 Mb/s、320 Mb/s、400 Mb/s 和 480 Mb/s 不同的速率向媒体访问控制层传送。比特流经过比特交织后,把这些已编码和交织的二进制数据序列映射到一个 QPSK 或者 DCM 调制的星座图上。由此产生的复数装载到由 IFFT 生成的和 OFDM 符号的数据子载波上。图 1 和图 2 分别描绘了侧流扰码后的 PSDU 的编码和解码过程。系统的接收机中应用了低成本、简单而高效的信道估计和均衡器解决方案<sup>[3]</sup>。



图 1 侧流扰码的 PSDU 在发射机中的编码过程



图 2 侧流扰码的 PSDU 在接收机中的解码过程

## 2 双载波 32-QAM

### 2.1 双载波 32-QAM 调制

当数据速率为 320 Mb/s、400 Mb/s 和 480 Mb/s 时,使用四维星座图的 DCM 可实现的系统性能约 3.8 m 480 Mb/s<sup>[4]</sup>。矩形格雷编码的 16-QAM 可以用作调制方案来增加系统的吞吐量(从 640 Mb/s~960 Mb/s)。然而,在多径传输的干扰下完全不能实现 960 Mb/s 速率的传输,或以 640 Mb/s 速率却仅能完成近 1 m 的传输。

既然 16-QAM 调制不适合多频带正交频分复用系统的高速率传输,那么更高阶调制方式,如 32-QAM、64-QAM 等就更不用考虑了。双载波 32-QAM 调制适用于现有 ECMA-368 标准的结构,使更多的信息比特映射到一个 OFDM 符号中,同时也能提供足够的欧几

里德符号距离来维持在较高的传输速率,使数据在多径环境中成功传输。经过位交织处理后,1 500 个已编码和交织位需要被划分成 250 位为一组,然后再组合成 50 组,每组 5 位重新排序。每一组的 5 位表示为:

$$g(k) = \begin{cases} (b_{g(k)}, b_{g(k)+50}, b_{g(k)+51}, b_{g(k)+100}, b_{g(k)+101}) & k \in [0, \dots, 24] \\ (2k, 2k+50) & k \in [25, \dots, 49] \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $k \in [0, \dots, 49]$ ,  $(b_{g(k)+50}, b_{g(k)+51}, b_{g(k)+100}, b_{g(k)+101})$  交错映射到两个 QPSK 符号—— $(x_{g(k)} + jx_{g(k)+50})$  和  $(x_{g(k)+1} + jx_{g(k)+51})$ , 如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} (x_{g(k)} + jx_{g(k)+50}) \\ (x_{g(k)+1} + jx_{g(k)+51}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (2b_{g(k)+50-1} + j(2b_{g(k)+100-1})) \\ (2b_{g(k)+51-1} + j(2b_{g(k)+101-1})) \end{bmatrix} \quad (2)$$

这两对比特位不是连续顺序的比特流。 $b_{g(k)+50}$  和  $b_{g(k)+100}$  映射到一个 QPSK 符号,而  $b_{g(k)+51}$  和  $b_{g(k)+101}$  映射到另一个 QPSK 符号,以进一步实现位交织来应对突发误码。根据  $b_{g(k)}$  的值把这两个 QPSK 符号调制到两个双载波 32-QAM 符号  $(y_{T(k)}, y_{T(k)+50})$  中,如式(3)所示,其中  $K_{MOD} = 1/\sqrt{6.175}$  是常化因子。

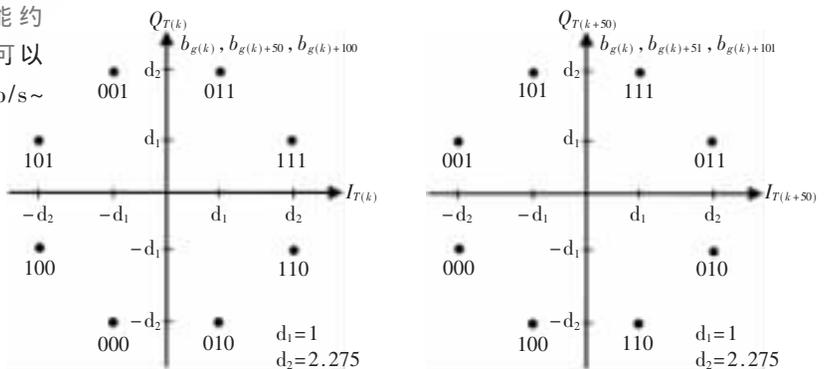
$$\begin{bmatrix} y_{T(k)} \\ y_{T(k)+50} \end{bmatrix} = K_{MOD} \begin{bmatrix} \alpha x_{g(k)} + j\beta x_{g(k)+50} \\ \beta x_{g(k)+1} + j\alpha x_{g(k)+51} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$\alpha = \begin{cases} 1, & b_{g(k)} = 0 \\ 2.275, & b_{g(k)} = 1 \end{cases} \quad \beta = \begin{cases} 2.275, & b_{g(k)} = 0 \\ 1, & b_{g(k)} = 1 \end{cases}$$

每个双载波 32-QAM 符号在星座图中有相等区域给对应的信息位。双载波 32-QAM 调制在两个 OFDM 数据子载波中有两个不同的星象映射图,如图 3 所示。此外,星座点定位在圆形的位点上,可提供恒定功率到每个双载波 32-QAM 符号,这意味着对自动增益控制和模拟数字转换器较低幅度冲击的影响。

两个双载波 32-QAM 符号  $(y_{T(k)}, y_{T(k)+50})$  被分配到相隔 50 个子载波的两个独立 OFDM 数据子载波上来实现频率分集,如图 4 所示。128 点的 IFFT 模块需要 100 个双载波 32-QAM 符号组成一个 OFDM 符号。DCM 调制技术利用频率分集能有良好的性能提升<sup>[5]</sup>。双载波 32-QAM 也将使用大带宽隔离以实现频率分集。每个 OFDM



(a) 对  $y_{T(k)}$  符号的映射 (b) 对  $y_{T(k)+50}$  符号的映射

图 3 双载波 32-QAM 星象图映射

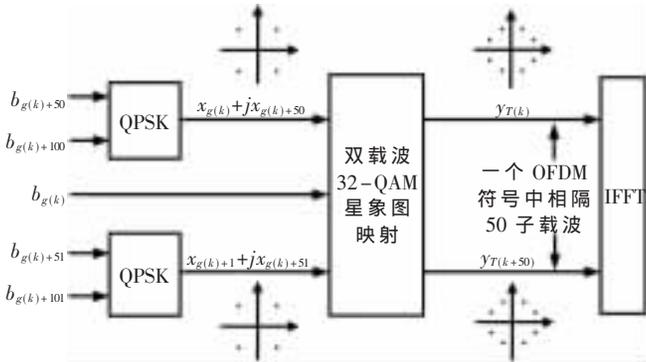


图4 双载波 32-QAM 调制过程

子载波占用的带宽约为 4 MHz, 与两个复数  $(I_{T(k)}, Q_{T(k)})$  和  $(I_{T(k+50)}, Q_{T(k+50)})$  相关的两个 OFDM 数据子载波之间的带宽至少有 200 MHz, 因此所产生的频率分集能更有效地对抗信道深衰落, 将有利于恢复交错映射到两个双载波 32-QAM 符号中的 5 个信息位。

## 2.2 双载波 32-QAM 解调

通过均衡得到的两个复数值对应于发射时不同的数据子载波, 由双载波 32-QAM 利用软比特方法进行解映射得到 5 位软比特, 然后按顺序输出 250 位的软比特组。映射和位交织还原得到的软比特通过维特比译码器来恢复原始的信息位。  $b_{g(k)+50}, b_{g(k)+51}, b_{g(k)+100}, b_{g(k)+101}$  中每一位的软比特值完全对应于 I/Q 的幅度。除此之外, 每个软比特根据它们相对应的  $(I_{R(k)}, Q_{R(k)})$  和  $(I_{R(k+50)}, Q_{R(k+50)})$  符号进行映射还原。不使用归一化因子不影响映射还原的效果。对  $y_{R(k)}$  进行映射还原的方法是: 如果接收的符号是其靠近于 I 轴的星象图定点, 映射还原值可认作为 '1'; 如果接收的符号是其靠近于 Q 轴的星象图定点, 映射还原值可认作为 '0'。然而, 对  $y_{R(k+50)}$  进行映射还原的方法是, 如果接收的符号是其靠近于 I 轴的星象图定点, 映射还原值可认作为 '0'; 如果接收的符号是其靠近于 Q 轴的星象图定点, 映射还原值可认作为 '1'。  $b_{g(k)}$  所占区域在两个星象图的映射是不同的, 对  $y_{R(k)}$  和  $y_{R(k+50)}$  所对应 I 和 Q 的值不能直接合并。因此, 先对所在映射区域每一个接收的符号的欧几里得进行度量, 然后把两个欧几里得的度量值相加作为  $b_{g(k)}$  的软比特值。

在 OFDM 调制中, OFDM 子载波受到不同的影响, 如回声、强衰落等。特别是在处理频域均衡时噪声的影响会降低解映射的软判断。每个 OFDM 子载波有一个可靠动态值的估算, 称为信道状态信息 (CSI), 可提高信道解码器的纠错性能<sup>[4]</sup>。每个数据子载波存在不同的 CSI, 它们是基于相应频率的信道功率的估算。每个数据的载波在不同频带传输时有着不同的 CSI。映射到两个符号的  $b_{g(k)}$  被调制为两个 OFDM 数据子载波, 产生与两个 OFDM 数据子载波相关的两个 CSI 值。如果一个较小或较大的 CSI 值被选择作为一个可靠的比例项, 会导致不同 OFDM 数据子载波信号功率的不平等。采用 CSI 的平均值赋予  $b_{g(k)}$ 。双载波 32-QAM 由 CSI 辅助解映射得到的

5 个软比特的公式如下所示:

$$\text{Soft}(b_{g(k)}) = \frac{1}{2} \times [\sqrt{(|I_{R(k)}| - d_1)^2 + (|Q_{R(k)}| - d_2)^2} - \sqrt{(|I_{R(k)}| - d_2)^2 + (|Q_{R(k)}| - d_1)^2} + \sqrt{(|I_{R(k+50)}| - d_1)^2 + (|Q_{R(k+50)}| - d_2)^2} - \sqrt{(|I_{R(k+50)}| - d_2)^2 + (|Q_{R(k+50)}| - d_1)^2}] \times \left[ \frac{CSI_k + CSI_{k+50}}{2} \right] \quad (4)$$

$$\text{Soft}(b_{g(k)+50}) = I_{R(k)} \times CSI_k \quad (5)$$

$$\text{Soft}(b_{g(k)+51}) = I_{R(k+50)} \times CSI_{k+50} \quad (6)$$

$$\text{Soft}(b_{g(k)+100}) = Q_{R(k)} \times CSI_k \quad (7)$$

$$\text{Soft}(b_{g(k)+101}) = Q_{R(k+50)} \times CSI_{k+50} \quad (8)$$

## 3 系统性能测量与比较

### 3.1 测试配置

该系统是在 Foerster 的信道模型 1 (CM1)<sup>[6]</sup> 中具有现实性多径信道环境的 100 个信道进行模拟仿真, 并要与 ECMA-368 测试的要求一致。所有仿真结果平均取值于超过 2 000 个数据包的传输, 其中在 PSDU 里的每个数据包要有 1 024 B, 并取 90% 信道作为有效结果 (舍去最差的 10% 信道实现结果)。链接成功的概率被定义为系统在 90% 信道中可以成功地获得和解调包, 所得的误包率小于 8% (若有一个比特错误, 一个数据包为接收错误)<sup>[7]</sup>。在定点运算的系统里严格地遵守系统时序要求, 使用时间频率码 (TFC=1) 的跳频特性, 加入 2.5 dB 的实现损耗<sup>[7]</sup>。

### 3.2 16-QAM、双载波 32-QAM 与 DCM 的系统性能比较

为了比较 16-QAM、双载波 32-QAM 和 DCM 调制技术的性能, 需设置相同的系统编码率。在改变调制和相应的位交织方式的情况下, 采用 16-QAM 能提高系统吞吐量到 640 Mb/s, 采用双载波 32-QAM 吞吐量为 600 Mb/s, 而采用 DCM 吞吐量为 480 Mb/s。从图 5 可以看出, 双载波 32-QAM 能成功传输并接近 DCM 的性能。若使用 16-QAM 在 960 Mb/s 速率传输就不实现链接。或者通过改变编码模式来降低数据速率, 使用 16-QAM 的系统传输距离仅为 1.2 m。若使用双载波 32-QAM 能实现系统传输距离为 3.4 m, 接近于 DCM 的 3.8 m 480 Mb/s。在多径环境下传输, 尽管会有适量的数据包丢失也能使有效速率达到 480 Mb/s。

ECMA-368 给高速无线个人局域网提供了一个功能

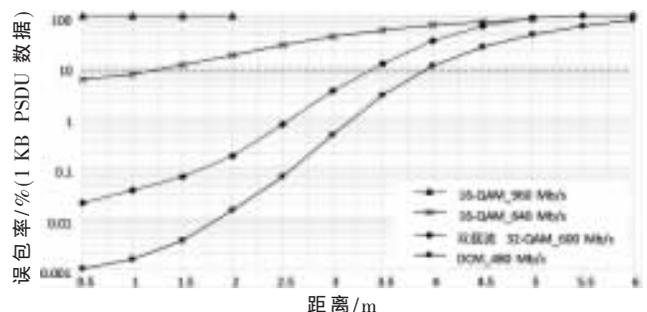


图5 16-QAM、双载波 32-QAM 和 DCM 的系统性能比较

## 网络与通信 Network and Communication

强大的无线传输解决方案和低成本的无线服务。要创建一个市场可以接受的 ECMA-368 解决方案,设备不仅要符合标准,还需要成本效益和低功耗、高性能的解决方案。本文提出了改善成本效益和高性能的调制方案,双载波 32-QAM 可适用在 ECMA-368 的配置中。此调制方案在 3.4 m 的多径环境中的成功链接,使系统的吞吐量提高到 600 Mb/s, 还保持输出恒定的调制符号能量,这有利于自动增益控制和模拟数字转换器的工作。

### 参考文献

- [1] ECMA International. ECMA-368: high rate ultra wideband PHY and MAC standard[S]. 2008.
- [2] SHERRATT R S, YANG R A. A dual QPSK soft-demapper for multiband OFDM exploiting time-domain spreading and guard interval diversity[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2007, 53(1): 46-49.
- [3] 杨润丰, 卞建勇, 杨洋. 适用于 MB-OFDM 系统的高效均衡器[J]. 硅谷, 2011(3): 163-165.
- [4] Yang Runfeng, SHERRATT R S. Multiband OFDM modulation and demodulation for ultra wideband communications[C]. in:

Novel Applications of The UWB Technologies, Croatia, InTech, 2011.

- [5] YANG R, SHERRATT R S. Dual carrier modulation demapping methods and performances for Wireless USB[C]. the 9th Annual Postgraduate Symposium(PGNET 2008), Liverpool, UK, 2008.
- [6] FOERSTER J. Channel modeling sub-committee report final [C]. IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks(WPANs), IEEE P802.15-02/490-SG3a. 2003.
- [7] Multiband OFDM Alliance Special Interest Group. Multiband OFDM physical layer proposal for IEEE 802.15.3a[S]. IEEE P802.15-03/268r3, 2004.

(收稿日期: 2011-12-18)

### 作者简介:

杨润丰,男,1979年生,讲师,博士,主要研究方向:数字信号处理、无线通信、超宽带。

李铭钊,男,1980年生,工程师,硕士,主要研究方向:系统工程。

风之科技  
APPLICATION OF ELECTRONIC TECHNOLOGY  
www.ChinaAET.com