

# OFDM-IJF-OQPSK 调制体制

赵海龙, 张健, 周劼

中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川绵阳 621900

**摘要** 针对正交频分复用 (OFDM) 信号带外衰减小的缺点, 用功率谱密度分布更为集中的无码间干扰和抖动-交错正交相移键控 (IJF-OQPSK) 调制代替传统的多进制数字相位调制 (MPSK) 或多进制正交幅度调制 (MQAM) 对子载波进行调制, 形成了 OFDM-IJF-OQPSK 调制体制。在分析 OFDM 及 IJF-OQPSK 原理的基础上, 给出了 OFDM-IJF-OQPSK 调制方案, 推导了该调制信号的功率谱密度, 得知其功率谱密度为 IJF-OQPSK 基带功率谱以子载波间隔平移并相加所得。最后, 进行了仿真分析, 证明该调制体制带外衰减很快, 降低了带外辐射。

**关键词** 正交频分复用; 无码间和相位抖动; 加窗; 调制

**中图分类号** TN911.3

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)21-0034-03

## OFDM-IJF-OQPSK Modulation Scheme

ZHAO Hailong, ZHANG Jian, ZHOU Jie

*Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan Province, China*

**Abstract** Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) suffers from high out-of-band radiation. In this paper, an OFDM-IJF-OQPSK modulation scheme is proposed. Every subcarrier of this scheme is modulated with Intersymbol Interference and Jitter Free-Offset Quadrature Phase Shift Keying (IJF-OQPSK), instead of Multi-level Phase Shift Keying (MPSK) or Multi-level Quadrature Amplitude Modulation (MQAM). On the basis of analyzing OFDM and IJF-OQPSK principle, OFDM-IJF-OQPSK modulation scheme is presented firstly, and then its Power Spectrum Density (PSD) is derived. It is shown that the final PSD is the summation of all the IJF-OQPSK baseband PSDs at all subcarriers of OFDM. Finally, the performance is analyzed by computer simulation and the results show that the out-of-band radiation of this modulation scheme can be reduced significantly.

**Keywords** orthogonal frequency division multiplexing; interference and jitter-free; windowing; modulation

### 0 引言

正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 作为一种有效对抗多径衰落信道的调制技术, 对恶劣信道环境的适应性强, 避免了高速率多抽头的信道均衡器设计, 且频谱利用率高, 可以有效对抗信号波形间的干扰, 适用于多径环境和衰落信道中的高速数据传输<sup>[1]</sup>。在 OFDM 系统中, 子载波常采用多进制数字相位调制 (MPSK) 或者多进制正交幅度调制 (MQAM) 进行调制, 这种调制信号由于子载波旁瓣较大导致带外衰减较慢, 增大了带外功率辐射。文献 [1]~[2] 对发射信号进行时域加窗, 以减小 OFDM 带外功率辐射, 但因此降低了 OFDM 符号对时延扩展的容忍程度, 使保护间隔的有效长度减小。文献 [3] 提出多项式抑制编码 OFDM (PCC-OFDM) 信号, 意在发送端把信息符

号通过不同的加权因子映射到相邻的  $L$  个子载波上, 然后在接收端对  $L$  个子载波上的接收信号进行线性合并。这种方法可以有效衰减带外功率, 但会降低整个系统的吞吐率。文献 [4]~[5] 分别通过插入抵消子载波和对子载波加权降低 OFDM 系统的带外辐射, 但这两种方法会导致信噪比损失。

本文提出一种 OFDM 无码间干扰和抖动-交错正交相移键控 (IJF-OQPSK) 调制体制, 对系统中每个子载波采用无符号间干扰和抖动、功率谱密度分布集中的 IJF-OQPSK 调制, 并通过理论与仿真分析, 验证了该调制体制的合理性。

### 1 IJF-OQPSK 和 OFDM 调制原理

#### 1.1 IJF-OQPSK 调制原理

IJF-OQPSK 调制方式是先将输入的数据序列进行分路,

收稿日期: 2010-08-23; 修回日期: 2010-09-27

基金项目: 国家自然科学基金-中国工程物理研究院联合基金项目 (10876103)

作者简介: 赵海龙, 博士研究生, 研究方向为 OFDM 技术, 电子信箱: zhaohailong\_029@126.com.cn; 张健 (通信作者), 研究员, 研究方向为电子信息对抗与无线电测控, 电子信箱: zhjmy@263.net

然后对每一路的数据进行 IJF 编码,形成 IJF 基带信号,再进行 OQPSK。IJF-OQPSK 也是一种 I、Q 信道相关的正交调制技术<sup>[6-7]</sup>,其关键在于产生 IJF 编码信号,其余与 OQPSK 完全一致,调制原理见图 1。其中 IJF 编码用脉冲成形器进行冲激响应,由升余弦脉冲构成基带随机信号。响应公式为<sup>[8]</sup>

$$p(t) = \begin{cases} 0.5[1 + \cos(\pi t/T_s)] & |t| \leq T_s \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $T_s$  为符号持续期,  $p(t)$  为双码元间隔的升余弦脉冲,时限双码元间隔脉冲的一种,其滚降系数  $\alpha=1$ 。分析双码元间隔升余弦脉冲可知,  $p(t)$  为一偶函数,且满足以下条件:

$$\begin{cases} p(t) + p(t-T_s) = 1 \\ p(t) - p(t-T_s) = \cos(\pi t/T_s) \end{cases} \quad (2)$$

可以得到 I 路的 IJF 基带信号表达式为

$$s_1(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} d_{1,n} p(t-nT_s) = \sum_{n=0}^1 d_{1,n} p(t-nT_s) \quad (3)$$

其中,  $d_{1,n}$  为 I 路第  $n$  个发送的二进制序列,取值  $\pm 1$ 。Q 路 IJF 基带信号表达与式(3)相同, IJF-OQPSK 基带功率谱密度为

$$G(f) = 2T_s \left[ \frac{\sin(2\pi f T_s)}{2\pi f T_s (1-4f^2 T_s^2)} \right]^2 \quad (4)$$

其中  $f$  为载波频率。

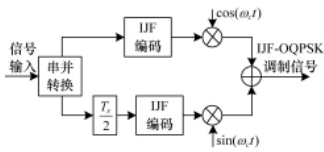


图 1 IJF-OQPSK 调制原理

Fig. 1 IJF-OQPSK modulation principle

### 1.2 OFDM 调制原理

调制后的 OFDM 符号是多个经过调制的子载波信号之和,一般情况下,子载波的调制方式可选择 MPSK 或 MQAM。如果  $N$  表示子载波个数,  $T$  表示 OFDM 符号宽度,  $d_i (i=0, 1, 2, \dots, N-1)$  表示分配给子信道的数据符号,  $f_i$  表示第  $i$  个子载波的载波频率,  $\text{rect}(t)$  表示一个中心在零点,时长为  $T$  且幅度为 1 的矩形方波,则从起始时刻  $t_s$  开始 OFDM 复等效基带信号可表示为

$$s(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{N-1} d_i \text{rect}\left(t - t_s - \frac{T}{2}\right) e^{j2\pi f_i (t-t_s)} & t_s \leq t \leq t_s + T \\ 0 & t < t_s, t > t_s + T \end{cases} \quad (5)$$

由式(5),周期  $T$  内每个 OFDM 符号包含多个非零子载波,其频谱可看作周期为  $T$  的矩形脉冲频谱与一组位于各子载波频率的  $\delta$  函数的卷积。矩形脉冲频谱幅值为  $\text{sinc}(fT)$ ,零点出现于  $1/T$  整数倍上(图 2)。在每个子载波频率最大值处,

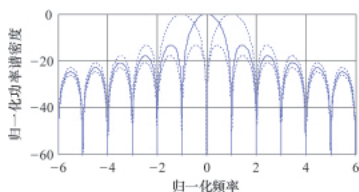


图 2 QPSK 功率谱密度

Fig. 2 QPSK power spectral density

其他子载波频谱恰好为 0,故可从多个相互重叠的子信道符号频谱中提取每个子信道符号,且不受其他子信道干扰。

### 2 OFDM-IJF-OQPSK 调制方案

正确解调 OFDM 调制信号,须保证 OFDM 每个子载波相互正交,这样每个子载波的频谱必须类似于 sinc 函数,即在每个子载波频率最大处,所有其他子载波频谱值为 0。从式(4)可知, IJF-OQPSK 基带功率谱密度满足以上要求,见图 3。

因此得到 OFDM-IJF-OQPSK 调制原理框图如图 4 所示,将输入信号进行串并转换,并进行 IJF-OQPSK 调制,之后使用正弦子载波调制并相加得到 OFDM-IJF-OQPSK 调制信号。

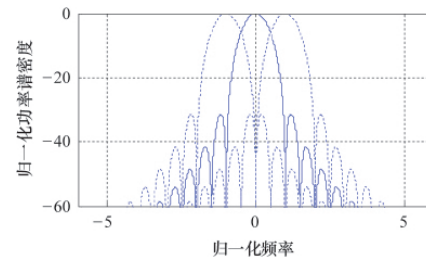


图 3 IJF-OQPSK 功率谱密度

Fig. 3 IJF-OQPSK power spectral density

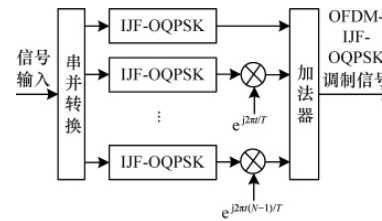


图 4 OFDM-IJF-OQPSK 调制原理

Fig. 4 OFDM-IJF-OQPSK modulation principle

### 3 性能分析

#### 3.1 理论分析

下面将分别对 OFDM-MPSK 与 OFDM-IJF-OQPSK 调制功率谱密度的解析表达式进行数学推导。对于 OFDM-MPSK 调制体制,每个子载波采用 MPSK 调制,OFDM 信号如式(5)所示,其功率谱密度  $S(f)$  为信号自相关函数  $R(\tau)$  的傅里叶变换,  $s(t)$  的自相关函数  $R(\tau)$  为

$$\begin{aligned} R(\tau) &= E\{s(t+\tau)s^*(t)\} = E\{\text{rect}(t+\tau)\text{rect}(t)\} \sum_{i=0}^{N-1} E\{|d_i|^2\} e^{j2\pi f_i \tau} \\ &= \bar{R}(\tau) \sum_{i=0}^{N-1} E\{|d_i|^2\} e^{j2\pi f_i \tau} \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $E\{|d_i|^2\} = 1$ ,  $\bar{R}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \text{rect}(t+\tau)\text{rect}^*(t) dt$ ,  $E\{\}$  表示求均值,  $*$  表示复共轭。对式(6)进行傅里叶变换,可得到 MPSK-OFDM 的功率谱密度为

$$S(f) = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{N-1} \{\text{sinc}[\pi(f-f_i)T_s]\}^2 \quad (7)$$

对于 IJF-OQPSK-OFDM 调制体制,若只考虑 I 路信号,结合式(3),则可得 IJF-OQPSK-OFDM 调制信号  $s_1(t)$  的表达式为

$$s_1(t) = \sum_{i=0}^{N-1} [d_i p(t) + d_{i-1} p(t-T_s)] e^{j2\pi f_i t} \quad (8)$$

$s_1(t)$  的自相关函数  $R_1(\tau)$  为

$$R_1(\tau) = E\{s_1(t+\tau)s_1^*(t)\} = E\left\{ \sum_{m=0}^{N-1} [d_m p(t+\tau) + d_{m-1} p(t+\tau-T_s)] e^{j2\pi f_m(t+\tau)} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} [d_n p(t) + d_{n-1} p(t-T_s)] e^{-j2\pi f_n(t+\tau)} \right\}$$

可展开为 4 项,即  $R_1(\tau) = R_{11}(\tau) + R_{12}(\tau) + R_{13}(\tau) + R_{14}(\tau)$ , 其中,

$$R_{11}(\tau) = \sum_{m=0}^{N-1} E\{|d_m|^2\} \cdot E\{p(t+\tau)p^*(t)\} e^{j2\pi f_m \tau}$$

$$R_{12}(\tau) = \sum_{m=0}^{N-1} E\{|d_{m-1}|^2\} \cdot E\{p(t+\tau-T_s)p^*(t-T_s)\} e^{j2\pi f_m \tau}$$

$$R_{13}(\tau) = E\left\{ \sum_{m=0}^{N-1} d_{m-1} p(t+\tau-T_s) e^{j2\pi f_m(t+\tau)} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} d_n p^*(t) e^{-j2\pi f_n t} \right\}$$

由于  $E\{d_{m-1}d_n^*\} = \begin{cases} |d_m|^2 & m-1=n \\ 0 & m-1 \neq n \end{cases}$ , 因此

$$R_{13}(\tau) = \sum_{m=0}^{N-1} E\{|d_m|^2\} \cdot E\{p(t+\tau-T_s)p^*(t)\} \cdot E\{e^{j2\pi(f_m-f_{m-1})t}\} e^{j2\pi f_m \tau}$$

因为  $f_m \neq f_{m+1}$ , 所以  $R_{13}(\tau) = 0$ 。同理, 可得  $R_{14}(\tau) = 0$ 。

假设  $E\{|d_m|^2\} = 1$ , 结合式(4), 忽略常数, 则 IJF-OQPSK-OFDM 调制信号的功率谱密度  $S_1(f)$  为

$$S_1(f) = \sum_{m=0}^{N-1} G(f-f_m) \quad (9)$$

### 3.2 仿真分析

对于 OFDM 系统, 当每个子载波采用 MPSK 调制时, 根据式(7)可知其功率谱密度为 MPSK 基带功率谱以子载波间隔平移并相加所得。当每个子载波采用 IJF-OQPSK 调制时, 根据式(10)可知其功率谱密度为 IJF-OQPSK 基带功率谱以子载波间隔平移并相加所得。

采用 Matlab 软件对 OFDM-MPSK 与 OFDM-IJF-OQPSK 调制功率谱密度进行仿真计算, 将子载波数设为 64。图 5、图 6 分别为 QPSK-OFDM 与 OFDM-IJF-OQPSK 的功率谱密度, 对比两图可知, 采用 QPSK-OFDM 调制体制, 带外衰减较慢, 必须进行加窗处理, 而采用 OFDM-IJF-OQPSK 调制体制, 其

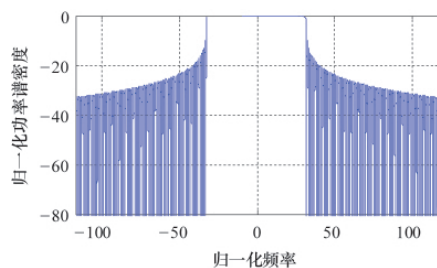


图 5 OFDM-QPSK 功率谱密度

Fig. 5 OFDM-QPSK power spectral density

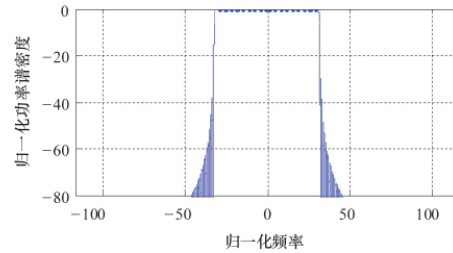


图 6 OFDM-IJF-OQPSK 功率谱密度

Fig. 6 OFDM-IJF-OQPSK power spectral density

带外衰减很快, 无需加窗即可达到很好的性能。

### 4 结论

本文提出一种 OFDM-IJF-OQPSK 调制体制, 用功率谱密度分布更为集中的 IJF-OQPSK 调制代替传统的 MPSK 与 MQAM 对子载波进行调制。理论推导知, 这种调制体制的功率谱密度为 IJF-OQPSK 基带功率谱以子载波间隔平移并相加所得。仿真分析知, OFDM-IJF-OQPSK 调制体制带外衰减很快, 带外辐射很小。

### 参考文献 (References)

- [1] 汪裕民. OFDM 关键技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 28-29.  
Wang Yumin. The key technology and application for OFDM[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 28-29.
- [2] 程韧, 冷娟华. OFDM 系统中抑制带外泄漏的算法研究[J]. 空军工程大学学报, 2004, 5(5): 54-56.  
Cheng Ren, Leng Juanhua. Journal of Force Engineering University, 2004, 5(5): 54-56.
- [3] Panta K, Armstrong J. Spectral analysis of OFDM signals and its improvement by polynomial cancellation coding [J]. IEEE Transaction on Consumer Electronics, 2003, 49(4): 939-943.
- [4] Brandes S, Cosovic I, Schnell M. Reduction of out-of-band radiation in OFDM system by insertion of cancellation carriers [J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(6): 420-422.
- [5] Cosovic I, Brandes S, Schnell M. Subcarrier weighting: A method for sideobe suppression in OFDM systems[J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(6): 444-446.
- [6] 安振庄, 言华. 数字基带 IJF 编码及其实现 [J]. 通信学报, 1997, 18(1): 78-83.  
An Zhenzhuang, Yan Hua. Journal of China Institute of Communications, 1997, 18(1): 78-83.
- [7] 刘聪锋. 高效数字调制技术及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 100-102.  
Liu Congfeng. High efficient digital modulation technology and its applications[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2006: 100-102.
- [8] 游莎莎, 刘胜利, 李国民. FQPSK 的调制特性及性能仿真[J]. 无线电工程, 2008, 38(2): 35-37.  
You Shasha, Liu Shengli, Li Guomin. Radio Engineering of China, 2008, 38(2): 35-37.

(责任编辑 刘志远)