

载波干涉 OFDM 系统的辨析

雷 俊 吴乐南

(东南大学无线电工程系 南京 210096)

摘 要 将载波干涉码引入 OFDM 系统,可以提高误码性能,并消除峰均功率比问题。该文从数学角度证明了载波干涉 OFDM 系统与现有的单载波频域均衡系统其实等同。

关键词 正交频分复用, 载波干涉, 单载波, 频域均衡

中图分类号: TN911.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)08-1400-03

Analysis of Carrier Interferometry OFDM

Lei Jun Wu Le-nan

(Department of Radio Eng., Southeast Univ., Nanjing 210096, China)

Abstract Carrier Interferometry (CI) codes may be introduced to Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) systems to improve BER performance and to eliminate the Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) problem. This paper demonstrates mathematically that CI/OFDM system is identical to existing Single Carrier transmission with Frequency Domain Equalization (SC/FDE).

Key words OFDM, Carrier interferometry, Single carrier, Frequency domain equalization

1 引言

正交频分复用(OFDM)技术以其在多径信道中高速传输信号的能力,以及均衡简单、抗脉冲噪声和高频谱利用率的优点,在通信领域得到广泛应用。例如:ETSI 的 DAB 和 DVB 标准,以及 IEEE 的 802.11a 协议等。

当然,OFDM 也有其自身缺陷,比如无频率分集使误码率性能受信噪谱零点的严重影响;峰均功率比(PAPR)过大导致发射功率放大器的非线性问题。众所周知,COFDM 通过信道编码和交织可有效提高误码率性能(引入频率分集),但与所有已提出的降低 PAPR 方法一样,都不可避免要降低系统传输效率,并增加实现复杂度。甚至可以说,至今还没有什么有效改善 OFDM 系统 PAPR 问题的办法。

作为研究的新动向,Wiegandt 等将载波干涉(CI)码用于 OFDM 系统,称为 CI/OFDM^[1-4]。其中,每个低速并行数据均由正交的 CI 码扩展到 OFDM 的全部子载波上同时传输,不降低系统传输率即可产生频率分集。另外,CI 码还能使每个数据调制的时域波形峰值均匀错开,不再像 OFDM 那样由许多随机正弦信号相加,从而完全消除了 PAPR 问题。

由于单载波频域均衡(SC/FDE)系统与传统 OFDM 相比较,也具有上述两个优点,直觉上感到 CI/OFDM 与 SC/FDE 应存在一定联系,且文献[2, 4]也承认了它们的相似性。本文从数学角度证明了 CI/OFDM 与现有的 SC/FDE 其实是等同的。

本文第 2 节简述 CI/OFDM 的系统结构,指出其调制解调原理与 SC/FDE 的同一性;第 3 节阐明 CI/OFDM 消除

PAPR 和伪正交 CI/OFDM 提高传输效率的实质;结论在最后给出。

2 系统结构与原理

本节侧重于对 CI/OFDM 原理的本质探究,其详细原理,请先参阅文献[1-4]。

CI/OFDM 发射机结构如图 1 所示,与传统 OFDM 不同的是,星座映射后的数据经串/并转换后,不仅用于调制各自的子载波,而是通过所有子载波同时传送。另外,为了让接收机能够分离同时传送的不同数据,每个数据在调制时都附加了相互正交的 CI 码信息(图 1(b))。这样,一个完整的 CI/OFDM 发送信号可表示为^[3]

$$S_c(t) = \text{Re} \left[A \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} s(k) e^{j2\pi \Delta f t} e^{j \frac{2\pi}{N} k i} e^{j2\pi f_c t} g(t) \right] \quad (1)$$

这里 A 为子载波能量归一化因子, $s(k)$ 表示发送的第 k 个数据, $e^{j \frac{2\pi}{N} k i}$ 表示 $s(k)$ 所对应 CI 码在子载波 i 上的码元, $g(t)$

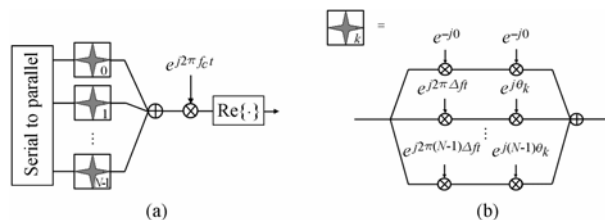


图 1 CI/OFDM 的调制过程

(a) CI/OFDM 发射机 (b) 数据 k 调制全部子载波

Fig.1 Modulation in CI/OFDM

(a) CI/OFDM transmitter (b) Spreading of symbol k to N carriers

表示 T_s 长度的矩形窗, $\Delta f = 1/T_s$ 为子载波频率间隔, f_c 为载频。

为表述方便, 忽略载频 f_c 的影响, 其复基带信号可表示为

$$S(t) = A \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} s(k) e^{j2\pi i \Delta f t} e^{j\frac{2\pi}{N} k i} g(t) \quad (2)$$

注意到式(2)中 N 个正交子载波只能通过IDFT构造^[5], 将其以Nyquist间隔 T_s/N 离散后得到

$$S(n) = A \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} s(k) e^{j\frac{2\pi}{N} n i} e^{j\frac{2\pi}{N} k i}, \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (3)$$

显然, 式(3)包含2次IDFT运算, 即

$$\begin{aligned} S(n) &= AN^2 \mathcal{F}_i^{-1} \left[\mathcal{F}_k^{-1} [s(k)](i) \right](n) \\ &= \begin{cases} ANs(0), & n = 0 \\ ANs(N-n), & n = 1, \dots, N-1 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

可见, 此时CI码的作用相当于1次IDFT运算, 将OFDM调制的效果完全抵消。式(4)的物理意义为时域信 $s(k)$ 经IDFT变换到频域后, 再一次由IDFT变换回时域。若不考虑比例因子 N , 则CI/OFDM与SC/FDE的发射信号仅仅在次序上稍有不同。需要说明的是, 这里对时/频域的理解与SC/FDE相同, 并不和IDFT运算相对应。至于SC/FDE的详细原理, 可参阅文献[6]。

通过信道后, CI/OFDM接收信号可表示为

$$R_c(t) = \text{Re} \left[A \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i e^{j\phi_i} s(k) e^{j2\pi i \Delta f t} e^{j\frac{2\pi}{N} k i} e^{j2\pi f_c t} g(t) + m_c(t) \right] \quad (5)$$

其中 α_i 和 ϕ_i 表示子载波 i 的幅度衰落和相位偏移, $m_c(t)$ 为带通噪声分量。

CI/OFDM接收机 $s(k)$ 的解调过程如图2所示, $R_c(t)$ 经下变频后, 分离为 N 个正交子载波, 接着对每个子载波分量补偿信道和CI码的相位偏移, 最后重新组合得到估计值 $\hat{s}(k)$ ^[3]。同样, 忽略载频 f_c 的影响, 式(5)的复基带离散信号为

$$R(n) = A \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i e^{j\phi_i} s(k) e^{j\frac{2\pi}{N} n i} e^{j\frac{2\pi}{N} k i} + m(n), \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (6)$$

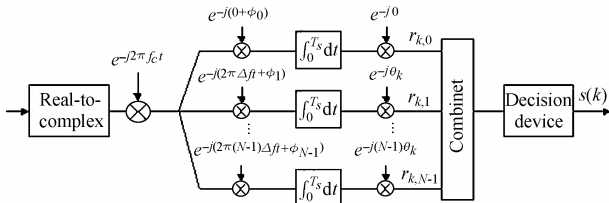


图2 CI/OFDM的解调过程

Fig.2 Demodulation in CI/OFDM

其中 $m(n)$ 为 $m_c(t)$ 的复基带离散形式。由图2知,

$$r_{k,i} = \sum_{n=0}^{N-1} R(n) e^{-j\frac{2\pi}{N} n i} e^{-j\frac{2\pi}{N} k i} e^{-j\phi_i} \quad (7)$$

首先考虑AWGN信道, 此时 $\alpha_i \equiv \alpha$ (常数), $\phi_i \equiv 0$,

$$R(n) = \alpha S(n) + m(n) \quad (8)$$

CI/OFDM对 $r_{k,i}$ 采用EGC的组合方法, 即

$$\hat{s}(k) = \sum_{i=0}^{N-1} r_{k,i} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} R(n) e^{-j\frac{2\pi}{N} n i} e^{-j\frac{2\pi}{N} k i} \quad (9)$$

显然, 式(9)包含2次DFT运算, 即

$$\hat{s}(k) = \mathcal{F}_i [\mathcal{F}_n [R(n)](i)](k) = \begin{cases} NR(0), & k = 0 \\ NR(N-k), & k = 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (10)$$

联合式(4), 式(8)和式(10)得到

$$\hat{s}(k) = AN^2 \alpha s(k) + Nm(k) \quad (11)$$

在频率选择信道, CI/OFDM假设相位 ϕ_i 理想估计, 对 $r_{k,i}$ 采用MMSEC的组合方法, 即

$$\hat{s}(k) = \sum_{i=0}^{N-1} W_i r_{k,i} = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{A\alpha_i}{NA^2 \alpha_i^2 E[s^2(k)] + \sigma^2} r_{k,i} \quad (12)$$

其中 σ^2 为噪声方差。由于子载波能量归一化后, $NA^2 E[s^2(k)] = 1$, 权重 W_i 可化简为

$$W_i = \frac{A\alpha_i}{\alpha_i^2 + \sigma^2} \quad (13)$$

显然, 若再考虑相位 ϕ_i 的影响, 则式(13)和SC/FDE的MMSE均衡系数^[6]完全一致。将式(9)和式(13)代入式(12), 最后得到

$$\begin{aligned} \hat{s}(k) &= \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{A\alpha_i}{\alpha_i^2 + \sigma^2} R(n) e^{-j\frac{2\pi}{N} n i} e^{-j\frac{2\pi}{N} k i} \\ &= \mathcal{F}_i \left[\frac{A\alpha_i}{\alpha_i^2 + \sigma^2} \mathcal{F}_n [R(n)](i) \right](k) \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)的物理意义为时域信号 $R(n)$ 经DFT变换到频域后, 用权重 W_i 对子载波 i 幅度补偿, 然后由DFT又变换回时域。

可见, 发端的CI码与收端的码相位补偿在系统中实际上分别用作IDFT和DFT, 使得CI/OFDM的基本原理与SC/FDE一致: 发端以单载波方式发送信号, 收端则通过频域均衡消除信道影响。差别只是CI/OFDM接收机是利用两个DFT实现信号时频域的变换, 会导致数据恢复次序颠倒(式(10)), 所以发射机也需两个IDFT将数据的发送次序颠倒(式(4))。易知, CI码与其共轭的基本性质应相同, 若文献[3]使用原CI码的共轭, 则该CI/OFDM就与SC/FDE在基本原理和实现过程上完全一致, 因为原CI码共轭会起到DFT的作用。这样, CI/OFDM与SC/FDE的同-性问题就类似于用IDFT或DFT实现OFDM调制是否一致的问题。

3 CI码其它功效的实质分析

Wiegandt等认为, 除产生频率分集效应外, CI码还可消除OFDM系统固有的PAPR问题, 以及在引入另一组伪正交的CI码后, 可成倍提高系统的传输效率。本节就CI

码这两个功效的实质进行分析。

如第2节所述, CI/OFDM即为SC/FDE系统, 而单载波

系统显然不存在PAPR问题。另外,我们还发现文献[2]对该问题的图解过程完全可以由Natarajan等提出的CI/TDMA^[7]系统原理来配合说明。类似文献[7],令

$$h(t) = \sum_{i=0}^{N-1} e^{j2\pi i \Delta f t} g(t) \quad (15)$$

为发送数据 $s(k)$ 的成形脉冲,则式(2)可简化为

$$S(t) = A \sum_{k=0}^{N-1} s(k) h\left(t + k \frac{T_s}{N}\right) \quad (16)$$

其中 $h(t + kT_s/N)$ 表示超前的成形脉冲。显然,文献[2]中的图8(a)即为成形脉冲 $h(t)$ 的实部(与 $s(0)$ 对应),但其图解过程中错误的是图8(b)实际表示的是 $h(t - T_s/N)$ 的实部(与 $s(N-1)$ 对应),而并非其本意要表示的 $h(t + T_s/N)$ 的实部(与 $s(1)$ 对应)。这样,由于每个发送数据所对应成形脉冲的时域峰值被均匀错开,该系统便不再有PAPR问题,但实际上仍然是以单载波方式解决。其实,上述内容以Nyquist间隔离散后即得到与第2节相同的形式,也就是说,CI/TDMA和SC/FDE可分别作为对CI/OFDM的连续和离散解释。

另外,文献[2]中还引入另一组伪正交CI码,用以提高系统传输效率。但我们认为,与传统OFDM相比,伪正交CI/OFDM并不能提供更高的传输效率。这是因为文献[2]在比较两者传输效率时,发送数据均限制为BPSK信号。但无论在有线或无线环境中,传统OFDM都有能力发送幅相调制的多星座信号;而伪正交CI/OFDM却只能发送幅度调制信号,否则,严重的ICI会使系统完全瘫痪;而且CI/OFDM随后被证明是可以发送幅相调制信号的^[3](这一点也可以通过SC/FDE得到验证)。所以说,传统OFDM和CI/OFDM以及伪正交CI/OFDM的传输效率其实是相同的,或者说,伪正交CI/OFDM多此一举。

4 结束语

Wiegandt 等将载波干涉码引入 OFDM 系统,可有效提高误码性能,并消除 PAPR 问题。但本文从数学角度证明了 CI/OFDM 与现有的 SC/FDE 其实等同,且 CI/TDMA 和 SC/FDE 可分别作为 CI/OFDM 是单载波系统的连续和离散解释。显然,单载波系统是不存在 PAPR 问题的。另外,由

于不能发送幅相调制信号,伪正交 CI/OFDM 并不能提供比传统 OFDM 更高的传输效率。

参考文献

- [1] Wiegandt D A, Nassar C R, Wu Zhiqiang. Overcoming peak-to-average power ratio issues in OFDM via carrier-interferometry codes. *IEEE 54th Vehicular Technology Conference (VTC'01 Fall)*, Atlantic City, NJ, USA, 2001, 2: 660-663.
- [2] Wiegandt D A, Wu Zhiqiang, Nassar C R. High-throughput, high-performance OFDM via pseudo-orthogonal carrier interferometry spreading codes. *IEEE Trans. on Comm.*, 2003, 51(7): 1123-1134.
- [3] Wu Zhiqiang, et al.. High-performance 64-QAM OFDM via carrier interferometry spreading codes. *IEEE 58th Vehicular Technology Conference (VTC'03 Fall)*, Orlando, Florida, USA, 2003, 4: 557-561.
- [4] Wiegandt D A, Nassar C R, Wu Zhiqiang. The elimination of peak-to-average power ratio concerns in OFDM via carrier interferometry spreading codes: a multiple constellation analysis. *IEEE 36th Southeastern Symposium on System Theory (SSST'04)*, Atlanta, Georgia, USA, 2004: 323-327.
- [5] Weinstein S, Ebert P. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform. *IEEE Trans. on Comm.*, 1971, 19(5): 628-634.
- [6] Sari H, Karam G, Jeanclaude I. An analysis of orthogonal frequency-division multiplexing for mobile radio applications. *IEEE 44th Vehicular Technology Conference (VTC'94)*, Stockholm, Sweden, 1994, 3: 1635-1639.
- [7] Natarajan B, Nassar C R, Shattil S. Innovative pulse shaping for high-performance wireless TDMA. *IEEE Comm. Letters*, 2001, 5(9): 372-374.

雷俊: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向为 OFDM、频域均衡。

吴乐南: 男, 1952年生, 教授, 博士生导师, 从事多媒体信息处理、数字广播等研究与开发工作。