

# 基于差分编码的 OFDM 系统 ICI 消除方法的研究

刘解华 杨东凯 常青 张其善  
(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

**摘要:** 在高速移动通信环境下, OFDM 系统在传输过程中出现的多普勒频移和收发两端本地振荡器之间的频率偏差, 形成子载波间干扰(ICI)并造成系统性能降低。该文在分析子载波间干扰机制的基础上, 从信道估计的角度提出了一种高效的 ICI 自消除差分编码方案。该方案提高了传统 ICI 自消除方案频谱利用率。仿真表明, 在系统归一化频率偏差大于 0.1 时, 该方案具有 4 dB 的信道估计增益, 消除了因 ICI 带来的地板效应。

**关键词:** 正交频分复用; 移动通信; 子载波间干扰; 差分编码; 信道估计

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)07-1529-04

## Research on Inter-carrier Interference Cancellation Based on Differential Coding in OFDM System

Liu Jie-hua Yang Dong-kai Chang qing Zhang Qi-shan

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** For Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) communication systems with high mobile speed, the frequency offset caused by Doppler frequency offset and the frequency differences will introduce Inter-Carriers Interference (ICI), which degrades the performance. Based on the analysis of the interference mechanism of ICI, a high efficient ICI cancellation scheme based on differential coding in terms of channel estimation is introduced. This scheme improves the spectrum usage efficiency of ICI self-cancellation. And compared with the normal OFDM system, the proposed scheme has 4dB channel estimation improvement and avoid the error floor caused by ICI.

**Key words:** OFDM; Mobile communication; ICI; Differential coding; Channel estimation

### 1 引言

正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 系统具有传输速率高、频谱利用率高、抗多径干扰能力强等特点, 在将来多媒体宽带通信中会得到广泛的应用<sup>[1]</sup>。但在高速移动通信中, 由于无线信道的时变性, 在传输过程中出现的多普勒频移和收发两端本地振荡器之间的频率偏差, 都会使 OFDM 系统子载波之间的正交性遭到破坏, 导致子载波间干扰 (Inter-Carrier Interference, ICI) 并使系统性能迅速恶化。

目前用来抑制 ICI 的方法主要有频域均衡, 时域加窗, 基于变换域滤波, 选择符号映射与部分序列传输, ICI 自消除方案<sup>[2-6]</sup>等, 且都在特定的信道环境下取得较好的效果。但对于高速移动通信环境下存在的严重的 ICI, 前 4 种方法抗 ICI 能力有限, 且频域均衡实现复杂, 抗噪声干扰能力差; 时域加窗会削弱 OFDM 抗多径干扰能力; 基于变换域滤波受系统同步影响大。ICI 自消除方案虽然抗 ICI 干扰能力强, 但需要将两个子载波传输同一路数据, 频谱利用率只有通常系统的二分之一, 文献[7]虽然对 ICI 自消除方案的编码效率加以改进, 但是没有考虑插入导频情况, 从而无法进行信道估

计。

本文在分析子载波间干扰机制的基础上, 从信道估计的角度上提出了一种基于差分编码的 ICI 消除方案, 该方案有效地降低了 OFDM 系统中 ICI, 提高了信道估计的精度, 消除了 OFDM 系统因 ICI 带来的地板效应, 且频谱效率要比 ICI 自消除方案高出将近一倍, 满足了高速移动通信的应用要求。

### 2 信道模型和 ICI 分析

基于差分编码 ICI 消除方案的 OFDM 基带系统如图 1 所示, 将数字调制符号  $D(k)$  插入导频和进行差分编码后得到各子载波的调制符号  $X(k)$ , 对  $X(k)$  进行 IFFT 变换得到时域信号  $x(n)$  如下:

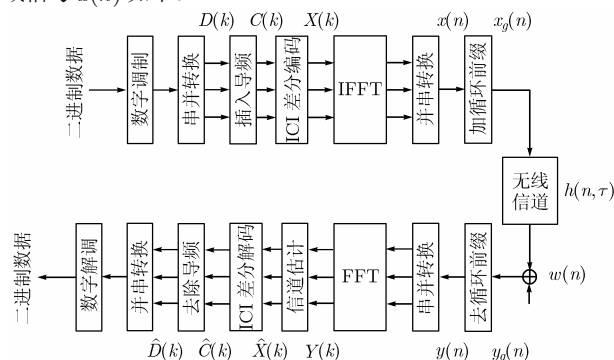


图 1 基于差分编码的 OFDM 数字基带系统

$$x(n) = \text{IFFT}\{X(k)\} = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \exp(j2\pi kn/N),$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

为了消除多径时延扩展带来的符号间干扰(ISI),  $x(n)$  插上长度为  $N_g$  的循环前缀作为保护间隔, 这样即可得到  $x_g(n)$ :

$$x_g(n) = \begin{cases} x(N+n), & n = -N_g, -N_g+1, \dots, -1 \\ x(n), & n = 0, 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (2)$$

其中  $N_g$  为保护间隔  $T_g$  内的采样次数,  $T_s = T_g + T$  为整个 OFDM 符号周期,  $T$  为 OFDM 系统 FFT 周期。发送信号  $x_g(n)$  经过带有加性高斯白噪声的时变频率选择性信道衰落, 接收信号  $y_g(n)$  为

$$y_g(n) = x_g(n) \otimes h(n) + w(n) \quad (3)$$

其中  $\otimes$  表示线性卷积,  $w(n)$  表示加性高斯白噪声。假定时变频率选择性信道模型为

$$h(n, \lambda) = \sum_{i=0}^{P-1} h_i \exp\left(j \frac{2\pi}{N} \Delta f_i T n\right) \delta(\lambda - n_i),$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

其中  $P$  为信道传播路径数,  $h_i$ ,  $\Delta f_i T$  分别表示为  $t$  时刻第  $i$  条路径的复数增益和归一化频率偏移,  $n_i$  表示为第  $i$  条路径相对采样间隔的时延扩展。

假定系统收发两端定时和采样严格同步, 则去掉循环前缀后, 经过FFT解调后的频域信号  $Y(k)$  可表示为<sup>[6]</sup>

$$Y(k) = \text{FFT}(y(n)) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j2\pi nk/N}$$

$$= H(k, k)X(k) + \sum_{m=0, m \neq k}^{N-1} H(k, m)X(m) + W(k)$$

$$= H(k, k)X(k) + \text{ICI}(k) + W(k),$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

其中  $H(k, m) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{P-1} \sum_{m=0}^{N-1} h_i \frac{1 - \exp(j2\pi(\Delta f_i T + m - k))}{1 - \exp(j2\pi(\Delta f_i T + m - k)/N)}$   
 $\cdot \exp(-j2\pi n_k/N)$ ,  $H(k, k)$  表示第  $k$  个子载波准确的信道频域响应,  $H(k, m)$  表示第  $m$  个子载波信号对第  $k$  个子载波的干扰系数, 它只跟信道参数有关, 跟发送信号是无关的,  $W(k) = \text{FFT}(w(n))$ 。

信道估计是OFDM中进行相关检测、解调和均衡的基础。对于高速移动通信中的时变频率选择性信道, 信道估计一般都采用梳状导频, 即将导频均匀地插入到OFDM符号中, 其信道估计过程为<sup>[8]</sup>

(1)从接收信号  $Y(k)$  中提取导频信号  $Y_p(k)$ , 并根据所发送的导频  $X_p(k)$  得到导频子载波的信道频率响应  $\hat{H}_p(k, k)$ , 假定采用最小均方差信道估计方法(LS), 则

$$\hat{H}_p(k, k) = Y_p(k) / X_p(k) = H_p(k, k) + \frac{\text{ICI}(k) + W(k)}{X_p(k)} \quad (6)$$

信道估计误差 MSE 为

$$\text{MSE} = \left| \hat{H}_p(k, k) - H_p(k, k) \right| = \left| \frac{\text{ICI}(k) + W(k)}{X_p(k)} \right| \quad (7)$$

LS 算法受 ICI 和噪声干扰影响比较大, 其中  $W(k)$  可以通过提高高频符号的功率来克服, 如欧洲陆地数字电视标准 DVB-T, 而  $\text{ICI}(k)$  会随着发送信号的功率增大而增大, 必须采取相应的措施加以抑制。

(2)采用二次多项式对  $\hat{H}_p(k, k)$  进行插值得到数据子载波的信道频率响应  $\hat{H}(k, k)$ 。

(3)由  $\hat{H}(k, k)$  恢复数据符号  $\hat{X}(k)$ ,

$$\hat{X}(k) = Y(k) / \hat{H}(k, k) \quad (8)$$

对  $\hat{X}(k)$  进行接收判决, 即可得到标准数字符号。

由此可知, 提高信道估计精度的关键在于提高高频子载波的信道频率响应  $\hat{H}_p(k, k)$ , 而提高  $\hat{H}_p(k, k)$  估计精度的关键在于降低  $\text{ICI}(k)$ , 而降低  $\text{ICI}(k)$  最有效途径就是降低其干扰系数  $H(k, m)$ 。

### 3 ICI 消除差分编码

$H(k, m)$  随着  $m$  的变化规律有如下两条性质, 如图 2 所示:

(1)  $H(k, m)$  随着  $m$  变化缓慢;

(2)  $H(k, m)$  的能量主要集中在  $H(k, k)$  附近, 并在  $m = k$  时取得最大值。

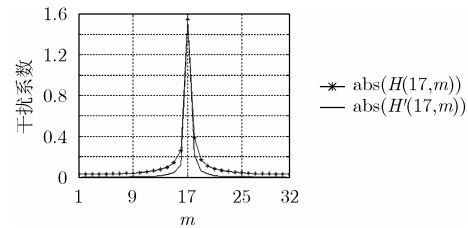


图2  $H(k, m)$  和  $H(k, m)$  随  $m$  变化规律图

ICI 自消除方案就是利用性质(1), 其本质为一种重复编码技术, 它将同一数据以相反的符号调制到两相邻的子载波。ICI 自消除方案虽然是抑制 ICI 行之有效的办法, 但是其频谱利用率只有 50%。综合考虑信道估计的精度, 本文利用以上两条性质对数据符号进行差分编码, 假定插入  $N_p$  个导频的数据符号  $C(k)$  为

$$C(k) = C(mL + l) = \begin{cases} X_p(l), & l = 0 \\ \text{data}, & l = 1, \dots, L-2, \\ 0, & l = L-1 \end{cases} \quad (9)$$

$$m = 0, \dots, N_p - 1$$

其中  $L = N/N_p$  为导频间隔,  $X_p(l)$  为导频符号, 经过差分编码后的数据符号  $X(k)$  为

$$X(k) = X(mL + l) = \begin{cases} X_p(l), & l = 0 \\ C(mL + 1), & l = 1 \\ C(mL + l) - C(mL + l - 1), & l = 2, \dots, L-2 \\ -C(mL + L - 2), & l = L-1, \end{cases}$$

$$m = 0, \dots, N_p - 1 \quad (10)$$

这时所接收的导频符号  $Y_p(k)$  为

$$\begin{aligned}
 Y_p(k) &= H(kL, kL)X_p(k) + \sum_{m=0, m \neq kL}^{N_p-1} H(kL, m)X(m) + W(k) \\
 &= H(kL, kL)X_p(k) + \sum_{m=0}^{N_p-1} \sum_{l=1}^{L-2} H'(kL, mL+l)C(mL+l) \\
 &\quad + \sum_{m=0, m \neq k}^{N_p-1} H(kL, mL)X_p(m) + W(kL), \\
 &\quad k = 0, 1, \dots, N_p - 1
 \end{aligned} \tag{11}$$

其中

$$H'(k, m) = \begin{cases} H(k, m) - H(k, m+1), & \text{其它} \\ H(k, k), & m = k \\ 0, & m = 0, m = N-1 \end{cases} \tag{12}$$

由式(11)可知, 数据子载波对导频子载波的干扰系数由  $H(k, m)$  变为  $H'(k, m)$ ,  $H'(k, m)$  随  $m$  的变化规律如图 2 所示, 由图 2 可知, 干扰系数  $H'(k, m)$  较  $H(k, m)$  得到大大地降低。导频子载波之间的干扰系数尽管不变, 但是由于导频子载波之间由于有导频间隔  $L$  隔离, 其干扰系数很小, 由式(7)可知,  $\hat{H}_p(k, k)$  的估计精度将得到大大提高, 从而根据  $\hat{H}_p(k, k)$  通过插值方式得到的数据子载波的信道频率响应  $\hat{H}(k, k)$  估计精度也将因此提高。

根据  $H(k, m)$  的性质可知, 当  $m \neq k$  时,  $H(k, m) \approx H(k, m-1)$ , 接收的数据符号  $Y(k)$  为

$$Y(k) = \begin{cases} (H(k, k) - H(k, k+1))C(k) + H(k, k-1)C(k-1) + W(k), & k = mL + 1 \\ (H(k, k) - H(k, k+1))C(k) + (H(k, k-1) - H(k, k))C(k-1) + W(k), & k = mL + 2, \dots, (m+1)L - 2 \end{cases} \tag{13}$$

由此可见, 数据子载波的 ICI 干扰主要来自其相邻的两个子载波, 根据  $H(k, m)$  的性质(2),  $H(k, k) \gg H(k, m)$  ( $m \neq k$ ), 这样就可以将式(13)简化为

$$Y(k) \approx \begin{cases} H(k, k)C(k) + W(k), & k = mL + 1 \\ H(k, k)(C(k) - C(k-1)) + W(k), & k = mL + 2, \dots, (m+1)L - 2 \end{cases} \tag{14}$$

由  $\hat{H}(k, k)$  恢复的数据符号  $\hat{X}(k)$  为

$$\hat{X}(k) = \frac{Y(k)}{\hat{H}(k, k)} \approx \begin{cases} C(k) + W(k)/\hat{H}(k, k), & k = mL + 1 \\ C(k) - C(k-1) + W(k)/\hat{H}(k, k), & k = mL + 2, \dots, (m+1)L - 2 \end{cases} \tag{15}$$

根据式(15), 利用接收判决以及其前向反馈即可得到对差分编码后的数据进行解码

$$\hat{C}(k) = \begin{cases} \text{Dec}(\hat{X}(k)), & k = mL + 1 \\ \text{Dec}(\hat{X}(k) + \hat{C}(k-1)), & k = mL + 2, \dots, (m+1)L - 1 \end{cases} \tag{16}$$

其中  $\text{Dec}(\cdot)$  表示数字调制符号接收判决。

通过式(9)可知, 差分编码方案牺牲了序号为  $\{(m+1)L - 1, m = 0, 1, \dots, N_p - 1\}$  共  $N_p$  个子载波, 但由于通常  $N_p \ll N$ , 这样系统频谱利用率就接近为 1(实际为  $(N - N_p) / N$ ), 这虽然比普通 OFDM 系统有所降低, 但是比传统 ICI 自消除方案还是得到很大提高。通过等式(16)可知, 尽管采用判决反馈可以抑制差分编码带来的错误扩散, 但是差分编码还是增大了高斯噪声的影响, 从而使得本方案在低信噪比应用条件下性能会有所削弱。

#### 4 系统仿真

参照文献[9], 本仿真平台参数为: 载波频率  $f_c = 2\text{GHz}$ ,  $N = 256$ ,  $N_p = 16$ ,  $T = 20\mu\text{s}$ ,  $N_g = 16$ , 信道多径参数见式(17)。

$$\begin{aligned}
 h(n) &= \delta(n) + 0.398\delta(n-2) + 0.158\delta(n-4) \\
 &\quad + 0.063\delta(n-6) + 0.021\delta(n-8) + 0.001\delta(n-10) \tag{17}
 \end{aligned}$$

为了评价系统信道估计的精度, 定义平均信道估计相对误差 (AvgMse):

$$\text{AvgMse} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left| \frac{\hat{H}(k, k) - H(k, k)}{H(k, k)} \right| \tag{18}$$

仿真采用 QPSK 调制方式, 传输数据文件为 9.6K, 系统未采用信道编码进行纠错。为了验证系统抗 ICI 的能力, 将接收端信噪比 (SNR) 分别设置为 30 dB, 通过改变归一化频率偏移 ( $\Delta f_i T$ ) 得到平均信道估计相对误差随频率偏移变化曲线见图 3, 通过图 3 可以看出, 当频率偏移很小 ( $\Delta f_i T < 0.04$ ) 时, 该系统与 ICI 自消除系统和无 ICI 消除编码系统对信道的估计精度相仿, 但随着频率偏移的增大, 并在  $\Delta f_i T > 0.1$  时, 该系统比无 ICI 消除编码系统要有 3, 4 dB 信道估计增益, 比 ICI 自消除系统低 2, 3 dB。

为了验证系统抗噪声干扰的能力, 设置系统归一化频率偏移  $\Delta f_i T = 0.2$ , 通过改变信噪比得到系统误码率曲线见图 4, 通过图 4 可以看出, 该系统与 ICI 自消除系统性能接近, 在信噪比低 (SNR < 8) 时, 该系统由于差分编码带来的噪声扩散, 使得系统性能比无 ICI 消除编码系统稍差, 但可以通过提高信噪比来有效降低系统误码率, 而无 ICI 消除编码系统则不管怎样提高信噪比都将无助于改善系统性能(即出现地板效应)。

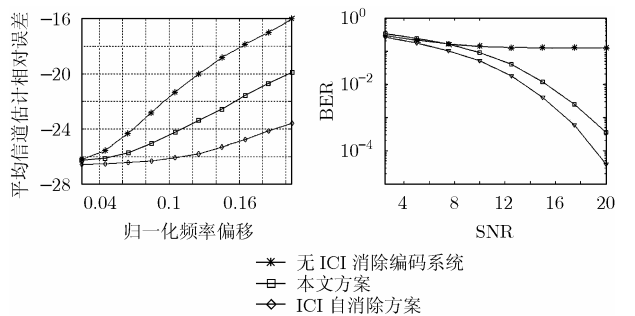


图 3 平均信道估计相对误差随频率偏移变化曲线

图 4  $\Delta f_i T = 0.2$  时, 系统误码率随信噪比变化曲线

## 5 结束语

本文在分析高速移动通信中子载波间干扰机制的基础上,从信道估计的角度上提出了一种基于差分编码的 ICI 消除方案。通过仿真表明,当系统归一化频率偏移大于 0.1 时,该方案具有 3, 4 dB 的信道估计增益,消除了因子载波间干扰带来的地板效应,且频谱利用率比传统 ICI 自消除方案得到很大提高,从而满足了高速移动通信中的应用要求。

## 参 考 文 献

- [1] Cimini L J. Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1985, 33(7): 665–675.
- [2] Dhahi N A and Cioffi J M. Optimum finite-length equalization for multicarrier transceivers[J]. *IEEE Trans. on Comm.*, 1996, 44(1): 56–64.
- [3] Muschallik C. Improving an OFDM reception using an adaptive Nyquist windowing[J]. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 1996, 42(3): 259–269.
- [4] Yuping Z and Huang Aiping. A novel channel estimation method for OFDM mobile communication systems based on pilot signal and transform-domain processing[C]. *IEEE 47<sup>th</sup> VTC.*, Phoenix, AZ, 1997, 3: 2089–2093.
- [5] Yuping Z and Seven G H. Intercarrier interference self-cancellation scheme for OFDM mobile communication systems [J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 2001, 49(7): 1185–1190.
- [6] Sathananthan K and Tellambura C. Partial transmit sequence and selected mapping schemes to reduce ICI in OFDM systems [J]. *IEEE Comm. Letters*, 2002, 8(6): 313–315.
- [7] Lan Yang and Chen Ming. Intercarrier interference cancellation of OFDM for time-varying channels[C]. *IEEE Comm. Society Globecom*, Dallas Texas, USA, 2004: 3753–3757.
- [8] Coleri S and Ergen M. Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems[J]. *IEEE Trans. on Broadcasting*, 2002, 48(3): 223–229.
- [9] European Telecommunications Standards Institute. European digital cellular telecommunication system (Phase 2): radio transmission and reception GSM 05.05. vers 4.6.0, 1993.

刘解华: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为 OFDM、软件无线电、遥测遥控.

张其善: 男, 1936 年生, 博士生导师, 国家级突出贡献专家, 研究方向为信息传输、卫星导航、智能交通、信息安全.