

文章编号:1000-582X(2004)11-0059-04

MC-CDMA 系统抗单频干扰性能分析*

何世彪¹,杨士中²

(1. 重庆通信学院 三系,重庆 400035;2. 重庆大学 通信工程学院,重庆 400030)

摘要:MC-CDMA 是 OFDM 与 DS-CDMA 相结合的技术,它比单载波 CDMA 系统具有很多优点,最典型的优点是能够克服符号间干扰(ISI)和抑制窄带干扰,因而成移动通信领域的热点。介绍了典型 MC-CDMA 系统的模型,讨论了在 Rayleigh 信道中存在单频干扰情况下的上行链路接收判决统计量,并给出了 MC-CDMA 系统的误码率公式。提出采用修改等增益合并的方法,来抑制单频干扰的影响。理论分析和数字结果表明,采用此方法可改善 MC-CDMA 系统抗单频干扰的性能。

关键词:MC-CDMA; 瑞利信道; CW 干扰; 误码率; 上行链路

中图分类号:TN914.3

文献标识码:A

以 CDMA 和 OFDM 为基础而提出的多载波 CDMA 方案,可以分为两类^[1-2]:一类是使用给定的扩频码对原始数据进行扩频,然后将每个码片调制到不同的子载波上,完成在频域上的扩展操作,称为 MC-CDMA。另一类是使用给定的扩频码对经过串/并转换的数据流在时域上进行扩展,类似于通常的 DS-CDMA,像 MC-DS-CDMA 和 MT-CDMA。

MC-CDMA 的基本原理是:每比特数据作用于 N 个分支,在每个分支上分别用伪码的一个码片(Chip)与该数据比特进行模 2 和后被一个子载波调制,最后将各分支的调制输出相加后进行调制发送。各子载波之间相互正交。适当选取 N 值可使每个子载波传送的符号周期远大于信道的多径时延,从而使得 MC-CDMA 对时延扩展不敏感,另外可通过插入符号间的保护间隔,使 MC-CDMA 完全可以克服 ISI 的影响。MC-CDMA 在所有的子载波上传送相同的信息,因而 MC-CDMA 系统起到了频率分集的作用。通过对不同合并方法的选择可以取得不同的抗干扰性能,许多文献都对 MC-CDMA 系统的性能进行了分析^[2-8],笔者在前人的基础上,考虑存在单频干扰的情况下,推导出了 MC-CDMA 系统的误码性能,并提出通过调整合并支路的加权系数,从而克服单频干扰影响的新方法。

1 MC-CDMA 系统模型

MC-CDMA 在不同的情况下应用时,其模型略有差别^[2-4,9],笔者在参考文献[3]和[6]的基础上,进行微小改动,形成如图 1 所示的 MC-CDMA 系统模型,图 1(a)为用户的发送框图,图 1(b)为用户 0 接收框图。在该模型中,信息数据的码元间隔为 T_b ,伪码的长度均为 $C_m(i)$,载波频率为 N ,相邻子载波之间的频率间隔为 $\frac{1}{T_b}$,各子载波的频率为: $\frac{i}{T_b}$ ($i=0,1,\dots,N-1$), d_{0i}

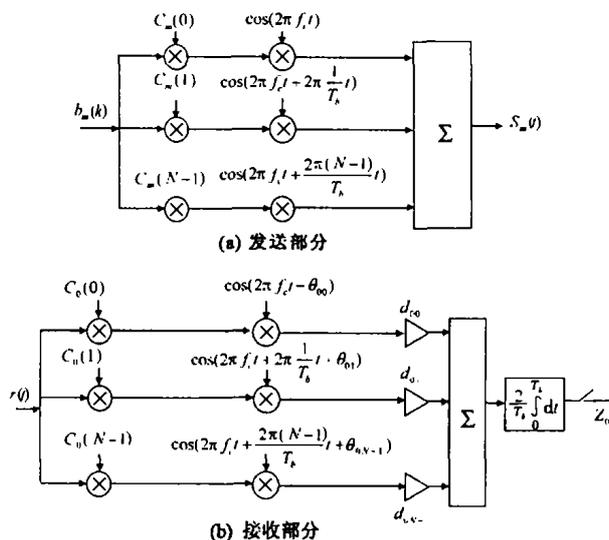


图 1 MC-CDMA 系统框图

* 收稿日期:2004-06-03

作者简介:何世彪(1963-),男,安徽怀宁人,重庆通信学院教授,重庆大学博士后,主要研究方向:抗干扰通信与信息处理等。

为第0个用户第*i*个子载波支路合并时的加权系数。笔者采用文献^[3,6]中的方法和相关结论,进行下面的分析。假设系统中有*M*个用户,则对于用户*m*,第*k*个数据比特发送的信号为:

$$S_m(t) = \sum_{i=0}^{N-1} b_m(k) C_m(i) P_{T_b}(t - kT_b) \cos\left(2\pi f_c t + 2\pi i \frac{1}{T_b} t\right) \quad (1)$$

式中, $P_{T_b}(t)$ 为单位矩形脉冲,在 $[0, T_b]$ 内为非零, $b_m(k)$ 为第*m*个用户第*k*个比特的数据信息。

$b_m(k), C_m(i) \in \{-1, +1\}$ 。假设信道是 Rayleigh 衰落信道,适当选取子载波的个数*N*,使得符号周期 T_b 满足: $t_{\max} < T_b < 1/f_{D\max}$ 。其中, t_{\max} 为信道的时延扩展, $f_{D\max}$ 为最大多普勒频移,则可认为每个子载波信道的幅度和相位保持恒定,因此每个子带(对上行链路来说)的信道特征为:

$$H_m\left[f_c + i \frac{1}{T_b}\right] = \rho_{mi} e^{j\theta_{mi}} \quad (2)$$

式中, ρ_{mi} 为第*m*个用户,第*i*个子载波的幅度衰减,为独立同分布的 Rayleigh 随机变量, θ_{mi} 为第*m*个用户第*i*个子载波的随机相位,为独立同分布的均匀随机变量。根据此假设,第*m*个用户的所有子载波平均功率 $\overline{P_m}$ 相等,而第*m*个用户的平均功率 $\overline{P_m}$ 为:

$$\overline{P_m} = N \overline{P_{mi}} = NE \{ \rho_{mi} \cos(2\pi f_c + 2\pi i/T_b + \theta_{mi}) \}^2 = \frac{1}{2} NE(\rho_{mi}^2) = N\sigma^2 \quad (3)$$

对于下行链路,移动台接收所有用户的信号都是经过相同的信道,因此可简化为:

$$\rho_{mi} = \rho_{0i}, \theta_{mi} = \theta_{0i}, m = 0, 1, \dots, M-1$$

不考虑多径信号时的接收信号为:

$$r(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{mi} b_m(k) C_m(i) \cos\left(2\pi f_c t + 2\pi i \frac{1}{T_b} t + \theta_{mi}\right) + J(t) + n(t) \quad (4)$$

式中, $J(t)$ 为信道中单频干扰, $n(t)$ 为加性高斯白噪声干扰,单边功率谱密度为 N_0 。

2 存在单频干扰时的 MC-CDMA 上行链路接收信号的统计判决量

假设第0个用户为期望用户,对上行链路,接收端第*i*条通路乘以 $(C_0(i) d_{0i} \cos(2\pi f_c t + \hat{\theta}_{0i}))$ ($f_i = f_c + i/T_b$)相加后经判决输出。假设本地子载波的 $\hat{\theta}_{0i} = \theta_{0i}$ 。则输出判决量 Z_0 可表示为:

$$Z_0 = D + \beta_{int} + \xi + \eta \quad (5)$$

其中第1项为期望用户判决输出:

$$D = \frac{2}{T_b} \int_{kT_b}^{(k+1)T_b} \sum_{i=0}^{N-1} b_0(k) \rho_{0i} C_0(i) C_0(i) d_{0i} \cos(2\pi f_c t + \theta_{0i}) \cos(2\pi f_c t + \hat{\theta}_{0i}) dt = b_0(k) \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{0i} d_{0i} \quad (6)$$

第2项为用户间的干扰:

$$\beta_{int} = \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} b_m(k) C_m(i) C_0(i) \rho_{mi} d_{0i} \cos \bar{\theta}_{mi}, \quad \bar{\theta}_{mi} = \theta_{0i} - \theta_{mi} \quad (7)$$

$\bar{\theta}_{mi}$ 为均匀分布于 $[0, 2\pi]$ 上的随机变量。

第3项为单频干扰:

假设单频干扰,其频率 $f_j \in [f_c, f_c + \frac{N-1}{T_b}]$,等于某一个子载波频率,则 $J(t) = J_n \cos\left[\left(2\pi f_c + \frac{2\pi n}{T_b}\right)t + \theta_n\right]$, $n \in \{0, 1, \dots, N-1\}$,于是

$$\xi = \frac{2}{T_b} \sum_{i=0}^{N-1} \int_{kT_b}^{(k+1)T_b} d_{0i} C_0(i) J_n \cos[2\pi f_c t + \frac{2\pi n}{T_b} t + \theta_n] \cos[2\pi f_c t + \frac{2\pi i}{T_b} t + \hat{\theta}_{0i}] dt = J_n C_0(n) d_{0n} \cos \bar{\theta}_n \quad (8)$$

假设 J_n 亦服从瑞利分布,而 $\bar{\theta}_n = \theta_n - \hat{\theta}_{0n}$,仍然为 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机变量。

第4项为高斯白噪声项:

$$\eta = \frac{2}{T_b} \sum_{i=0}^{N-1} \int_{kT_b}^{(k+1)T_b} n(t) C_0(i) d_{0i} \cos\left(2\pi f_c t + 2\pi i \frac{1}{T_b} t + \hat{\theta}_{0i}\right) dt \quad (9)$$

3 存在单频干扰时的 MC-CDMA 系统性能及单频干扰的抑制

考察等幅合并(Equal Gain Combining: EGC)情况下,MC-CDMA 系统的误码性能。等幅合并情况下,有:

EGC: $d_{0i} = 1$,则输出判决量为:

$$Z_0 = b_0(k) \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{0i} + \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} b_m(k) C_m(k) C_0(k) \rho_{mi} \cos \bar{\theta}_{mi} + J_n C_0(k) \cos \bar{\theta}_n + \eta \quad (10)$$

由文献[6]可知,

$$E(\eta) = 0, \quad \sigma_\eta^2 = NN_0/T_b \quad (11)$$

$$E(\beta_{\text{int}}) = 0, \quad \sigma_{\beta_{\text{int}}}^2 = (M-1)\bar{P}_m \quad (12)$$

同样 $E(\xi) = 0, \quad \sigma_{\xi}^2 = \bar{P}_j \quad (13)$

因此,令 $\rho_0 = \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{0i}$, 则误码率为:

$$P_e = P\{|\rho_0 < \beta_{\text{int}} + \eta + \xi|\} = \int_{\rho_0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{\beta_{\text{int}}}^2 + \sigma_{\eta}^2 + \sigma_{\xi}^2)}} e^{-\frac{y^2}{2(\sigma_{\beta_{\text{int}}}^2 + \sigma_{\eta}^2 + \sigma_{\xi}^2)}} dy = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{\frac{1}{2}\rho_0^2}{(M-1)\bar{P}_m + \frac{NN_0}{T_b} + \bar{P}_j}} \right] \quad (14)$$

当 N 足够大时, 根据中心极限定理, ρ_0 服从高斯分布, 则平均误码率为^[6]:

$$\operatorname{BER}_{\text{EGC}} \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{\pi}{4} \frac{\bar{P}_0 T_b}{(2 - \frac{\pi}{2}) \frac{\bar{P}_0}{N} T_b + (M-1) \frac{\bar{P}_m}{N} T_b + N_0 + \frac{1}{2} \frac{T_b}{N} \bar{P}_j}} \right] \quad (15)$$

一般情况下, 单频干扰平均功率大于期望用户的平均功率, 因而其误码性能大大下降, 为了克服单频干扰的影响, 笔者提出修改的等幅合并方法 (Modified Equal Gain Combining, MEGC), 即:

$$\text{MEGC: } d_{0n} = \frac{1}{J_n}, \quad d_{0i} = 1 \quad (i \neq n, i = 0, 1, \dots, N-1) \quad (16)$$

则 $D = b_0(k) \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq n}}^{N-1} \rho_{0i} + b_0(k) \rho_{0n} / J_n \quad (17)$

$$\beta_{\text{int}} = \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq n}}^{N-1} b_m(k) C_m(i) C_0(i) \rho_{mi} \cos \bar{\theta}_{mi} + \sum_{m=1}^{M-1} b_m(k) C_m(n) C_0(n) \rho_{mn} \cos \bar{\theta}_{mn} / J_n \quad (18)$$

$$\xi = C_0(n) \cos \bar{\theta}_n \quad (19)$$

$$\eta = \frac{2}{T_b} \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq n}}^{N-1} \int_{kT_b}^{(k+1)T_b} n(t) C_0(i) d_{0i} \cos \left(2\pi f_c t + 2\pi i \frac{1}{T_b} t + \bar{\theta}_{0i} \right) dt + \frac{2}{T_b} \int_{kT_b}^{(k+1)T_b} \frac{n(t) C_0(n)}{J_n} \cos \left(2\pi f_c t + \frac{2\pi n t}{T_b} + \bar{\theta}_{0n} \right) dt \quad (20)$$

当 $|J_n| \gg 1$ 时, 上述各式的第2项可以忽略, 则有:

$$\sigma_{\beta_{\text{int}}}^2 \approx \frac{N-1}{N} (M-1) \bar{P}_m \quad (21)$$

$$\sigma_{\xi}^2 = \frac{1}{2} \quad (22)$$

$$\sigma_{\eta}^2 \approx (N-1) N_0 / T_b \quad (23)$$

$$\sigma_{\rho_0}^2 \approx \left(2 - \frac{\pi}{2} \right) \frac{N-1}{N} \bar{P}_0 \quad (24)$$

当 N 足够大, 则 $N-1 \approx N$, 则采用 MEGC 时的误码率近似表示为:

$$\operatorname{BER}_{\text{MEGC}} \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{\pi}{4} \frac{\bar{P}_0 T_b}{(2 - \frac{\pi}{2}) \frac{\bar{P}_0}{N} T_b + (M-1) \frac{\bar{P}_m}{N} T_b + N_0 + \frac{1}{2} \frac{T_b}{N} \bar{P}_j}} \right] \quad (25)$$

显然, 当 $J \gg 1$ 时, 修改后的合并方法, 对接收信号的影响可以忽略不计, 而对单频干扰项的影响却大大减少。

4 数值结果

取 $N = 512, \bar{P}_0 T_b / N_0 = 10, \bar{P}_0 = \bar{P}_m = 1$, 对 $\bar{P}_j / \bar{P}_0 = 10$ 和 $\bar{P}_j / \bar{P}_0 = 100$ 两种情况, 对不同用户数的 $\operatorname{BER}_{\text{EGC}}$ 和 $\operatorname{BER}_{\text{MEGC}}$ 进行计算, 得出的误码率曲线如图2和图3所示。

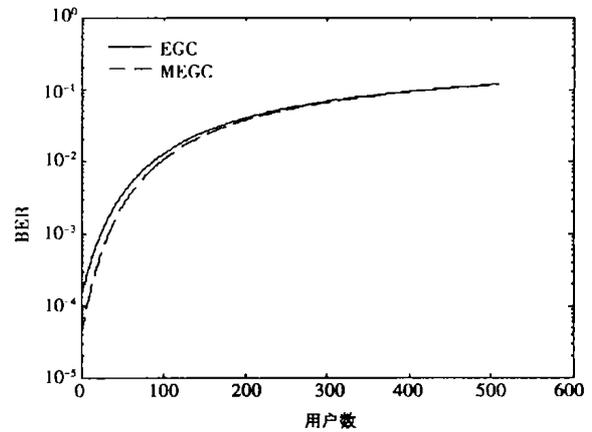


图2 $\bar{P}_j / \bar{P}_0 = 10$, 采用 EGC 和 MEGC 时的 MC-CDMA 系统误码率曲线

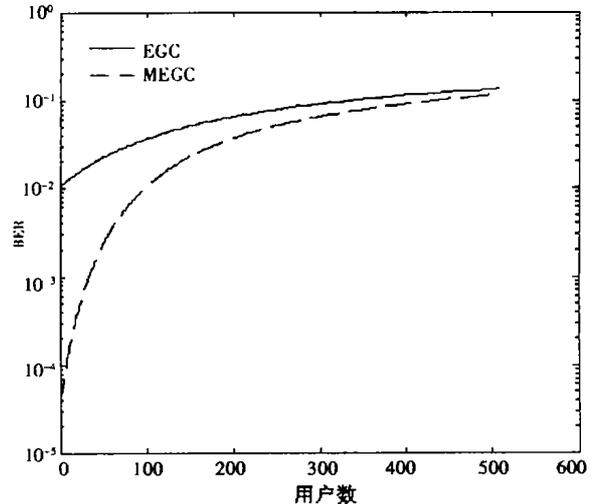


图3 $\bar{P}_j / \bar{P}_0 = 100$, 采用 EGC 和 MEGC 时的 MC-CDMA 系统误码率曲线

由图2和图3可以看出,当单频干扰功率比用户功率大得多时,采用MEGC比单纯采用EGC时,MC-CDMA系统的误码率性能有较大改善;当干/信比固定,用户数较少时,单频干扰占主要成分,采用MEGC时系统的误码性能比采用EGC时的误码性能改善较为明显,随着用户数的增加,用户间的干扰增加,单频干扰所占的比重下降,因而采用MEGC时系统误码性能比采用EGC时的系统误码性能改善效果逐步减弱;当单频干扰与用户间干扰相比,可以忽略不计时,采用MEGC和采用EGC,系统误码性能趋于一致。

参考文献:

- [1] PRASAD R, HARA S. An Overview of Multicarrier CDMA [A]. In Proc. ISSSTA '96 [C]. Mainz, Germany: [s. n.], 1996. 107-114.
- [2] XIANG GUI, TUNG SANG NG. Performance of Asynchronous Orthogonal Multicarrier CDMA System in Frequency Selective Fading Channel [J]. IEEE Trans on Comm, 1999, 47(7): 1 084-1 091.
- [3] YEE N, LINNARTZ J P, FETTWEIS G. Multicarrier CDMA in Indoor Wireless Radio Networks [A]. In Proc PIRMRC '93 [C]. Yokohama, Japan: [s. n.], 1993. 109-113.
- [4] SHIRO KONDO, LAURENCE B MILSTEIN. Performance of Multicarrier DS CDMA Systems [J]. IEEE Transaction on Communications, 1996, 44(2): 238-246.
- [5] CHEUN K, CHOI K, LIM H, et al. Anti-jamming performance of a multicarrier direct-sequence spread-spectrum system [J]. IEEE Trans Commun, 1999, 47: 1 781-1 784.
- [6] 吴俊, 吴伟陵. 编码多载波 CDMA 在瑞利衰落信道下的性能分析 [J]. 北京邮电大学学报, 1998, 21: 23-29.
- [7] 贾怀义, 宫剑. OFDM-CDMA 系统建模仿真及误码率分析 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14(10): 1 296-1 320.
- [8] ESSAM A, SOUROUR, MASAO NAKAGAWA. Performance of Orthogonal Multicarrier CDMA in a Multipath Fading Channel [J]. IEEE Trans Comm, 1996, 44(3): 356-367.
- [9] BRANISLAV M POPOVIC. Spreading Sequences for Multicarrier CDMA System [J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(6): 918-926.

Performance Analysis of Anti-CW Interference in MC-CDMA Systems

HE Shi-biao¹, YANG Shi-zhong²

(1. Department III, Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China;

2. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The multicarrier-code division multiple access (MC-CDMA), which is the combination of direct sequence CDMA (DS-SS) and orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) techniques, offers various advantages over single-carrier CDMA system. Some of the advantages are that MC-CDMA systems possess can remove the intersymbol interference (ISI) and enhance narrow-band interference suppression capabilities. So the MC-CDMA technique becomes a focus in the field of mobile communication. The authors introduce the typical MC-CDMA system model, discuss the decision statistical variable in Rayleigh fading channel included the CW interference, and give the expressions of probability of error in uplink. An approach is proposed with Modified Equal Gain Combining (MEGC) to decrease the effect of CW interference. Theoretical analysis and numerical results show that the anti-CW interference performance of MC-CDMA system can be improved used the MEGC approach.

Key words: MC-CDMA; rayleigh channel; CW interferences; bit error rate; uplink

(编辑 张 革)