

# Ricean 衰落信道下一种正交 多载波 CDMA 系统的性能

周武<sup>✉</sup>, 朱近康

(中国科学技术大学个人通信与扩频实验室, 合肥 230027)

**摘 要:** 本文提出了一种新的多载波码分多址(MC-CDMA)系统. 与传统系统相比, 其主要区别是采用多个并行 MC-CDMA 分支, 每一个分支用一组正交子载波进行调制. 在每个分支上, 使用相同扩频序列的不同码片调制子载波. 这种系统能更有效地利用传输带宽, 实现频率分集. 由于该系统降低了每个子载波上的数据速率, 扩频序列更容易同步. 最后给出了系统在 Ricean 衰落信道下的性能分析.

**关键词:** 多载波; 码分多址; Ricean 衰落信道

**中图分类号:** TN914. 4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2000) 11A-0008-04

## Performance of Orthogonal Multicarrier CDMA System in Ricean Fading Channel

ZHOU Wu-yang, ZHU Jin-kang

(PCN & SS Lab., University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** In this paper, a new multicarrier CDMA system is proposed. Compared with the conventional MC-CDMA system, the main difference is that the new system uses multiple parallel branches, each of which is modulated using a group of orthogonal subcarriers. Note that on each orthogonal subcarrier branch, transmitted data bit after serial to parallel conversion is modulated with a chip of a PN sequence, and not a whole PN sequence. This system can utilize the transmission bandwidth more efficiently and achieve frequency diversity. Furthermore, this system lowers the data rate of each carrier branch, so it is easier to make PN sequence synchronized. The performance of the system is analyzed in a Ricean fading channel.

**Key words:** multicarrier; CDMA; Ricean fading channel

### 1 引言

多载波调制(Multicarrier Modulation, MCM)的基本原理是将所要传输的数据流分解成若干个子数据流, 每个子数据流具有低得多的数据传输比特速率, 并且用这些数据流去并行调制若干个载波, 然后合成输出. 正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)作为多载波调制的一种特殊形式, 早在 1970 年就提出来了. 正交频分复用可以在多径衰落信道中抗时延扩展, 经常被用到高速率数据的传输技术, 如数字音频广播和数字电视系统中<sup>[1~3]</sup>. 但在频率选择性深衰落情况下, OFDM 系统在相应子载波上的数据就遭到破坏, 造成信息的丢失. 为了克服这个问题, OFDM 可以和直接序列扩频相结合, 这样信号就可在多个载波上扩展, 更有效地利用未遭破坏的子载波上包含的信息恢复出原始数据, 实现频率分集. 1993 年随着 CDMA 技术逐步走向实用化, OFDM 与直扩系统(DS-SS)相结合, 提出了多种形式的系统, 如多载波

CDMA (MC-CDMA)<sup>[4~6, 13~14]</sup>、多载波 DS-SS (MC-DS-SS) <sup>[7, 8]</sup>、多音 CDMA (Multitone CDMA)<sup>[9, 10]</sup>及基于小波变换的 MC-CDMA<sup>[11]</sup>. 在文[12]中, R. Prasad 及 S. Hara 对多载波 CDMA 归纳为以下两类: 一类是在频域扩展的多载波系统, 另一类是在时域扩展的多载波系统.

基于多载波并行传输(MCM)的 CDMA 技术以其能提供较大的系统容量, 高速和变速率的综合数据传输, 能同时提供频率和时间分集, 具有较强的抗多址干扰等优点受到人们的广泛关注, 已成为第三代数字移动通信系统研究中的一个热门课题.

本文提出了一种新的多载波 CDMA 系统, 先对原始数据流进行串并转换, 转换后的每一个支路上的数据再用用户扩频码进行扩展. 值得注意的是, 对数据流进行扩展时, 不是用整个扩频序列, 而是用扩频序列的一个 chip, 即扩展是在频域下完成的. 这样就降低了每一子载波信道上的数据传输速率,

扩展了码片时宽,而展宽的码片信号使得扩频序列的同步变得容易。

本文第二部分描述系统模型,性能分析在第三部分给出,第四部分为数值结果,第五部分为结论。

## 2 系统模型

设第  $k$  个用户的原始数据信号为  $a_k(t)$ , 比特周期为  $T_b$ , 经串并转换后, 分为  $M$  个支路,  $b_{k,1}, b_{k,2}, \dots, b_{k,M}$ , 每个支路上的比特周期为  $MT_b$ , 对每一支路用一组正交子载波进行调制, 对每一子载波信道用同一 PN 序列的不同码片进行调制, 然后合成发送, 如图 1 所示。

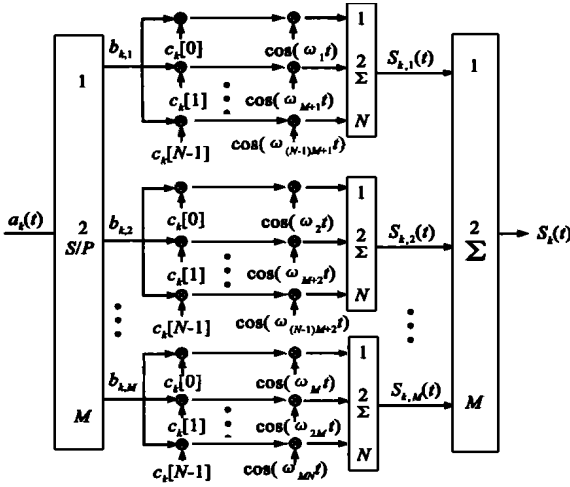


图 1 MC-CDMA 发射部分结构图

这样第  $k$  个用户第  $m$  个支路的发射信号为:

$$S_{k,m}(t) = b_{k,m}(t) \sum_{n=0}^{N-1} c_k[n] \cos(\omega_{m,n}t) \quad (1)$$

其中,  $c_k[n]$ ,  $n = 0, 1, \dots, N-1$  是第  $k$  个用户的码长为  $N$  的 Walsh-Hadamard 码序列。

这样, 第  $k$  个用户的发射信号为:

$$S_k(t) = \sum_{m=1}^M S_{k,m}(t) \quad (2)$$

设第  $k$  个用户的衰落信道的传输函数为

$$H_k(n, m) = \alpha_{k, nM+m} e^{j\phi_{k, nM+m}} \quad (3)$$

其中  $\alpha_{k, nM+m}$  和  $\phi_{k, nM+m}$  分别是第  $k$  个用户在频率  $\omega_{k, nM+m}$  时信道的随机幅度和相位, 对所有用户和子载波来说,  $\phi_{k, nM+m}$  在  $(0, 2\pi)$  内是独立等分布的均匀分布的随机变量,  $\alpha_{k, nM+m}$  假设为独立等分布的 Ricean 随机变量, 其概率密度函数为:

$$f_{\alpha_{k, nM+m}}(\alpha_{k, nM+m}) = \frac{\alpha_{k, nM+m}}{2} e^{-\frac{\alpha_{k, nM+m}^2 + A^2}{2}} \frac{A}{\alpha_{k, nM+m}} I_0\left(\frac{A \alpha_{k, nM+m}}{2}\right), A > 0, \alpha_{k, nM+m} \geq 0 \quad (4)$$

其中  $\frac{A^2}{2}$  表示第  $k$  个用户在频率  $\omega_{k, nM+m}$  的散射功率, 并假设对不同载波是相等的,  $I_0(\cdot)$  是零阶修正 Bessel 函数。用 Ricean  $K$ -因子表示上式, 就为:

$$f_{\alpha_{k, nM+m}}(\alpha_{k, nM+m}) = (K+1) e^{-\frac{K}{K+1} \frac{\alpha_{k, nM+m}^2}{\bar{P}_{k, nM+m}}} e^{-\frac{1}{K+1} \frac{\alpha_{k, nM+m}^2}{\bar{P}_{k, nM+m}}} \quad (5)$$

其中  $\bar{P}_{k, nM+m}$  为第  $k$  个用户在载波  $\omega_{k, nM+m}$  的平均功率。

值得注意的是, 信道模型在上行链路和下行链路中是有区别的。在上行链路传输中(即从移动台到基站的传输), 基站接收到的信号是各个终端经过不同途径到达的信号, 因此随机幅度  $\alpha_{k, nM+m}$  和随机相位  $\phi_{k, nM+m}$  对每个用户的每个载波而言是不相同的。我们假设这些变量是独立的, 因此对任一幅度或相位作调整, 不会同时校正到其它幅度或相位。在下行链路中(即从基站到移动台的传输), 接收机接收到的有用信号与干扰是通过同一个信道进行传输的, 因此只有一个随机幅度和随机相位, 即

$$\alpha_{k, nM+m} = \alpha_{1, nM+m}, \phi_{k, nM+m} = \phi_{1, nM+m} \quad (6)$$

这意味着如果校正所需用户的幅度或相位, 对其它干扰信号幅度或相位也作了调整。

在接收机中, 接收信号为

$$r(t) = \sum_{k=1}^K S_k(t) \alpha_{k, nM+m} e^{j\phi_{k, nM+m}} + n(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{N-1} b_{k,m}(t) c_k[n] \cos(\omega_{m,n}t + \phi_{k, nM+m}) + n(t) \quad (7)$$

其中  $n(t)$  是加性高斯白噪声 (AGWN)。

假定用户  $k=1$  为所需接收的信号, 其接收机模型如图 2 所示。

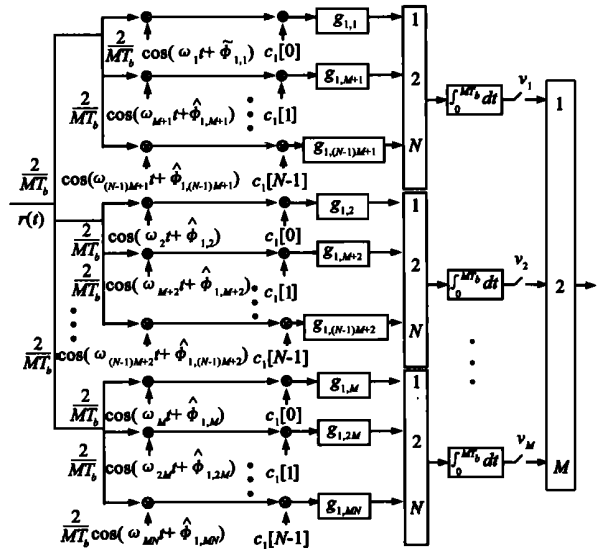


图 2 MC-CDMA 接收机结构

其中  $g_{1,x}$ ,  $x = 1, 2, \dots, MN$ , 是用户 1 接收机中每一支路的接收增益。

## 3 性能分析

假设用户  $k=1$  为所需信号, 则第一个支路的判决变量  $v_1$  为:

$$v_1 = \frac{1}{MT_b} \int_0^{MT_b} r(t) c_1[n] \cos(\omega_{nM+1}t + \phi_{1, nM+1}) g_{1, nM+1} dt$$

$$= \frac{1}{MT_b} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{N-1} b_{k,m}[i] c_k[n] \alpha_{k, nM+m} \cos(\omega_{m,n}t + \phi_{k, nM+m}) g_{1, nM+m}$$

$$+ \phi_{k, nM+m}) \cdot c_1[l] \cos(\angle_{IM+1} t + \phi_{0, IM+1}) g_{1, IM+1} dt \\ + \frac{2}{MT_b} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{(i+1)MT_b} n(t) c_1[n] g_{1, nM+1} \cos(\angle_{nM+1} t + \phi_{1, nM+1}) dt \quad (8)$$

噪声项 为:

$$= \frac{2}{MT_b} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{(i+1)MT_b} n(t) c_1[n] g_{1, nM+1} \cos(\angle_{nM+1} t + \phi_{1, nM+1}) dt \quad (9)$$

假设系统有良好的同步和相位校正, 即  $\phi_{1, nM+1} = \phi_{1, nM+1}$ , 判决变量  $v_1$  可写为:

$$v_1 = D + I + \quad (10)$$

其中  $D$  为所需信号,  $I$  是干扰项, 是噪声项. 经过公式简化

$$D = b_{1,1} [i] \sum_{n=0}^{N-1} g_{1, nM+1} \quad (11)$$

$$I = \sum_{k=2}^K \sum_{n=0}^{N-1} b_{k,1} [i] c_k[n] c_1[n] g_{1, nM+1} \cos \phi_{k, nM+1} \quad (12)$$

其中  $\phi_{k, nM+1} = \phi_{k, nM+1} - \phi_{1, nM+1}$ , 在  $[0, 2\pi]$  内是均匀分布. 由式(6)可知, 在上行链路,  $\phi_{k, nM+1}$  不为零, 在下行链路, 它为零.

考虑等增益合成 (EGC) 和最大比率合成 (MRC) 两种情况.

在等增益合成 (EGC) 情况下,  $g_{1, nM+1} = 1$ . 有用信号  $D$  为

$$D = b_{1,1} [i] \sum_{n=0}^{N-1} g_{1, nM+1} \quad (13)$$

干扰信号  $I$  的均值为零, 方差为

$$\sigma_I^2 = (K_u - 1) \bar{P}_{k,1} \quad (\text{上行}) \quad (14)$$

其中  $\bar{P}_{k,1}$  是第  $k$  个用户第一个支路上的平均发射功率.

$$\sigma_I^2 = (K_u - 1) N \sum_{n=0}^{N-1} g_{1, nM+1}^2 = 2(K_u - 1) (1 - \frac{1}{K}) \bar{P}_{1,1} \quad (\text{下行}) \quad (15)$$

其中,  $\bar{P}_{1,1}$  是第 1 个用户第一个支路上的平均发射功率.

$$= \frac{1}{4} \frac{e^{-K}}{(K+1)} \left[ (1+K) I_0\left(\frac{K}{2}\right) + KI_1\left(\frac{K}{2}\right) \right]^2 \quad (16)$$

噪声 的均值为零, 方差为

$$\sigma^2 = \frac{NN_0}{MT_b} \quad (17)$$

假定系统其他用户的干扰用高斯噪声来近似, 则系统误码率为

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{\frac{1}{2} \left( \sum_{n=0}^{N-1} g_{1, nM+1}^2 \right)^2}{\sigma^2 + \frac{1}{2} \left( \sum_{n=0}^{N-1} g_{1, nM+1}^2 \right)^2}} \right) \quad (\text{上行}) \quad (18)$$

如载波数较多,  $\sum_{n=0}^{N-1} g_{1, nM+1}^2$  可用大数定理近似 (LLN) 法近似为  $NE[\sum_{n=0}^{N-1} g_{1, nM+1}^2]$ , 为

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{\bar{P}_{1,1} \cdot MT_b \cdot N}{N(K_u - 1) \bar{P}_{k,1} MT_b + NN_0}} \right) \quad (\text{上行}) \quad (19)$$

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{\bar{P}_{1,1} \cdot MT_b \cdot N}{N(2(K_u - 1)(1 - \frac{1}{K}) \bar{P}_{1,1} MT_b + NN_0)}} \right) \quad (\text{下行}) \quad (20)$$

在最大比率合成 (MRC) 情况下,  $g_{1, nM+1} = 1, nM+1$ , 信号  $D$  为

$$D = b_{1,1} [i] \sum_{n=0}^{N-1} g_{1, nM+1} \quad (21)$$

干扰信号  $I$  的方差为

$$\sigma_I^2 = \frac{2(K_u - 1)}{N} \bar{P}_{k,1} \bar{P}_{1,1} \quad (\text{上行}) \quad (22)$$

$$\sigma_I^2 = (K_u - 1) N [E_{1, nM+1}^4 - (E_{1, nM+1}^2)^2] \\ = \frac{K_u - 1}{N} \frac{8K + 4}{(K + 1)^2} \bar{P}_{1,1}^2 \quad (\text{下行}) \quad (23)$$

噪声信号 的方差为

$$\sigma^2 = \frac{2N_0}{MT_b} \bar{P}_{1,1} \quad (24)$$

系统误码率为

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{\bar{P}_{1,1} \cdot MT_b \cdot N}{N(K_u - 1) \bar{P}_{k,1} MT_b + NN_0}} \right) \quad (\text{上行}) \quad (25)$$

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{N \bar{P}_{1,1} \cdot MT_b}{N(K_u - 1) \frac{4K + 2}{(K + 1)^2} \bar{P}_{1,1} MT_b + NN_0}} \right) \quad (\text{下行}) \quad (26)$$

## 4 数值结果

我们在 Ricean 衰落信道下分别给出了系统上行链路和下行链路的数值结果. 在上行链路中, 当用户数为 20, Ricean K 因子为 6, 支路数为 8, 扩频码长为 64 和 128 时, 系统误码率与信噪比的关系如图 3 所示.

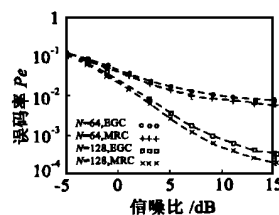


图 3 在不同扩频码长的情况下系统误码率与信噪比的关系图 (上行链路)

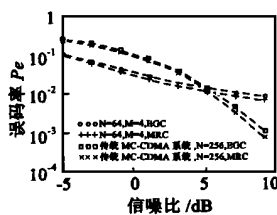


图 4 与传统 MC-CDMA 系统的性能比较 (上行链路)

与传统 MC-CDMA 系统<sup>[13]</sup>的比较如图 4 所示. 为了便于比较, 我们假设两系统所用的带宽相等, 即在新系统中, 假设支路数为 4, 扩频码长为 64, 即有 256 个子载波, 则相应地取文献<sup>[13]</sup>中的扩频码长为 256, 也即有 256 个子载波, 两系统的用户数都为 20. 由图 4 可见, 在低信噪比 ( $\leq 5$  dB) 的情况下, 新系统的性能要优于传统系统的性能. 在同一个系统内, 最大比率合成 (MRC) 情况下系统的性能要优于等增益合成 (EGC) 情况下系统的性能.

下行链路中, 当 Ricean K-因子为 6, 用户数为 20, 支路数为 4, 扩频码长为 64 和 128 时, 系统误码率与信噪比的关系如图 5 所示.

在下行链路, 它与传统 MC-CDMA 系统的性能比较如图 6 所示. 在低信噪比 ( $\leq 8$  dB) 的情况下, 新系统的性能要优于传统系统的性能, 在同一个系统内, 最大比率合成 (MRC) 情况下系统的性能要优于等增益合成 (EGC) 情况下系统的性能.

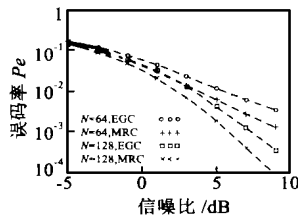


图 5 在不同扩频码长的情况下系统误码率与信噪比的关系图(下行链路)

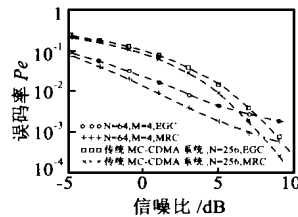


图 6 与传统 MC-CDMA 系统的性能比较(下行链路)

## 5 结论

本文提出了一种新的多载波 CDMA 系统,并在 Ricean 衰落信道下对系统的性能进行了分析和模拟,结果表明在低信噪比的情况下,新系统的性能要明显优于传统的 MC-CDMA 系统。

## 参考文献:

- [1] T. de Couasnon, R. Monnier and J. Rault. OFDM for digital TV broadcasting [J]. Signal Proc., Sep. 1994, 39(1, 2): 1 - 32.
- [2] P. J. Tourtier, R. Monnier and P. Lopez. Multicarrier modem for digital HDTV terrestrial broadcasting [J]. Signal Proc., Dec. 1993, 5(5, 6): 379 - 403.
- [3] Rault, D. Castelain and Floch. The COFDM technique and its applications in DAB towards mobile receivers [A]. IEEE Globecom 89 [C], Dallas, USA, 1989: 428 - 432.
- [4] Volker Aue and Gerhard P. Fettweis. Higher-level multi-carrier modulation and its implementation [A]. Proc. of IEEE Int. Symp. on Spread Spectrum Techniques & Applications [C], Mainz, Germany, 1996: 126 - 130.
- [5] Armin Dekorsy and Karl-Dirk Kammeyer. M-ary orthogonal modulation for multi-carrier spread-spectrum uplink transmission [A]. Proc. IEEE International Conference on Communications 1998 [C], Atlanta, USA, June 1998: 1004 - 1008.
- [6] Armin Dekorsy, Stephan Fischer, and Karl-Dirk Kammeyer. Maximum likelihood decoding of M-ary orthogonal modulated signals for multi-carrier spread-spectrum systems [A]. IEEE 9th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications [C], Boston, USA, Sep. 1998: 8 - 11.
- [7] Shiro Kondo, Laurence B. Milstein. Performance of multicarrier DS-SSMA systems [J]. IEEE Trans. on Comm., Feb. 1996, 44(2): 238 - 246.
- [8] Essam A. Sourour, Masao Nakagawa. Performance of orthogonal multi-carrier CDMA in a multipath fading channel [J]. IEEE Trans. On Comm., March 1996, 44(3): 356 - 367.
- [9] L. Vandendorpe, O. van de Wiel. Fractionally spaced decision feedback joint detection for multitone CDMA systems [A]. Proc. of IEEE Int. Symp. on Spread Spectrum Techniques & Applications [C], Mainz, Germany, 1996: 1361 - 1365.
- [10] L. Vandendorpe. Multitone direct sequence CDMA system in an indoor wireless environment [A]. Proc. of IEEE First Symposium of Communications and Vehicular Technology [C], Oct. 1993: 4.1.1 - 4.1.8.
- [11] KyungHi Chang, XuDuan Lin and MunGeon Kyeong. Performance analysis of wavelet-based MC-CDMA for FH/MTS/IMT-2000 [A]. Proc. of IEEE Int. Symp. on Spread Spectrum Techniques & Applications [C], Mainz, Germany, 1996: 1356 - 1360.
- [12] Ranjee Prasad and Shinsuke Hara. An overview of multi-carrier CDMA [A]. Proc. of IEEE Int. Symp. on Spread Spectrum Techniques & Applications [C], Mainz, Germany, 1996: 107 - 114.
- [13] Nathan Yee and J. P. Linnartz. Controlled equalization of multi-carrier CDMA in an indoor Ricean fading channel [A]. IEEE Vehicular Technology Conference [C], Stockholm, Sweden, May 1994: 1665 - 1669.
- [14] Nathan Yee, J. P. Linnartz and Gerhard Fettweis. Multicarrier CDMA in indoor wireless radio networks [A]. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications [C], Yokohama, Japan, Sep. 1993: 109 - 113.

## 作者简介:



周武 1972 年生, 1993 年、1996 年分别在西安电子科技大学获工学学士、硕士学位, 2000 年获中国科学技术大学工学博士学位, 主要研究方向为移动通信、无线 Internet 接入。



朱近康 中国科学技术大学教授, 博导, 该校信息科学技术学院常务副院长, 国家 863 计划通信主题个人通信专家组组长, 专业方向是移动通信与无线通信、扩频通信、通信中的信号处理。

(上接第 7 页)

- [3] G. S. White and D. J. Costello. Turbo coding with differentially coherent and noncoherent modulation on nonfading and fading channels [C]. in Proc. IEEE ISIT 97, Ulm, Germany, July, 1997.
- [4] P. Hoeher and J. Lodge. Turbo DPSK: Iterative Differential PSK Demodulation and Channel Decoding [C]. ICC 98, 598.
- [5] J. H. Lodge, R. Young, P. Hoeher. Separable MAP filters for the decoding of product and concatenated codes [C]. in Proc. IEEE ICC 93, Geneva, Switzerland, May, 1993.

- [6] R. Raheli, A. Polydoros, and C. K. Tzou. Per-survivor Processing: A general approach to MLSE in uncertain environments [J]. IEEE Trans. Commun., Feb. 1995, 43: 354 - 364.