

通用多载波 CDMA 无线传输体制及其研究进展¹

黎海涛 陆建华

(清华大学微波与数字国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 为实现高速无线多媒体信息传输,近年来提出了一种新的无线传输体制——通用多载波码分多址(GMC CDMA)。在 GMC CDMA 中,通过把信息符号流转换成符号块后,在符号块级冗余扩频,消除了多用户间干扰和符号间干扰,从而具有对信道衰落不敏感、频谱效率高等优点,提高了系统误比特率性能和容量,是新一代无线通信系统中极具发展前景的技术体制。该文综述了 GMC CDMA 的原理、设计、性能特点以及研究进展等,并讨论了几个热点研究问题。

关键词: 通用多载波,预编码,分块传输,符号块扩频

中图分类号: TN919.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2003)12-1695-08

Overview of Generalized Multicarrier CDMA for Wireless Transmission

Li Hai-tao Lu Jian-hua

(State Key Lab on Microwave & Digital Comm., Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

Abstract A novel Generalized MultiCarrier CDMA (GMC CDMA) transmission scheme has been proposed recently. With a block-wise transmission and spreading, GMC CDMA has been proven to be able to eliminate intersymbol interference and multiuser interference, while guaranteeing a good symbol recovery in multipath fading channel with improved bandwidth efficiency. This paper provides an intuition for the principle and design of GMC CDMA, summarizes research advancement in GMC CDMA and discusses several hot-spots of the research in the future.

Key words Generalized MultiCarrier(GMC), Precoding, Block transmission, Block-wise spreading

1 引言

码分多址(CDMA)是在第三代移动通信系统中得到广泛应用的一种先进的扩频多址技术。在 CDMA 系统中,采用不同伪随机序列对各个用户的信息扩频。接收端利用不同序列间的正交性解扩并分离出用户信息。但在高速无线应用环境下,频率选择性多径传播引起的符号间干扰(ISI)和用户扩频码不正交引起的多用户间干扰(MUI)降低了系统性能。而正交频分复用(OFDM)把发射信号分成多个相互正交的子载波并行传输,使每个子信道相对平坦,大大减小了符号间干扰,适用于多径环境和频率选择性衰落信道中的高速信息传输。

结合 CDMA 扩频和 OFDM 调制二者优点的 OFDM CDMA 作为一项未来移动通信系统的关键技术得到深入研究。已提出了 3 种多载波传输与码分多址相结合的无线传输方案: MC CDMA, MC DS-CDMA, (Multiple-Tone)MT CDMA。MC CDMA 中,各个用户数据经过频域扩频、OFDM 调制后发送,保留了 OFDM 与 CDMA 的各自特性。MC DS-CDMA 中,发送端对各个用户的信息串并转换后进行时域扩频,然后再调制到各个子载波上,信号相当于调

¹ 2003-01-03 收到, 2003-04-21 改回

国家自然科学基金重点项目(资助号: 60132010)

制在各个子载波上的 CDMA 信号的叠加, 不再具有 OFDM 的抗码间串扰能力. MT CDMA 与 MC DS-CDMA 类似, 不同之处是它的扩频码码长与子载波数目的比值更大. 综合比较而言, MC CDMA 总体性能优于 MC DS-CDMA 和 MT CDMA^[1].

MC CDMA 虽采用了正交码来区分不同用户, 但它利用所有子载波发送同一符号, 故带宽利用率低. 而仅采用 OFDM 调制的正交频分多址 (OFDMA) 中, 各用户的载波重叠, 频带利用率高, 但在每个 OFDM 符号内, 每个信息符号通过各个子载波单独传送, 若某个子信道处于深度衰落, 则会造成信息的损失. 通常 MC CDMA、OFDMA 中采用信道编码等技术以抗信道衰落, 均需耗费一定带宽资源.

针对现有各种多载波技术的缺陷, 为实现高速率无线多媒体信息传输, 近年来提出了一种新的无线传输体制——通用多载波 (Generalized MultiCarrier, GMC)CDMA^[2]. 它通过对发射符号分块传输 (block transmission), 以及在符号块级扩频 (block-wise spreading), 从而具有抗 MUI 和 ISI, 对信道衰落不敏感, 频谱效率高等优点, 提高了系统误比特率 (BER) 性能和容量, 是一项极具发展前景传输机制. 本文综述了 GMC CDMA 原理、设计、性能和研究现状等方面内容. 文中第 2 节分析了 GMC CDMA 分块传输、符号块扩频抗 MUI/ISI 的原理, 第 3 节介绍了 GMC CDMA 的设计, 第 4 节总结了 GMC CDMA 研究现状, 讨论了一些热点研究课题, 最后给出了结论.

2 GMC CDMA 原理

2.1 系统结构

GMC CDMA 的提出始于“一种相互正交的用户码接收机 (AMOUR)^[3]”, AMOUR 的设计思想是:

(1) 在频域消除 MUI: 因为接收信号在时域等于发射信号与线性时不变信道响应的卷积, 在频域则等于发射信号与信道频域响应之积, 故若发射信号在频域不重叠 (如正交), 通过无线信道传输后, 则接收信号在频域保存了不重叠性, 进而可分离出来.

(2) 发射端引入冗余保证符号恢复: 若仅如 OFDMA 那样, 每个用户仅用一个频率 (子载波) 发射, 当信道在该频率处出现零点时, 将无法辨识用户信息. 为保证恢复用户信号, 吸取 MC CDMA 的思想, 采用更多子载波 (冗余) 来传送用户的信息.

AMOUR 是单速率机制, 文献 [2, 4] 进一步把它推广到多速率情况下并采用低复杂度的 IFFT 和 FFT 实现 (同于 OFDM), 提出了 GMC CDMA 传输体制, 其结构如图 1 所示.

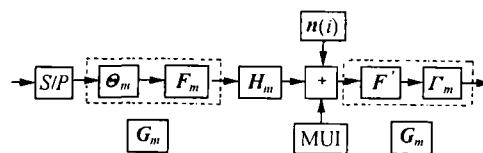


图 1 GMC CDMA 离散基带模型

第 m 个用户的发射符号序列 $s_m(i)$ 经串 / 并变换成长为 K 的符号块 $s_m(i) = [s_m(iK) \cdots s_m(iK + K - 1)]$, 利用 $P \times K$ 预编码矩阵 C_m (分为内码 $J \times K$ 阵 Θ_m 和外码 $P \times J$ 阵 F_m ($P \geq J \geq K$)) 把 $s_m(i)$ 映射成长为 $P > K$ 的符号块 $u_m(i)$: $u_m(i) = C_m s_m(i)$. 符号 $u_m(i)$ 通过 L 阶信道矩阵 H_m 后, 接收向量为

$$x(i) = \sum_{m=0}^M H_m C_m s_m(i) + n(i) \quad (1)$$

即为 GMC CDMA 模型, 式中 $\mathbf{n}(i)$ 为噪声向量. 在接收端, 采用 $J \times P$ 阵 \mathbf{G}_m 解扩后的用户 m 符号为

$$\mathbf{y}_m(i) = \mathbf{G}_m \mathbf{x}(i) = \mathbf{G}_m \mathbf{H}_m \mathbf{C}_m \mathbf{s}_m(i) + \mathbf{G}_m \mathbf{n}(i) + \sum_{\mu=0, \mu \neq m}^{M-1} \mathbf{G}_m \mathbf{H}_\mu \mathbf{C}_\mu \mathbf{s}_\mu \quad (2)$$

最后一项为 MUI, 从上式看到, 需设计 \mathbf{C}_m 和 \mathbf{G}_m 消除 MUI. 我们从 GMC CDMA 模型式出发来分析现有的单 / 多载波 CDMA 系统. 在单载波 DS CDMA 中, 用户 m 的符号被处理增益 P 的码向量 $\mathbf{c}_{m,0} = [c_m(0) \cdots c_m(P-1)]^T$ 扩频. 对应于模型 (1) 式中, 则 $\mathbf{C}_m := \mathbf{c}_{m,0}$, 即 $P \times K$ 码矩阵 \mathbf{C}_m 降为 $P \times 1$ 向量 $\mathbf{c}_{m,0}$. 它的缺点是即使在发送端分配给各个用户的扩频码正交, 经过频率选择性多径传播后, 采用最优的极大似然 (ML) 检测也不一定能解调发射符号, 即符号级扩频不能保证符号的恢复. 若令 $K = 1$, 则 $\mathbf{C}_m := \mathbf{c}_m = \mathbf{F} \mathbf{c}_{m,0}$, $P \times P$ 阵 \mathbf{F} 对每个用户扩频序列实现 IFFT 变换, $\mathbf{c}_{m,0}$ 同于单载波 DS CDMA 的扩频码, 则得到 MC CDMA 的表示式. 若选择 $P \times K$ 码矩阵 $\mathbf{C}_m = [\mathbf{D}_m(f_1)\mathbf{c}_{m,0} \cdots \mathbf{D}_m(f_{N_c})\mathbf{c}_{m,0}]$, $\mathbf{D}_p(f_i)$ 为元素为 $\exp(j2\pi f_i n)$ 的 $P \times P$ 对角阵, 则得到 MC DS-CDMA 的模型式, MT CDMA 是 MC DS-CDMA 的特殊形式 (子载波频率为 $f_i = i/P$). 可见, GMC CDMA 模型可以描述现有的单 (多) 载波 CDMA 系统, 故称之为通用多载波 CDMA. 下面分析 GMC CDMA 抗 MUI/ISI 原理.

2.2 分块传输

串行和并行传输是通信系统中两种基本的传输方式. 在串行系统中, 一般采用自适应均衡器消除 ISI, 但随着传输速率的提高, 均衡器的抽头数增多, 系统复杂度增加. 而并行传输方式中每支路传输速率相对较低, 具有抗 ISI 和信道衰落的能力. OFDM 是利用离散傅氏变换实现的多载波调制并行传输技术, 它将高速数据调制到多个正交子信道中并行传输. 同时, 符号之间插入原信号的时域循环扩展 (循环前缀 CP) 作为保护间隔消除符号块间串扰 IBI. 这种把输入符号分块并在符号块间加入保护时隙的传输方式又称为分块传输^[2], 下面分析分块传输的原理.

定义串 / 并变换后长为 $J (J \gg L, L$ 为 FIR 信道阶数) 的第 i 个发射符号块为 $\mathbf{u}(i) = [u(iJ), u(iJ+1), \cdots, u(iJ+J-1)]^T$, 经过多径传播信道后, 接收符号块为 $\mathbf{x}(i) = [x(iJ), x(iJ+1), \cdots, x(iJ+J-1)]^T$, 它们满足 $\mathbf{x}(i) = \mathbf{H}_0 \mathbf{u}(i) + \mathbf{H}_1 \mathbf{u}(i-1) + \mathbf{n}(i)$. 式中 \mathbf{H}_0 是第一列为 $[h(0), \cdots, h(L), 0, \cdots, 0]^T$ 的 $J \times J$ 的下三角 Toeplitz 阵, \mathbf{H}_1 为第一行是 $[0, \cdots, 0, h(L), \cdots, h(1)]^T$ 的 $J \times J$ 的上三角 Toeplitz 阵, 噪声向量为 $\mathbf{n}(i) = [n(iJ), n(iJ+1), \cdots, n(iJ+J-1)]^T$. 式中第 2 项表示发射信号通过多径传播后产生的 IBI. 消除 IBI 的方法有两种^[5]: 在符号块间插入 CP 和在发射符号块后补零 (ZP, Zero Padding). 若采用矩阵操作, 引入 $J \times K$ 保护矩阵 \mathbf{T} , 接收符号块为

$$\mathbf{x}(i) = \mathbf{H}_0 \mathbf{T} \mathbf{u}(i) + \mathbf{H}_1 \mathbf{T} \mathbf{u}(i-1) + \mathbf{n}(i) \quad (3)$$

插入 CP 时, 保护矩阵 $\mathbf{T} = \mathbf{T}_{\text{CP}} = [\mathbf{I}_{\text{CP}}^T \quad \mathbf{I}_K^T]^T$, 其中 \mathbf{I}_{CP} 为单位阵 \mathbf{I}_K 后的 $J-K$ 行, 它在发射符号块间插入 $L = J-K$ 行保护向量. 在接收端, 采用接收矩阵 $\mathbf{R}_{\text{CP}} = [\mathbf{0}_{K \times L} \quad \mathbf{I}_K]$ 删除 CP, 且 $\mathbf{R}_{\text{CP}} \mathbf{H}_1 = \mathbf{0}_{K \times J}$ 消除了 IBI. 通过矩阵 \mathbf{T}_{CP} 和 \mathbf{R}_{CP} 操作, 得到循环矩阵 $\mathbf{H} = \mathbf{R}_{\text{CP}} \mathbf{H}_0 \mathbf{T}_{\text{CP}}$, 故接收向量 $\mathbf{x}(i) = \mathbf{H} \mathbf{u}(i) + \mathbf{n}(i)$. \mathbf{H} 有一个重要性质, 若令 \mathbf{F} 和 \mathbf{F}^{-1} 分别为 N 点的 FFT 阵和 IFFT 阵, 则 $\mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{F}^{-1} = \mathbf{D}_H = \text{diag}[H(e^{j0}), H(e^{j(2\pi/N)}), \cdots, H(e^{j(2\pi/N)(N-1)})]$.

当采用 ZP 分块传输时, $\mathbf{T} = \mathbf{T}_{ZP} = [\mathbf{I}_K^T \quad \mathbf{0}_{L \times K}^T]^T$, 即在两个符号块之间的保护时间内不发送信号, 易证 $\mathbf{H}_1 \mathbf{T}_{ZP} = \mathbf{0}_{K \times J}$, 得到无 IBI 的接收符号为 $\mathbf{x}(i) = \mathbf{H}\mathbf{u}(i) + \mathbf{n}(i)$, 式中高矩阵 $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 \mathbf{T}_{ZP}$ 总为满秩, 总能保证信道可逆并恢复发射符号。

2.3 符号块扩频

把符号流转换成符号块后, GMC CDMA 通过在符号块级冗余扩频获得抗 MUI/ISI 能力。之所以称为“冗余”, 是因为采用预编码器把每个符号块 (K 个符号) 预编码成 $J = K + L$ 个符号并利用 J 个子载波发送, 获得频率分集能力。这样, 即使 J 个子载波中有 L 个载波存在深度衰落, 也能保证其他 K 个载波上的符号免受此衰落影响。为揭示符号块扩频抗 MUI/ISI 原理, 把扩频和解扩矩阵改写为

$$\mathbf{C}_m = \mathbf{F}_m \Theta_m = (\mathbf{F}^H \Phi_m) \Theta_m, \quad \mathbf{G}_m = \Gamma_m \mathbf{F}'_m = \Gamma_m (\Phi_m^T \mathbf{F}) \quad (4)$$

其物理意义为: $J \times K$ 阵 Θ_m 把第 i 个符号块 $s_m(i)$ 线性映射 (预编码) 成 J 个符号 $\Theta_m s_m$; 通过 $N \times J$ 载波选择矩阵 Φ_m , 符号 $\Theta_m s_m$ 被映射到用户 m 的 J 个特征载波上得到 $\Phi_m \Theta_m s_m$; 最后, IFFT 阵 \mathbf{F}^H 进行 OFDM 调制。用户数为 M 的系统子载波集 $\mathcal{F} := \{\exp(j2\pi l/N), l = 0, 1, \dots, N-1\}$, $N = MJ$ 为总子载波数, 它包含 M 个不连续的子集 $\{\mathcal{F}_m\}_{m=0}^{M-1}$, 且满足 $\cup_{m=0}^{M-1} \mathcal{F}_m = \mathcal{F}$, $\mathcal{F}_\mu \cap \mathcal{F}_m = \phi, \forall \mu \neq m$, 子集 \mathcal{F}_m 包含用户 m 的 J 个子载波, 称为特征载波。定义用户 m 的第 j 个特征载波为 $\rho_{m,j}$, 若 $\rho_{m,j} = \exp(j2\pi l/N) \in \mathcal{F}$, 则 Φ_m 的 (l, j) 元素为 1, 否则为 0。在接收端, \mathbf{F} 执行 FFT 解调, Φ_m^T 从 $N = MJ$ 个子载波中提取用户 m 的 J 个预编码符号, $K \times J$ 阵 Γ_m 对接收符号均衡恢复信号。重写用户 m 的解扩符号为

$$\mathbf{y}_m(i) = \Gamma_m \sum_{\mu=0}^{M-1} \Phi_m^T \mathbf{F} \mathbf{H}_\mu \mathbf{F}^H \Phi_\mu \Theta_\mu s_\mu(i) + \Gamma_m \Phi_m^T \mathbf{F} \mathbf{n}(i) \quad (5)$$

根据前面分析, 我们有以下结论: $\mathbf{F} \mathbf{H}_\mu \mathbf{F}^H$ 为 $N \times N$ 对角阵 \mathbf{D}_μ ; 由于各用户间子载波分配非重叠, 各子载波选择矩阵 Φ_m 正交, 即 $\Phi_\mu^T \Phi_m = \delta(\mu - m) \mathbf{I}_J$; Φ_m 的每列仅有一个非零元素, 满足 $\mathbf{D}_m \Phi_m = \Phi_m \mathbf{D}_m$, 最后得到

$$\mathbf{y}_m(i) = \Gamma_m [\mathbf{D}_m \Theta_m s_m(i) + \Phi_m \mathbf{F} \mathbf{n}(i)] := \Gamma_m \bar{\mathbf{x}}_m(i) \quad (6)$$

可以看到, MUI 被消除, 且多用户信道转化为并行独立的单用户信道。若 $\mathbf{D}_m \Theta_m$ 满秩, 即 $\text{rank}(\mathbf{D}_m \Theta_m) = K, \forall m \in [0, M-1]$ (Θ_m 的任意 K 行都线性独立), 则可用迫零 (ZF) 均衡器 $\Gamma_m = (\mathbf{D}_m \Theta_m)^+$ 等恢复 $s_m(i)$ 。

根据上面分析我们知道, 符号块扩频由内码 Θ_m 和外码 \mathbf{F}_m 完成, 其中内码 Θ_m 引入冗余抗频率选择性信道衰落; 外码 \mathbf{F}_m 使各用户子载波正交, 同时实现用户扩频码在复域正交, 多径传播后易于分离。所以, 内、外码相结合的符号块扩频使 GMC CDMA 获得抗 MUI/ISI 能力。

3 GMC CDMA 设计

3.1 系统设计

GMC CDMA 系统设计可分为以下步骤: 首先, 确定系统子载波数、符号块长度和冗余符号数等。(1) 根据分配的信道带宽, 确定总子载波数 N (为 2 的幂); (2) 对给定带宽 W , 每个符号块的持续时间为 $T = 1/W$, 设信道的最大时延扩展为 $\tau_{\max, s}$, 小区内用户间的最大相

对时延为 $\tau_{\max,d}$, 则冗余符号数 (信道阶数) 近似为: 上行 $L = \lceil (\tau_{\max,s} + \tau_{\max,d})/T \rceil$ 或下行 $L = \lceil \tau_{\max,s}/T \rceil$. (3) 根据信道阶数上界 L 和总子载波数 N 选择符号块长 K 和用户数 M .

然后, 设计发射机: (1) 根据子载波分配方案 Φ_m 确定外码 F_m ; (2) 选择任意 K 行线性独立内码矩阵 (预编码器) Θ_m ; (3) 发射扩频序列 $u_m(i) = F_m \Theta_m s_m(i)$.

最后, 选择均衡器 Γ_m , 并利用解扩矩阵 $G_m = \Gamma_m \Phi_m^T F$ 对接收符号解扩. 根据定义的系统参数得到系统带宽效率为 $\varepsilon = MK/(N+L) = MK/(MJ+L) = MK/(M(K+L)+L)$. 在系统欠载时, 可以选择较大的 J , 使每个用户被分配的子载波数大于 $K+L$, 这样可以进一步增加 K 提高用户速率并获得 BER 性能增益.

3.2 预编码器设计

GMC CDMA 为进行冗余扩频并恢复符号, 需设计任意 $J-L=K$ 行都线性独立的预编码 Θ_m . 当接收机端已知信道状态信息 (CSI), 可以选择无信道零点的 $J=K$ 个载波. 当未知 CSI 时, 选择 $J > K+L$. 已提出的预编码器有^[6,7]: (1) Vandermonde(Va) 预编码: Θ_m 为 $J \times K$ Vandermonde 阵, 其元素 $[\Theta_m]_{j,k} = \rho_{m,j}^{-k}$, 对不同的 j , 复常数 $\rho_{m,j}$ 不同, 保证了 Θ_m 满秩. 当选择其为单位圆上的等间隔点时, Θ_m 为一截短的 FFT 阵. (2) Walsh Hadamard(WH) 预编码: Θ_m 为一截短的 $J \times K$ Walsh Hadamard 阵. (3) 伪随机 (PN) 预编码: Θ_m 为等概率元素 ± 1 的 $J \times K$ 随机阵. 研究表明^[6], 在一定的信噪比条件下, Va 预编码在系统不同负载时的 BER 性能均相同; 系统满载时, 它优于 WH 和 PN 预编码, 系统欠载时, WH 预编码性能较优.

3.3 多速率设计

GMC CDMA 通过为不同用户分配不同子载波数, 从而具有为不同用户提供可变速率传输以支持多媒体业务的能力. 只要保证分配给用户 m 的子载波数 J_m 大于 L , 通过在 J_m 个子载波上传输 J_m-L 个符号就可保证符号恢复, 且分配给用户的子载波数满足 $\sum_{m=0}^{M-1} J_m = N$, $\forall m \in [0, M-1]$. 设各个用户速率分别为 R_0, \dots, R_{M-1} , 则系统总速率 $R_T = \sum_{m=0}^{M-1} R_m = \frac{MK}{TP} < \frac{1}{T}$, 其中 $P = \sum_{m=0}^M J_m + L$, 进一步根据 $(J_m - L)/(PT) \geq R_m$, 选取用户子载波数 J_m .

与现有多码和可变扩频因子的多速率 CDMA 机制相比, GMC CDMA 的优越性在于: 速率易于切换, 更好的速率分辨能力和 BER 性能. 且经过 MUI 消除后, 在多速率情况下, 能实现盲信道估计和均衡. 研究表明^[4]: 在时 (不) 变多径信道条件下, GMC CDMA 性能均优于现有的多码和正交可变扩频因子 (OVSF)CDMA 多速率机制 (在 BER=10⁻³ 时, SNR 有 8dB 增益).

4 研究进展

如前所述, GMC CDMA 是新近提出的一种高性能无线传输体制, 对 GMC CDMA 的研究受到广泛重视. 近期的研究重点主要集中在两方面, 一是以 GMC CDMA 体制为基础, 进一步研究如何提高其性能, 如文献 [4] 研究了 GMC CDMA 支持多媒体业务的多速率能力; 文献 [8, 9] 研究了 GMC CDMA 与空时编码的结合. 二是从 GMC CDMA 体制所内涵的重要思想: 分块传输、符号块扩频以及预编码出发, 研究预编码的单 / 多天线 OFDM 系统 (单用户的 GMC CDMA) 性能^[10-15] 及其优化设计^[16-18]; 研究分块传输在超宽带 (UWB) 脉冲无线通信中的应用^[19,20], 以及进一步提出了码片交织分块扩频 CDMA^[21-25], 单载波分块传输体制^[26,27] 等, 下面归纳出一些热点研究问题.

4.1 码片交织分块扩频 CDMA 系统

基于符号块扩频思想, 文献 [21] 提出了码片交织分块扩频 (Chip Interleaved Block Spread, CIBS) CDMA 系统, 如图 2. 它采用了独特的符号块扩频, 即在符号扩频后进行码片交织, 得到冗余码片交织器. 若 $K = 1, L = 0$, 则该交织器转换为一般 DS CDMA 系统的交织器. 与采用扩频码片对每个符号扩频的 DS CDMA 相比, CIBS CDMA 是采用同一符号块对每个码字扩频. 由于在发射端进行了码片交织和 ZP 操作, 多径传播后保存了不同用户码的正交性, 在接收端可用低复杂度的码匹配滤波器分离各个用户信息.

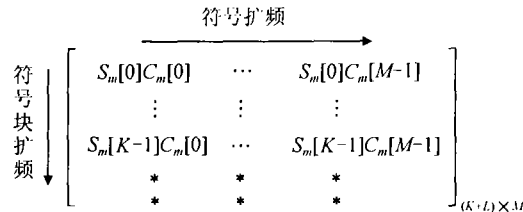


图 2 码片交织器 (*: 保护时隙)

与其他两类符号块扩频 CDMA: GMC CDMA 和偏移正交 CDMA^[28] 相比, 在带宽效率方面: $\varepsilon_{\text{CIBS}} \approx \varepsilon_{\text{GMC}} \geq 50\%$; 在接收机前端, CIBS CDMA 系统实现多用户分离的复杂度最低. 采用相同的接收机 (MMSE, ZF) 时, CIBS CDMA 的 BER 性能均优于 DS CDMA 和 MC CDMA. 在多小区蜂窝系统下行链路中, 文献 [21] 从系统负载、复杂度、灵活性等方面对 CIBS CDMA, DS-CDMA 进行了比较, 得到以下结论: 存在小干扰的相同激活用户数系统中, CIBS CDMA 的 BER 性能优于 DS CDMA; 采用单根接收天线时, DS CDMA 的 BER 性能存在较高的误差背景, 而 CIBS CDMA 无此现象; 均衡时, CIBS CDMA 比 DS CDMA 更灵活, 可采用低复杂度的均衡器.

4.2 线性预编码

GMC CDMA 采用预编码器 Θ_m 把发送符号映射到子载波上, 使每个子载波传输发送符号的线性组合, 故称为线性预编码 (Linear Precoding, LP)^[11]. 模拟结果表明, 线性预编码 GMC CDMA 的 BER 性能优于信道编码的 GMC CDMA^[6] 和 COFDM^[11], 这是因为预编码直接抗频率选择性衰落, 而信道编码仅对信道零点处的用户信息有纠错作用. 文献 [11] 还证明在 L 阶 FIR 信道中, LP OFDM 可获得的最大分集增益为 $L + 1$. 若选择线性预编码器 Θ_m 为截短的 FFT 阵或用于星座旋转的酉阵时, 各向量在复空间张成, 也称为复域编码^[10,13]. 文献 [10] 研究了 Galois 域的信道编码与复域 LP 编码相结合的 OFDM 系统及其译码方法, 文献 [13] 进一步分析了联合 Galois 域纠错编码与复域编码 (信号空间分集) 的 MIMO 无线通信系统性能, 结果表明, 联合编码大大提高了抗信道衰落的能力. Galois 域与复域的联合编码是近期提出的一个研究课题, 在这方面有着丰富的研究内容, 如多天线系统中 Galois 域与复域的联合编码设计与优化等. 另一方面, 对预编码器的设计也值得深入研究, 文献 [17, 18] 应用 “free probability” 理论, 讨论了在接收端采用 MMSE 均衡时, 等距随机预编码系统的预编码器设计问题.

5 结论

GMC CDMA 中通过对信息符号分块和在符号块级扩频, 使多址信道等效于独立的并行单用户信道, 从而抗频率选择性衰落能力更强. 从扩频的角度看, GMC CDMA 是用户码在频域正交, 而 CDMA 是用户码在时域正交; 从多址技术来看, GMC CDMA 为不同用户分配特定的子载波, 类似 OFDMA, 所以, GMC CDMA 继承了 CDMA 的码正交、OFDMA 载波

正交的技术优点, 同时在发送端采用线性预编码(发射冗余), 突破了 MC CDMA, OFDM 等多载波体制上的一些局限性, 提出了以码域、频域正交, 线性预编码为基础的新框架。众所周知, 基于 DS CDMA 的第三代移动通信系统中, 为充分利用功率资源, 采用了功率控制来克服信道衰落和 MUI, 但功耗降低了系统效率, 且它与 CDMA 系统要求的用户间非协同通信原则相违背; 另一方面, 直接序列扩频的带宽资源利用率低。GMC CDMA 通过最小协同发射使得在系统中无需进行功率控制, 且正交子载波频带利用率高, 故它是功率有效和带宽有效的抗 MUI/ISI 的传输机制。在频率资源宝贵和功率受限的无线传输信道中, 更具优势。总之, GMC CDMA 作为一种新的单 / 多用户无线多载波传输体制, 在数字音、视频广播, 无线局域网, 以及未来的宽带蜂窝系统中具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Shinsuke Hara, Ramjee Prasad. Overview of multicarrier CDMA. *IEEE Communications Magazine*, 1997, 35(12): 126-133.
- [2] Wang Z, Giannakis G B. Wireless multicarrier communications: Where Fourier meets Shannon. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2000, 17(3): 29-48.
- [3] Giannakis G B, Wang Z, Scaglione A, Barbarossa S. AMOUR—Generalized multicarrier transceivers for blind CDMA regardless of multipath. *IEEE Trans. on Communications*, 2000, COM-48(12): 2064-2076.
- [4] Wang Z, Giannakis G B. Block-precoding for MUI/ISI-resilient generalized multicarrier CDMA with multirate capabilities. *IEEE Trans. on Communications*, 2001, COM-49(11): 2016-2027.
- [5] Muquet B, Wang Z, Giannakis G B, de Courville M, Duhamel P. Cyclic prefix or zero-padding for multicarrier transmissions? *IEEE Trans. on Communications*, 2002, COM-50(12): 2136-2148.
- [6] Giannakis G B, Stamoulis A, Wang Z, Anghel P. Load-adaptive MUI/ISI-resilient generalized multi-carrier with DF receivers and blind estimation capabilities. *European Telecommunications Transactions*, 2000, 11(6): 527-537.
- [7] Giannakis G B, Anghel P A, Wang Z. Wideband generalized multi-carrier CDMA over frequency-selective wireless channels. *IEEE ICASSP, Istanbul, Turkey*, 2000: 2501-2504.
- [8] Stamoulis A, Liu Z, Giannakis G B. Space-time coded OFDMA with linear precoding for multirate services. *IEEE Trans. on SP.*, 2002, SP-50(1): 119-129.
- [9] Liu Z, Giannakis G B, Barbarossa S, Scaglione A. Transmit-antennae space-time block coding for generalized OFDM in the presence of unknown multipath. *IEEE J. on SAC.*, 2001, 19(7): 1352-1364.
- [10] Wang Z, Bapat N, Zhou S, Giannakis G B. Joint coding-precoding with low-complexity Turbo-decoding. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, December, 2003(to appear).
- [11] Wang Z, Giannakis G B. Linearly precoded or coded OFDM against wireless channel fades? *IEEE SPAWC, Taoyuan, Taiwan*, 2001(3): 267-270.
- [12] Wang Z. Linear precoding for wireless communications. [Ph.D thesis], Dept. of ECE, Univ. of Minnesota, May 2002.
- [13] Wang R, Wang Z, Giannakis G B. Combining Galois with complex field coding for space-time communications. *European Telecommunications Transactions*, 2003, 14(1): 25-36.
- [14] Manton J H, Hua Y. Robust frequency domain precoders. *IEEE Communications Letters*, 2001, 5(2): 40-42.
- [15] Xin Y, Giannakis G B. High-rate space-time layered OFDM. *IEEE Communications Letters*, 2002, 6(5): 187-189.
- [16] Scaglione A, Stoica P, Barbarossa S, Giannakis G B, Sampath H. Optimal designs for space-time linear precoders and equalizers. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2002, SP-50(5): 1051-1064.
- [17] Debbah M, Hachem W, Loubaton Ph, de Courville M. Asymptotic performance analysis for redundant block precoded OFDM systems. *IEEE 11th Statistical Signal Processing Workshop*, Singapore, 2001: 389-392.

- [18] Debbah M, Hachem W, Loubaton Ph, de Courville M. MMSE analysis of certain large isometric random precoded systems. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2003, 49(5): 1293-1311.
- [19] Yang L, Giannakis G B. Impulse radio with resilience to multi-access and multipath interference. *IEEE Ultra Wideband Systems and Technologies*, Baltimore, USA, 2002: 277-282.
- [20] Yang L, Giannakis G B. Block-spreading codes for impulse radio multiple access through ISI channels. *IEEE ICC*, New York City, USA, 2002, vol.2: 807-811.
- [21] Zhou S. Multiple access over time and frequency selective channel. [Ph.D thesis], University of Minnesota, twin cities, MN, May 2002.
- [22] Zhou S, Giannakis G B, Le Martret C. Chip-interleaved block-spread code division multiple access. *IEEE Trans. on Communications*, 2002, COM-50(2): 235-248.
- [23] Zhou S, Xia P, Leus G, Giannakis G B. Chip-interleaved block-spread CDMA versus DS-SS-CDMA for cellular downlink: A comparative study. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2003, (to appear).
- [24] Leus G, Zhou S, Giannakis G B. Orthogonal multiple access over time- and frequency-selective channels. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2003, 51(8): 1442-1450.
- [25] Xia P, Zhou S, Giannakis G B. Bandwidth- and power efficient multi-carrier multiple access. *IEEE WCNC*, New Orleans, USA, 2003, vol.1: 207-211.
- [26] Zhou S, Giannakis G B. Single-carrier space-time block coded transmissions over frequency-selective fading channels. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2003, IT-49(1): 164-179.
- [27] Wang Z, Ma X, Giannakis G B. Optimality of single-carrier zero-padded block transmissions. *IEEE WCNC*, Orlando, USA, 2002: 660-664.
- [28] Leus G, Moonen M. Block spreading based CDMA. *Proc. of the International Symposium on Mobile Multimedia Systems & Applications*, Delft, The Netherlands, November 9-10, 2000: 93-100.

黎海涛: 男, 1972 年生, 博士, 从事多天线、OFDM、UWB 通信方面的研究工作, 已发表论文 30 余篇。

陆建华: 男, 1963 年生, 博士, 教授, 从事无线多媒体通信研究, 在 *IEEE Trans.* 系列等学术刊物和国际会议发表论文 60 余篇。