

多载波 CDMA 容量的研究

王 鹏 赵 宇 曹达仲
(天津大学电子信息工程学院 天津 300072)

摘 要: 该文对多载波 CDMA 容量规划进行了详细的理论和数学分析, 推导出多载波 CDMA 上下行链路的容量的表达式, 利用拉格朗日乘数求极值的方法, 分别得到多载波 CDMA 语音和数据业务上下行链路最大容量; 同时得出一个非常重要的结论: 只有当基站最大发射功率平均分配给每个子载波时, 多载波 CDMA 系统才能获得最大的容量。该文还对影响容量的因素进行了仿真, 各业务的容量随平均路径损耗的增加急剧下降。由此揭示了容量和覆盖的内在关系: 容量和覆盖是相互制约的一对矛盾, 容量的增加就意味着覆盖的减小, 反之亦然。无论上下行链路, 当功率达到一定程度时, 再通过增大功率来提高容量并不是行之有效的方法。最后, 通过对 GSM, WCDMA, 多载波 CDMA 3 个系统容量的比较, 得出多载波 CDMA 下行链路频谱效率为 WCDMA 频谱效率的 1.7 倍, GSM 的 2.7 倍; 上行链路频谱效率为 WCDMA 频谱效率的 2.1 倍, GSM 的 2.4 倍的结论。

关键词: 多载波码分多址; 容量; 拉格朗日乘数; 平均路径损耗

中图分类号: TN914.5, TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0169-05

Research on Capacity of Multicarrier CDMA

Wang Peng Zhao Yu Cao Da-zhong

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Theoretical and mathematical analyses of multicarrier CDMA capacity planning are proposed and the expressions of capacity for multicarrier CDMA are derived both in uplink and downlink. Through extremum of a multivariate function (by Lagrange multipliers), the maximum capacity of multicarrier CDMA is achieved from the viewpoint of voice and data, respectively. Simultaneously, the important conclusions are got for multicarrier CDMA: when BS maximum transmit power is average distributed for all subcarriers, the maximum of capacity is achieved. Simulation results show that capacity of all kinds of service will decrease rapidly as average path loss increase. The essence is opened out between capacity and coverage: capacity and coverage restrict each other, decreasing in capacity means extend in coverage, and vice versa. When transmit power is in higher level, increasing power is not an effective way to improve capacity. From comparison between GSM, WCDMA and multicarrier CDMA, the conclusion are achieved that the spectrum efficiency of multicarrier CDMA is 1.7 times that of WCDMA, and 2.7 times that of GSM in downlink; and 2.1 time that of WCDMA, and 2.4 times that of GSM in uplink.

Key words: Multicarrier CDMA; Capacity; Lagrange multipliers; Average path loss

1 引言

第三代移动通信系统主要是以 CDMA 为核心技术, 下一代的移动通信系统则以多载波正交频分复用 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 技术最受瞩目。OFDM 技术把原始数据流分解为若干个子数据流, 再把这些子数据流分别调制到若干个相互正交的子载波上。每个子信道中数据传输速率相对较低, 只要保证信道时延扩展小于码元周期, 就不会造成码间干扰; 只要子信道的带宽小于相关带宽, 则每一个子信道的频谱特性都近似平坦, 可以有效对抗频率选择性衰落。同时, CDMA 已经是一项非常成熟的无线传输多址接入技术。CDMA 技术和 OFDM 技术各有利弊, 二者的结合能取长补短, 达到更好的系统性能。自 1993

年起陆续提出将传统的 CDMA 技术和 OFDM 技术结合的各种方式, 即多载波 CDMA 系统。

多载波 CDMA 方案可分为两类: 频域扩频和时域扩频。频域扩频通常称为 MC-CDMA; 时域扩频有两种不同的构成方法: MultiCarrier DS-CDMA (MC-DS-CDMA) 和 Multitone CDMA (MT-CDMA)^[1]。MC-CDMA 最早是由美国的 Linnartz, Yee, Fettweis 和德国的 Fazel, Papke 各自独立提出的。MC-CDMA 系统采用频域扩频的方式。其基本过程是: 每个信息符号由一个特定的扩频码进行扩频, 然后将扩频以后的每个符号调制到各个子载波上, 因此, 如果扩频码的长度等于子载波个数, 那么对应这些子载波传输的是相同的信息数据。

MC-DS-CDMA 是由多伦多大学的 Dasilva 和 Sousel 提出的。MS-DS-CDMA 方案采用时域扩频的方式, 其基本过

程是：首先对要调制的信息符号进行串并变换，然后将并行的每路数据用相同的扩频序列进行扩频，再通过 OFDM 把扩频数据流调制到不同的子载波上进行发送。

MT-CDMA 是由比利时的 Vandendorpe 提出的。MT-CDMA 也是利用给定扩频序列在时域内扩展经串并转换后的数据流。在这种方案中，每个子载波的频谱不再满足正交状态，系统抗干扰性能大大下降，极大地降低了系统性能。因此，本文所提到的多载波 CDMA 是指各载波正交的 MC-CDMA 和 MC-DS-CDMA 两个系统。

2 多载波 CDMA 容量规划

由于 CDMA 网络不再把信道和用户分开考虑，也就没有了传统的 GSM 网络覆盖和容量之间的区别。一个小区的业务量越大，小区面积就越小。因为在 CDMA 网络中，业务量增多就意味着干扰的增大。这种小区面积动态变化的效应称为“小区呼吸”。多载波 CDMA 是一个 CDMA 系统，故其容量规划有类似于传统 CDMA 系统的地方，但它又是一个多载波系统，不同于普通 CDMA 系统单载波发射功率固定。多载波 CDMA 每个子载波发射功率可变，而所有子载波发射功率之和应固定。多载波 CDMA 各个子载波相互重叠且正交，极大地提高了频谱效率，节省了宝贵的频率资源。多个正交的载波使得多载波 CDMA 系统容量规划远比传统单载波 CDMA 网络 (IS-95, CDMA20001x-EVDO, WCDMA 等) 复杂。无论采用频域扩频的 MC-CDMA 还是采用时域扩频的 MC-DS-CDMA，其容量的规划都不依赖于扩频因子的选择，因此本文的容量分析对 MC-CDMA 和 MC-DS-CDMA 同样适用。

3 容量的理论分析

3.1 下行链路容量的理论分析

我们首先定义 E_b/N_o ，它代表单位比特能量与噪声功率谱密度之比。 E_b 即每个用户的比特能量，等于信号能量 S 与每比特持续时间 T_b 的乘积； N_o 是噪声功率谱密度，等于噪声功率 N 与带宽 W 之比；又因为每比特持续时间与比特率 R_b 互为倒数，用公式可以表示为^[2]

$$(E_b/N_o) = \frac{ST_b}{N/W} = \frac{S/R_b}{N/W} = \frac{S}{N} \frac{W}{R_b} \quad (1)$$

设多载波 CDMA 系统支持 $i(i=1 \dots M)$ 种业务，第 $k(k=1 \dots p)$ 个子载波上第 i 种业务的用户为 j 个 ($j=1, \dots, N_i^k$)，则下行链路第 k 个子载波上第 i 种业务第 j 个用户接收端的 E_b/N_o 可表示为

$$\begin{aligned} (E_b/N_o)_{ij}^k &= \text{第 } k \text{ 个子载波上第 } i \text{ 种业务第 } j \text{ 个用户的处理增益} \\ &\quad \cdot \frac{\text{第 } k \text{ 个子载波上第 } i \text{ 种业务第 } j \text{ 个用户接收信号功率}}{\text{第 } k \text{ 个子载波带宽范围内总接收功率}} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)也可以写作：

$$(E_b/N_o)_{ij}^k = \frac{W_{\text{sub}}}{v_{ij}^k R_{ij}^k} \frac{P_{ij}^k/L_{ij}^k}{I_{\text{total}}^k} \quad (3)$$

公式(3)中， W_{sub} 是每个子载波的带宽， R_{ij}^k 是第 k 个子载波上第 i 种业务第 j 个用户的比特率， v_{ij}^k 是第 k 个子载波第 i 种业务第 j 个用户的激活因子， P_{ij}^k 是基站在第 k 个子载波上对第 i 种业务第 j 个用户的发射功率， L_{ij}^k 代表基站与用户间的链路损耗， I_{total}^k 是移动台处第 k 个子载波包括热噪声功率在内的 W_{sub} 带宽总接收功率。 I_{total}^k 可以看作为本小区干扰功率、其它小区干扰功率及热噪声功率之和。因此，式(3)可以写作：

$$(E_b/N_o)_{ij}^k = \frac{W_{\text{sub}}}{v_{ij}^k R_{ij}^k} \frac{P_{ij}^k/L_{ij}^k}{(1 + I_{ij}^k) P_{\text{total}}^k/L_{ij}^k + N_{rf} W_{\text{sub}}} \quad (4)$$

P_{total}^k 代表基站在第 k 个子载波上的发射功率， I_{ij}^k 代表第 k 个子载波第 i 种业务第 j 个用户接收的其它小区干扰功率与本小区基站功率之比， N_{rf} 代表噪声功率谱密度。

多载波 CDMA 下行链路为区分用户采用正交码子，同一小区的正交码子来自同一个扰码，没有多径传播时移动台接收的基站信号保持正交性。然而，无线信道中时延扩展导致的多径传播，将会使移动台接收的部分基站信号视作多址干扰。正交系数 1 表示完全正交，多径信道中正交系数的典型值在 0.4 到 0.9 之间。设 α_{ij}^k 代表下行链路第 k 个子载波第 i 种业务用户 j 的正交系数，则式(4)可重新写为

$$(E_b/N_o)_{ij}^k = \frac{W_{\text{sub}}}{v_{ij}^k R_{ij}^k} \frac{P_{ij}^k/L_{ij}^k}{(1 - \alpha_{ij}^k + I_{ij}^k) P_{\text{total}}^k/L_{ij}^k + N_{rf} W_{\text{sub}}} \quad (5)$$

解得 P_{ij}^k 如下：

$$P_{ij}^k = \frac{(E_b/N_o)_{ij}^k v_{ij}^k}{W_{\text{sub}}/R_{ij}^k} \left[(1 - \alpha_{ij}^k + I_{ij}^k) P_{\text{total}}^k + N_{rf} W_{\text{sub}} L_{ij}^k \right] \quad (6)$$

基站在第 k 个子载波上的发射功率可以表示为

$$P_{\text{total}}^k = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} P_{ij}^k = \frac{N_{rf} W_{\text{sub}} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} (E_b/N_o)_{ij}^k v_{ij}^k L_{ij}^k}{1 - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} \frac{(E_b/N_o)_{ij}^k v_{ij}^k}{W_{\text{sub}}/R_{ij}^k} (1 - \alpha_{ij}^k + I_{ij}^k)} \quad (7)$$

假设 $L_{ij}^k = \bar{L}$ ， $\alpha_{ij}^k = \bar{\alpha}$ ， $I_{ij}^k = \bar{I}$ ； \bar{L} ， $\bar{\alpha}$ ， \bar{I} 分别代表平均路径损耗、小区内平均正交系数、用户接收的其它小区干扰功率与本小区基站功率的平均比值，则式(7)可以写作：

$$P_{\text{total}}^k = \frac{N_{rf} \bar{L} W_{\text{sub}} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} \frac{(E_b/N_o)_{ij}^k v_{ij}^k}{W_{\text{sub}}/R_{ij}^k}}{1 - (1 - \bar{\alpha} + \bar{I}) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} \frac{(E_b/N_o)_{ij}^k v_{ij}^k}{W_{\text{sub}}/R_{ij}^k}} \quad (8)$$

由式(8)可得

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} (E_b/N_o)_{ij}^k v_{ij}^k R_{ij}^k = \frac{P_{\text{total}}^k W_{\text{sub}}}{N_{rf} \bar{L} W_{\text{sub}} + P_{\text{total}}^k (1 - \bar{\alpha} + \bar{I})} \quad (9)$$

设基站总的发射功率为 P_{total} , 则 $P_{total} = \sum_{k=1}^p P_{total}^k$ 。设 P_{BS}^{max} 为基站最大的发射功率, 则 $P_{total} < P_{BS}^{max}$ 。当 $P_{total} = P_{BS}^{max}$ 时, 系统达到极限发射功率, 此时系统达到最大容量 R_{DL}^{max} , R_{DL}^{max} 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \text{O.F. } R_{DL}^{max} &= \max \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} R_{ij}^k \\ \text{S.T. } \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} (E_b/N_o)_i v_{ij}^k R_{ij}^k &= \frac{P_{total}^k W_{sub}}{N_{rf} \bar{L} W_{sub} + P_{total}^k (1 - \bar{\alpha} + \bar{I})}, \\ &k = 1, 2, \dots, p \\ \sum_{k=1}^p P_{total}^k &= P_{total} \leq P_{BS}^{max} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由于所需 E_b/N_o 和激活因子 v 只与业务种类有关, 故式 (10) 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \text{O.F. } R_{DL}^{max} &= \max \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} R_{ij}^k \\ \text{S.T. } (E_b/N_o)_i v_i \sum_{j=1}^{N_i^k} R_{ij}^k &= \frac{P_{total}^k W_{sub}}{N_{rf} \bar{L} W_{sub} + P_{total}^k (1 - \bar{\alpha} + \bar{I})}, \\ &k = 1, 2, \dots, p \\ \sum_{k=1}^p P_{total}^k &= P_{total} \leq P_{BS}^{max} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

不妨设 $\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} R_{ij}^k = x_k$, 利用拉格朗日乘数求极值的方法, 则下行链路最大容量可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \text{O.F. } R_{DL}^{max} &= f(x_1, \dots, x_p) = \sum_{k=1}^p x_k \\ \text{S.T. } \varphi(x_1, \dots, x_p) &= \sum_{k=1}^p \frac{(E_b/N_o)_i v_i N_{rf} \bar{L} W_{sub} x_k}{W_{sub} - (E_b/N_o)_i v_i (1 - \bar{\alpha} + \bar{I}) x_k} - P_{total} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

可以构成辅助函数:

$$F(x_1, \dots, x_{768}) = f(x_1, \dots, x_p) + \lambda \varphi(x_1, \dots, x_p) \quad (13)$$

分别求 x_1, \dots, x_p 的一阶偏导数, 并使之为零, 然后与方程 $\varphi(x_1, \dots, x_p) = 0$ 联立起来

$$\left. \begin{aligned} 1 + \frac{\lambda (E_b/N_o)_i v_i N_{rf} \bar{L} W_{sub}^2}{[W_{sub} - (E_b/N_o)_i v_i (1 - \bar{\alpha} + \bar{I}) x_1]^2} &= 0 \\ 1 + \frac{\lambda (E_b/N_o)_i v_i N_{rf} \bar{L} W_{sub}^2}{[W_{sub} - (E_b/N_o)_i v_i (1 - \bar{\alpha} + \bar{I}) x_2]^2} &= 0 \\ &\vdots \\ 1 + \frac{\lambda (E_b/N_o)_i v_i N_{rf} \bar{L} W_{sub}^2}{[W_{sub} - (E_b/N_o)_i v_i (1 - \bar{\alpha} + \bar{I}) x_p]^2} &= 0 \\ \sum_{k=1}^p \frac{(E_b/N_o)_i v_i N_{rf} \bar{L} W_{sub} x_k}{W_{sub} - (E_b/N_o)_i v_i (1 - \bar{\alpha} + \bar{I}) x_k} - P_{total} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由式(14)可以看出, $x_1 = x_2 = \dots = x_p$, 即当每个子载波

传输速率 $\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} R_{ij}^k$ 相同时, 下行链路可以达到最大容量。把此结果代入式(11), 便得

$$\left. \begin{aligned} R_{DL}^{max} &= p \cdot x_1 (x_1 = x_2 = \dots = x_p) \\ (E_b/N_o)_i v_i x_1 &= \frac{P_{total}^1 W_{sub}}{N_{rf} \bar{L} W_{sub} + P_{total}^1 (1 - \bar{\alpha} + \bar{I})} \\ (E_b/N_o)_i v_i x_2 &= \frac{P_{total}^2 W_{sub}}{N_{rf} \bar{L} W_{sub} + P_{total}^2 (1 - \bar{\alpha} + \bar{I})} \\ &\vdots \\ (E_b/N_o)_i v_i x_p &= \frac{P_{total}^p W_{sub}}{N_{rf} \bar{L} W_{sub} + P_{total}^p (1 - \bar{\alpha} + \bar{I})} \\ \sum_{k=1}^p P_{total}^k &= P_{total} = P_{BS}^{max} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由于 $x_1 = x_2 = \dots = x_p$, 所以 $P_{total}^1 = P_{total}^2 = \dots = P_{total}^p = (1/p)P_{BS}^{max}$ 。我们可以这样理解, 当每个子载波发射功率 P_{total}^k 都相同时(为系统最大发射功率的平均值), 下行链路达到最大容量。由此得出一个非常重要的结论: 对于多载波 CDMA 系统, 只有当各个子载波发射功率相同且为基站最大发射功率的平均值时(即基站最大发射功率平均分配给每个子载波), 才能获得最大的容量。

3.2 上行链路容量的理论分析

设 P_{MS}^{max} 为移动台最大的发射功率, P_{ij}^k 代表第 i 种业务第 j 个用户在第 k 个子载波上发射功率, 对任意第 i 种业务第 j 个用户, 则

$$\sum_{k=1}^p P_{ij}^k \leq P_{MS}^{max}, \quad i, j \text{ 固定} \quad (16)$$

上行链路的容量的推导过程完全类似于下行链路, 但上行链路各用户的扩频码来自每个用户特有的扰码, 不存在正交系数 α 的影响。因此根据式(10), 上行最大容量可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \text{O.F. } R_{UL}^{max} &= \max \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} R_{ij}^k \\ \text{S.T. } \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} (E_b/N_o)_i v_{ij}^k R_{ij}^k &= \frac{P_{total}^k W_{sub}}{N_{rf} \bar{L} W_{sub} + P_{total}^k (1 + \bar{I})}, \\ &k = 1, 2, \dots, p \\ P_{total}^k &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} P_{ij}^k, \quad k = 1, 2, \dots, p \\ \sum_{k=1}^p P_{total}^k &\leq P_{MS}^{max}, \quad i, j \text{ 固定} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

上行链路 P_{total}^k 代表第 k 个子载波上所有移动台的发射功率和。 $(E_b/N_o)_i v_{ij}^k$ 表示基站接收第 k 个子载波第 i 种业务第 j 个用户所需 E_b/N_o , \bar{I} 表示基站接收机处, 接收的其它小区与本小区干扰的平均比值。 W_{sub} 表示上行链路每个子载波的带宽。其它参数涵义与下行链路一致。

同样可以利用拉格朗日乘数求极值的方法求出上行链路的最大容量, 但同时还应考虑上行链路移动台发射功率的

限制,具体方法与下行链路完全类似,鉴于篇幅原因,这里不再作详细推导。

4 仿真参数设置及数值仿真

本文在仿真参数的选择上,基本是参考3GPP WCDMA容量和覆盖的参数设置。各业务 $(E_b/N_o)_i$, v_i 以及 N_{rf} , $\bar{\alpha}$, \bar{I} 均可参考文献[3]。WCDMA基站最大发射功率一般认为是43dBm(20W),15%功率用于公共信道(导频信道和其它控制信道)^[4],故用于业务信道的功率 P_{BS}^{max} 为 $20\text{ W} \times 85\% = 17\text{ W}$ 。WCDMA占用带宽5MHz,因此,本文设多载波CDMA所有子载波带宽之和为5MHz。参考文献[5]对WCDMA移动台最大发射功率的规定,本文设12.2kbps语音业务对应移动台最大发射功率21dBm,144kbps数据业务对应移动台最大发射功率24dBm。

多载波CDMA子载波带宽的选择一定要适合于实际情况。在实际的移动通信系统中,时延扩展一般不会超过 $2\mu\text{s}$,那么保护间隔的有效取值应该为 $8\mu\text{s}$ ^[6]。符号周期长度为保护间隔的6倍,即 $6 \times 8\mu\text{s} = 48\mu\text{s}$ 。这样可以使保护间隔所造成的信噪比损失小于1dB^[6]。子载波间隔取 $48 - 8 = 40\mu\text{s}$ 的倒数,即25kHz。所以,子载波带宽 $W_{sub} = 50\text{kHz}$ 。子载波个数为 $5\text{MHz} / 25\text{kHz} - 1 = 199$ (两端的子载波只有一半与其它子载波重叠)。

12.2kbps语音业务和144kbps数据业务是WCDMA最基本的两种业务^[7],本文也采用这两种业务进行仿真。上下行链路各项参数总结见表1。

图1为平均路径损耗与容量关系曲线图。从图1可以看出,无论上下行链路,当平均路径损耗小于135dB时,系统容量基本不受平均路径损耗变化的影响;而当平均路径损耗大于135dB,各业务的容量急剧下降。因此,若要得到较高的系统容量,就要尽量减小小区半径,以降低平均路径损耗;相反,若要扩大覆盖,则增加了平均路径损耗,必须以牺牲容量为代价。上下行链路中,数据业务所需 E_b/N_o 小于语音业务,相应容量也大于语音业务。上行链路中,平均路径损耗较小时,各业务容量基本不变。而当平均路径损耗较大时,各业务容量下降的要比下行链路还要快。这是由于移动台发

射功率有限,超出移动台极限距离时,移动台将无法完成通信。

容量和覆盖是相互制约的一对矛盾。容量的增加,意味着干扰的增大,对应噪声恶化量增大,小区允许的最大路径损耗减小,覆盖半径减小;覆盖的增加,导致平均路径损耗增大,降低了系统容量。

为了清楚地表现功率与容量的关系,需要固定平均路径损耗。图2在平均路径损耗144dB情况下,功率与容量关系曲线图。下行链路功率指基站发射功率(不包括控制信道开销),上行链路功率指所有移动台发射功率之和。从图2中可以看出,上下行链路中,无论数据业务容量还是语音业务容量都随基站发射功率的增加而增大,但增大的趋势是变缓的。下行链路基站发射功率从45W增加到55W,语音业务容量增加123kbps,数据业务容量增加179kbps,即基站发射功率增加22.2%,语音业务容量只增加8.4%,数据业务容量只增加8.3%,容量的提高并不明显。上行链路亦呈现此种趋势。功率的增加,无疑增大了对其它用户和其它小区的干扰,系统性能也随之下降。由此可见,无论上下行链路,当功率达到一定程度时,再通过增加功率来提高容量并不是行之有效的办法。

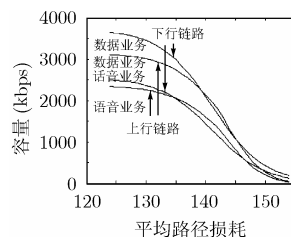


图1 平均路径损耗与容量关系

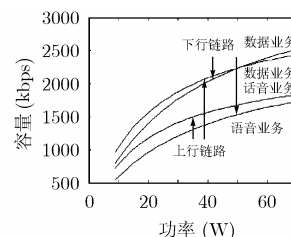


图2 功率与容量关系

5 GSM, WCDMA, 多载波CDMA容量比较

GSM, WCDMA, 多载波CDMA占用的带宽各不相同,无法比较容量的大小,但是系统的容量可以用频谱效率进行比较。下面先引入负载的概念。

由式(3)可得

$$P_{ij}^k / L_{ij}^k = \frac{(E_b/N_o)_i^k v_{ij}^k}{W_{sub}/R_{ij}^k} I_{total}^k \quad (18)$$

表1 上下行链路各项参数总结

	参数	$(E_b/N_o)_i$	带宽	W_{sub}	子载波数	v_i	N_{rf}	$\bar{\alpha}$	\bar{I}	最大发射功率	符号周期		
下行链路	语音业务 12.2kbps	7.9 dB	5MHz	50kHz	199	0.67	-169dBm/Hz	0.6	0.55	基站 17W	48 μs (40 μs + GI 8 μs)		
	数据业务 144kbps	4.5dB				1							
上行链路	语音业务 12.2kbps	6.1 dB	5MHz	50kHz		0.67				1		1	移动台 21dBm (125mW)
	数据业务 144kbps	3.1dB				1							移动台 24dBm (250mW)

我们定义 $P_{ij}^k / I_{ij}^k = \text{Load}_{ij}^k$, 则下行链路第 k 个子载波第 i 种业务第 j 个用户的负载因子:

$$\text{Load}_{ij}^k = \frac{(E_b/N_o)_{ij}^k v_{ij}^k}{W_{\text{sub}}/R_{ij}^k} \quad (19)$$

考虑到本小区码子正交性和其它小区干扰的影响, 下行链路第 k 个子载波负载为

$$\begin{aligned} \eta_{\text{DL}}^k &= (1 - \bar{\alpha} + \bar{I}) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} \text{Load}_{ij}^k \\ &= \frac{(1 - \bar{\alpha} + \bar{I})}{W_{\text{sub}}} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} (E_b/N_o)_{ij}^k v_{ij}^k R_{ij}^k \end{aligned} \quad (20)$$

下行链路平均负载为

$$\eta_{\text{DL}} = \frac{1}{768} \sum_{k=1}^{768} \eta_{\text{DL}}^k = \frac{1}{768} \frac{(1 - \bar{\alpha} + \bar{I})}{W_{\text{sub}}} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i^k} (E_b/N_o)_{ij}^k v_{ij}^k R_{ij}^k \quad (21)$$

上行链路的负载与下行链路一致, 只是没有正交系数的影响。

结合式(21)和式(10), 同样利用拉格朗日乘数求极值的方法, 可以得到: 75%负载条件下, 多载波 CDMA 下行链路话音业务容量和数据业务容量分别为 960.4kbps 和 1400.8kbps; 上行链路容量分别为 890.5kbps 和 1186.0kbps。考虑到数据业务将逐步代替话音业务占据主导地位, 故设数据业务占 80%, 话音业务占 20%。所以, 75%负载条件下, 多载波 CDMA 下行链路容量为 $960.4 \times 20\% + 1400.8 \times 80\% = 1312.7\text{kbps}$, 频谱效率为 $1312.7\text{kbit} / 5\text{MHz} = 0.26\text{bit}/\text{Hz}$; 上行链路容量 $890.5 \times 20\% + 1186.0 \times 80\% = 1126.9\text{kbps}$, 频谱效率为 $1126.9\text{kbit} / 5\text{MHz} = 0.23\text{bit}/\text{Hz}$ 。

GSM 每个载频带宽 200kHz, 8 个时隙, 每个时隙的传输速率为 9.6kbps, 假设 GSM 频率复用系数为 4, 其上下行的频谱效率均为 $9.6\text{kbit} \times 8 / 200\text{kHz} / 4 = 0.096\text{bit}/\text{Hz}$ 。

WCDMA 每个载频带宽 5MHz, 75%负载情况下, 下行链路容量 730kbps, 上行链路容量 550kbps^[7], 下行链路频谱效率为 $730\text{kbit} / 5\text{MHz} = 0.15\text{bit}/\text{Hz}$, 上行链路频谱效率为 $550\text{kbit} / 5\text{MHz} = 0.11\text{bit}/\text{Hz}$ 。

表 2 为 GSM, WCDMA, 多载波 CDMA 频谱效率的比较。与单载波系统 WCDMA 相比, 多载波 CDMA 重叠的频谱大大提高了频率利用率。下行链路频谱效率为 WCDMA 频谱效率的 1.7(0.26/0.15)倍, GSM 的 2.7(0.26/0.096)倍; 上行链路频谱效率为 WCDMA 频谱效率的 2.1(0.23/0.11)倍, GSM 的 2.4(0.23/0.096)倍。

表 2 GSM, WCDMA, 多载波 CDMA 频谱效率比较(bit/Hz)

	GSM	WCDMA	多载波 CDMA
下行链路	0.096	0.15	0.26
上行链路	0.096	0.11	0.23

6 结束语

本文推导出多载波 CDMA 上下行链路的容量的表达式, 利用拉格朗日乘数求极值的方法, 分别得到多载波 CDMA 话音和数据业务上下行链路最大容量; 同时得出一个非常重要的结论: 对于多载波 CDMA 系统, 只有当各个子载波发射功率相同且为基站最大发射功率的平均值时(即基站最大发射功率平均分配给每个子载波), 才能获得最大的容量。仿真结果表明, 各业务的容量随平均路径损耗的增加急剧下降。因此, 容量和覆盖是相互制约的一对矛盾, 若要得到较高的系统容量, 就要尽量减小小区半径, 以降低平均路径损耗; 相反, 若要扩大覆盖, 则增加了平均路径损耗, 必须以牺牲容量为代价。无论上下行链路, 当功率达到一定程度时, 再通过增大功率来提高容量并不是行之有效的方法。最后, 通过对 GSM, WCDMA, 多载波 CDMA 3 个系统容量的比较, 得出多载波 CDMA 的频谱效率远大于 WCDMA 和 GSM 的结论。

参 考 文 献

- [1] Hara S and Prasad R. Overview of multicarrier CDMA [J]. *IEEE Communication Magazine*, 1997, 35(12): 126-133.
- [2] [美]Bernard Sklar 著, 徐平平, 宋铁成, 叶芝慧等译. 数字通信——基础与应用(第二版). 北京: 电子工业出版社, 2002: 90-91.
- [3] 3GPP, TR25.942, V6.3.0 Radio Frequency (RF) system scenarios (Release 6) (2004-6).
- [4] [芬兰] Harri-Holma and Antti-Toskala 著, 付景兴, 马敏等译. WCDMA 技术与系统设计: 第三代移动通信系统的无线接入, 第二版. 北京: 机械工业出版社, 2004: 137-156.
- [5] 3GPP, TS 25.101, V6.5.0, User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD)(Release 6)(2004-09).
- [6] Van Nee R and Prasad R. OFDM Wireless Multimedia Communications Norwood, MA, USA: Publisher Artech House, Inc. 2000: 15-68.
- [7] [芬兰] Jaana Laiho Achim Wacker 主编, 孙献璞等译. UMTS 无线网络规划与优化. 北京: 电子工业出版社, 2004: 161-200.

王 鹏: 男, 1981 年生, 硕士生, 研究方向为第三代及下一代移动通信系统和关键技术。

赵 宇: 男, 1956 年生, 副教授, 研究方向为通信网理论及应用。

曹达仲: 男, 1941 年生, 教授, 主要研究方向为宽带无线通信技术和后三代移动通信系统。