

文章编号: 1001-2486(2002)03-0049-06

码分多址(CDMA)蜂窝移动通信上、下行链路 带宽非对称划分的分析*

韩方景, 顾健, 陈先福, 张尔扬

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 从移动台和基站接收机输入端载干比以及 T. S. Rappaport 和 L. B. Milstein 提出的信道传输模型出发, 对码分多址(CDMA)蜂窝移动通信系统的上、下行链路带宽划分进行了分析, 提出了非对称划分办法, 同时给出了仿真结果。分析表明: 上、下行链路带宽划分有效地提高了码分多址(CDMA)蜂窝移动通信系统容量。

关键词: 码分多址(CDMA); 带宽划分; 移动通信

中图分类号: TN929.523 文献标识码: A

Analysis of the Asymmetrical Bandwidth Partition between Uplink and Downlink in CDMA Cellular Mobile Communication

HAN Fang-jing, GU Jian, CHEN Xian-fu, ZHANG Er-yang

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Analyse the partition of bandwidth between uplink and downlink in CDMA cellular system on the basis of the inputting C/I of a receiver and the channel model presented by T. S. Rappaport and L. B. Milstein, and gives the method of the asymmetrical partition of bandwidth. The simulation results are also presented, showing that the frequency asymmetrical partition between uplink and downlink enhances the capacity of CDMA cellular system.

Key words: code division multiple access(CDMA); bandwidth partition; mobile communication

无论是 IS-95, 还是采用 CDMA 体制的第三代移动通信系统, 还是采用 CDMA 体制的无线 ATM, 或者是其他的无线扩频通信系统, 系统容量都是评价系统性能的主要技术参数^[2~4]。在传统 CDMA 蜂窝移动通信系统上、下行链路带宽对称相等的情况下^[1], 上、下行链路的同信道干扰并不完全相同(详见本文), 因此, 上、下行链路容量并不均等, 系统容量是上、下行链路容量中的较小值, 上、下行链路容量不平衡造成频率资源的浪费。本文提出了一种提高系统容量的方法, 即上、下行链路带宽非对称划分。分析仿真表明, 系统容量有显著提高, 例如, 在 10MHz 带宽下, 系统容量比上、下行链路等带宽划分在有、无下行功率控制的情况下分别提高约 26.7% 和 42.6%。

1 上、下行链路带宽划分的分析

1.1 信道传输功率损耗模型

移动通信信号传输的环境十分恶劣, 既有快衰落, 又有慢衰落。因此, 在同一位置接收的信号是随时间而起伏, 但其平均值却是一个常数。文献[5]论证了一个平均意义下的信道传输功率模型, 即接收功率

$$P_r = hP_t r^{-n} \quad (1)$$

P_t 为发射功率; h 为常数, 同频率、天线增益等因素有关; r 为收发之间的距离; n 为路径损耗指数, 随 r 的增大而增大, 通常取 2.0~4.0。

* 收稿日期: 2001-12-31

作者简介: 韩方景(1968—), 男, 讲师, 博士生。

又 $\lim_{r \rightarrow 0} P_r = hP_t \lim_{r \rightarrow 0} r^{-n} = \infty$, 即 $P_r > P_t$, 显然与实际不符, 表明式 (1) 的模型已经不适用了。对 CDMA 蜂窝移动通信系统, 可设离基台最近的移动台到基台的距离为 r_0 , 对实际情况来说, r_0 是由基台天线高度、天线特性等因素决定的, 则 $r > r_0$ 时可确保式 (1) 适用于实际情况。

1.2 系统模型

为简化分析, 作如下合理假设: (1) 各蜂房采用正六边形结构, 其面积和用户数相同; (2) 用户均匀分布在每一蜂房中除半径 $r \leq r_0$ 区域内; (3) 为降低干扰, 提高系统容量, 各蜂房采用中心激励且分成三个 120° 扇区, C_i^j 表示第 i 个蜂房的第 j 个扇区, C_1^1 为分析对象; (4) 各蜂房分享同一上、下行频率信道 F_1 和 F_2 , 而且上、下行无干扰; (5) 对于所分析的蜂房, 假设来自于第三层蜂房及其以外的干扰可以忽略。在上述假设前提下, 我们得到如图 1 所示的分析模型。

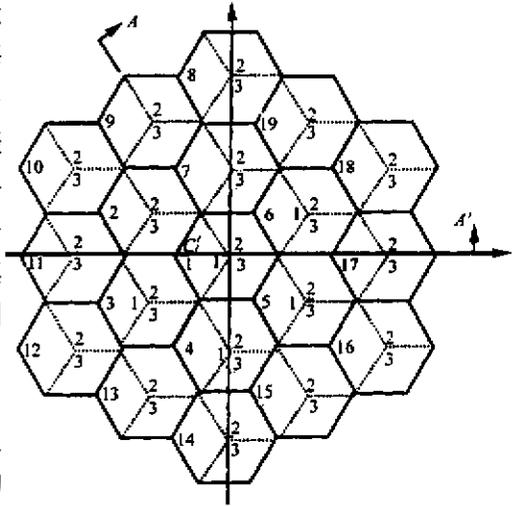


图 1 系统模型
Fig.1 System model

1.3 上行链路的分析

我们以 C_1^1 作为分析的对象, 设每一扇区中有 M 个上行链路。为消除远近效应, 假设上行链路实现了理想的功率控制, 则各移动台发射的到达本扇区基台的功率是相同的, 设为 P_0 , 且 (x_i, y_i) 为第 i 个蜂房 C_i 中的移动台坐标, (s_i, t_i) 为 C_i 中的基台坐标, 则由式 (1), C_1^1 基台接收机正常工作时输入端载干比为

$$\left(\frac{C}{I}\right)_s = C_{IS} = \frac{P_0}{\left(\iint_A P_0 h^{-1} r_{ij}^{-n} h r_{ij}^{-n} \rho dx_i dy_i\right) - P_0} \geq C_{IS_0} \tag{2}$$

其中, C_{IS_0} 为基台正常工作时所需最低的载干比; r_{ij} 为 C_i 中的移动台到 C_j 中的基台的距离, $j = i$ 和 1 , $r_{ij} = [(x_i - s_j)^2 + (y_i - t_j)^2]^{1/2}$; ρ 为上行链路密度, $\rho = M / \left(\frac{\sqrt{3}}{2} R^2 - \frac{1}{3} \pi r_0^2\right)$; R 为蜂房半径; A 为积分区域, 令 $A_{C_6^1}$ 、 $A_{C_7^1}$ 分别代表 C_6^1 、 C_7^1 的面积, 则 $A = A_{C_6^1} + A_{C_7^1} + A_{C_8^1} + A_{C_{18}^1} + A_{C_{19}^1} + A_{C_{17}^1} + \frac{1}{2} A_{C_9^1} + \frac{1}{2} A_{C_{17}^1}$ 是对 C_1^1 扇区中的基台产生上行干扰的区域, 如图 1 所示。

式 (2) 取等号整理,

$$M = K_m (1 + 1/C_{IS_0}) \tag{3}$$

其中,

$$K_m = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} R^2 - \frac{1}{3} \pi r_0^2\right) / \left(\iint_A r_{ij}^{-n} dx_i dy_i\right)$$

1.4 下行链路的分析

考虑 C_1^1 中位于 (x_1, y_1) 处的移动台, 对于下行链路, 采用功率控制可以降低其对别的蜂房的干扰, 进一步提高系统容量, 因此对下行链路的分析分两种情况。

1.4.1 无下行功率控制

设每一扇区基台发射的每一下行链路功率为 P_s 。每一扇区含有 N_n 个下行链路, 则位于 (x_1, y_1) 处的移动台接收机正常工作时输入端载干比为

$$\left(\frac{C}{I}\right)_M = C_{IM} = \frac{hP_s d_{11}^{-n}}{\left(\sum_{i=1}^{19} N_n d_{i1}^{-n} hP_s\right) - hP_s d_{11}^{-n}} \geq C_{IM_0} \tag{4}$$

其中, d_{i1} 为 C_i 中的基台 (s_i, t_i) 到 (x_1, y_1) 处移动的距离, $d_{i1} = [(x_1 - s_i)^2 + (y_1 - t_i)^2]^{1/2}$; C_{IM_0}

为移动台接收机正常工作所需的最低载干比。

式（4）取等号，

$$N_n = K_n (1 + 1/C_{IM_0}) \quad (5)$$

其中，

$$K_n = d_{i1}^{-n} \left(\sum_{i=1}^{19} d_{i1}^{-n} \right)$$

1.4.2 下行链路有功率控制

基站发射的下行信号功率是基站同移动台的距离的函数，设为 $P(d_{ii})$ ，由于各蜂房功率控制方案相同，故当 $d_{ii} = d_{jj}$ ， $i \neq j$ 时，有

$$P(d_{ii}) = P(d_{jj}) \quad (6)$$

又设每一扇区包含有 N_h 个下行链路，则移动台接收机正常工作时输入端载干比

$$\left(\frac{C}{I} \right)_M = C_{IM} = \frac{hP(d_{11}) d_{i1}^{-n}}{\left(\sum_{i=1}^{19} P_i^i h d_{i1}^{-n} \right) - hP(d_{11}) d_{i1}^{-n}} \geq C_{IM_0} \quad (7)$$

其中， P_i^i 是由 C_i^i 基站发射的对 (x_1, y_1) 处的移动台发生干扰的全部功率。

由式（6），有

$$P_i^i = \iint_{A_{C_1^i}} P(d_{11}) \rho dx_1 dy_1 \quad (8)$$

其中，下行链路密度

$$\rho = \frac{N_h}{\frac{\sqrt{3}}{2} R^2 - \frac{1}{3} \pi r_0^2} \quad (9)$$

由式（8）（9）代入式（7），取等号，得

$$N_h = K_h (1 + 1/C_{IM_0}) \quad (10)$$

其中，

$$K_h = \frac{(\sqrt{3}/2 R^2 - 1/3 \pi r_0^2) P(d_{11}) d_{i1}^{-n}}{\left(\sum_{i=1}^{19} d_{i1}^{-n} \right) \iint_{A_{C_1^i}} P(d_{11}) dx_1 dy_1}$$

1.5 上、下行链路带宽划分

统计分析表明，用户在相互通话时，有 $\alpha = 35\%$ 的时间处于讲话状态，而 65% 的时间处于收听状态，用户不讲话减少了对其他用户的干扰，这样系统的实际用户容量将提高到我们分析得出每扇区信道数量的 α 倍，考虑到每蜂房划分为三个扇区，则每蜂房的用户数量为每扇区信道数量的 $3/\alpha$ 倍。

1.5.1 系统容量

若无下行功率控制，则一个蜂房的用户数量为

$$C_{apn} = \frac{3}{\alpha} \min \{ M, \min_{(x_1, y_1) \in C_1^i} [N_n] \} \quad (11)$$

即系统容量由式（3）和（5）决定， $\min [*]$ ：取“*”的最小值。为了确保整个系统内的用户都能正常工作， N_n 取移动台位置 (x_1, y_1) 的最小值， C_{apn} 取上行和下行容量的最小值。为简单起，

$\min_{(x_1, y_1) \in C_1^i} [N_n]$ 记为 $\min [N_n]$ ，下同。

同理，有下行功率控制时，系统容量由式（3）和式（10）给出：

$$C_{apn} = (3/\alpha) \min \{ M, \min [N_h] \} \quad (12)$$

上述系统容量是在上、下行等带宽的情况下推导的，其为上行和下行容量的最小值，也就是说，上行和下行容量中较大的一方相对于较小的一方容量有剩余，这意味着上、下行等带宽对称划分时频

率资源没有充分利用。为进一步提高系统容量,上、下行链路采用带宽非对称划分以提高频率资源利用率,即通过设计上、下行链路接收机不同的最低输入载干比 C_{IS_0} 和 C_{IM_0} ,保持上、下行信道容量相等。则无下行功率控制和有下行功率控制时系统容量分别为

$$C_{apn} = (3/\alpha) M = (3/\alpha) \min [N_n] \quad (13)$$

$$C_{aph} = (3/\alpha) M = (3/\alpha) \min [N_h] \quad (14)$$

由式(13)式(14)可求它们成立的条件分别为

$$C_{IS_0} = 1/\left\{ \frac{\min [K_n]}{K_m} \cdot \left(1 + \frac{1}{C_{IM_0}} \right) - 1 \right\} \quad (15)$$

$$C_{IS_0} = 1/\left\{ \frac{\min [K_h]}{K_m} \cdot \left(1 + \frac{1}{C_{IM_0}} \right) - 1 \right\} \quad (16)$$

式(15)和式(16)分别描述了无、有下行功率控制时,上、下行链路采用带宽非对称划分的系统参数 C_{IS_0} 、 C_{IM_0} 、 R 、 r_0 之间的约束关系。

1.5.2 上、下行链路带宽分配因子

设系统总带宽为 B ,则上行链路带宽

$$B_s = gB \quad (g \text{ 为带宽分配因子}, 0 < g < 1) \quad (17)$$

下行链路带宽

$$B_m = (1 - g) B \quad (18)$$

又基站接收机输入端载干比^[2]:

$$\frac{C}{I} = C_{IS_0} = \left(\frac{E_{OS}}{I_{OS}} \right) / \left(\frac{B_s}{R_{bs}} \right) \quad (19)$$

其中, E_{OS}/I_{OS} 为基站接收机输入端数据每比特能量对干扰的单边功率谱密度之比, B_s 为基站接收扩频信号带宽(同式(17)), R_{bs} 为移动台发向基站的数据速率。

同理,移动台接收机输入端载干比:

$$\frac{C}{I} = C_{IM_0} = \left(\frac{E_{OM}}{I_{OM}} \right) / \left(\frac{B_m}{R_{bm}} \right) \quad (20)$$

其中, E_{OM}/I_{OM} 为移动台接收机输入端数据每比特能量对干扰的单边功率谱密度之比, R_{bm} 为基站发向移动台的数据速率, B_m 为移动台接收扩频信号带宽(同式(18))。

式(17)代入式(19),式(18)代入式(20),得

$$C_{IS_0} = g_{os}/g \quad (21)$$

$$C_{IM_0} = g_{om}/(1 - g) \quad (22)$$

其中,

$$g_{os} = \left(\frac{E_{OS}}{I_{OS}} \right) / \left(\frac{B}{R_{bs}} \right), \quad g_{om} = \left(\frac{E_{OM}}{I_{OM}} \right) / \left(\frac{B}{R_{bm}} \right)$$

式(21)式(22)分别代入式(15)得无下行链路功率控制时带宽分配因子

$$g = g_n = \left\{ \frac{\min [K_n]}{K_m} \cdot \left(1 + \frac{1}{g_{om}} \right) - 1 \right\} / \left\{ \frac{1}{g_{os}} + \frac{\min [K_n]}{K_m \cdot g_{om}} \right\} \quad (23)$$

式(21)式(22)分别代入式(16)得有下行链路功率控制时带宽分配因子

$$g = g_h = \left\{ \frac{\min [K_h]}{K_m} \cdot \left(1 + \frac{1}{g_{om}} \right) - 1 \right\} / \left\{ \frac{1}{g_{os}} + \frac{\min [K_h]}{K_m \cdot g_{om}} \right\} \quad (24)$$

2 下行链路功率控制原则

最优下行链路功率控制方案应满足下面两个条件:(1)各移动台在下行链路上能正常工作;(2) N_h 在给定 C_{IM_0} 下最大。则由式(7)有

$$N_h = \max_{R(d_{11})} \left\{ \min_{(x_1, y_1) \in C_1^1} F(x_1, y_1) \cdot \left(1 + \frac{1}{C_{IM_0}}\right) \right\} \quad (25)$$

其中，

$$F(x_1, y_1) = \frac{P(d_{11}) d_{11}^{-n} \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} R^2 - \frac{1}{3} \pi r_0^2\right)}{\left(\sum_{i=1}^{19} d_{i1}^{-n}\right) \cdot \iint_{AC_1^1} P(d_{11}) dx_1 dy_1} \quad (26)$$

即 $P(d_{11})$ 应使 $F(x_1, y_1)$ 的最小值最大，对于不同的 $P(d_{11})$, $(x_1, y_1) \in C_1^1$ 时，式 (26) 将有不同的最小值，最优的控制方案就是使这个最小值达到最大。寻找最优 $P(d_{11})$ 比较困难，可通过尝试 $P(r_{11}) = P_c r_{11}^{\lambda}$ (P_c 为常数)，并构造 x 不同取值的方式找到一个实用的解。

3 仿真结果分析

对上述分析结果给出数值仿真，取 $r_0 = 0.01R$, n 是移动台与基台之间距离的函数，且假设蜂房半径不大，故 n 变化不大， $n = 2.6$ 。假定功率控制方案选为 $P(r_{11}) = P_c r_{11}^{\lambda}$, P_c 来自于本系统以外的干扰确定的常数。

则由式 (3) 式 (5) 式 (10) 式 (11) 式 (12)，并进一步代入式 (19) 和式 (20) 可给出每扇区信道数，如图 2 所示，图中各曲线的解析式为：

上行
$$M = (1 + 1/C_{IS_0}) = 0.571616275 \left(1 + \frac{gB}{R_{bs}} \frac{E_{OS}}{I_{OS}}\right) \quad (27)$$

下行无功率控制
$$N_h = 0.238872100 (1 + 1/C_{IM_0}) = 0.238872100 \left(1 + \frac{(1 - g_n) B}{R_{bs}} \frac{E_{OM}}{I_{OM}}\right) \quad (28)$$

下行有功率控制

$$N'_h = \min [N_h] = 0.335717043 (1 + 1/C_{IM_0}) = 0.335717043 \left(1 + \frac{(1 - g_n) B}{R_{bs}} \frac{E_{OM}}{I_{OM}}\right) \quad (29)$$

因此，上、下行带宽对称相等划分时， $E_{OS}/I_{OS} = E_{OM}/I_{OM}$ ，带宽分配因子 $g = 0.5$ ，从图 2 可见，系统容量由式 (28) 和式 (29) 分别确定。当 $C/I = -15\text{dB}$ 时，系统每扇区上行信道数为 17，有功率控制时下行信道数为 10，无功率控制时下行信道数为 7。

而上下行带宽非对称划分时，有下行功率控制时的带宽分配因子

$$K_h = 0.370004094 - 0.019545687/B \quad (30)$$

无下行功率控制时带宽分配因子

$$K_n = 0.294726127 - 0.030864193/B \quad (31)$$

由式 (27) 式 (28) 和式 (29)，在下行有、无功率控制时，非对称带宽划分相对于对称带宽划分每扇区信道数提高百分比分别为

$$\gamma_h = \frac{M - N'_h}{N'_h} = 1.702672792 \frac{\left(1 + \frac{g_h B}{R_{bs}} \frac{E_{OS}}{I_{OS}}\right)}{\left(1 + \frac{0.5 B}{R_{bs}} \frac{E_{OM}}{I_{OM}}\right)} - 1 \quad (32)$$

$$\gamma_n = \frac{M - N'_n}{N'_n} = 2.392980490 \frac{\left(1 + \frac{g_n B}{R_{bs}} \frac{E_{OS}}{I_{OS}}\right)}{\left(1 + \frac{0.5 B}{R_{bs}} \frac{E_{OM}}{I_{OM}}\right)} - 1 \quad (33)$$

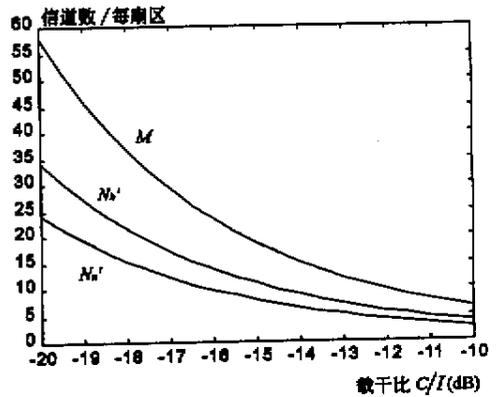


图 2 系统容量

Fig.2 System capacity

图3和图4分别给出了在数据速率 16kb/s、32 kb/s、384 kb/s, $E_{OS}/I_{OS} = E_{OM}/I_{OM} = 7\text{dB}$, 无、有下行功率控制时, γ_n 和 γ_h 相对于系统总带宽 B (1.25MHz~20MHz) 的变化曲线, 可见系统容量有显著的提高。例如, $R_{bs} = R_{bm} = 16\text{kb/s}$, $B = 10\text{MHz}$, 则 $\gamma_h \approx 26.7\%$, $\gamma_n \approx 42.6\%$ 。

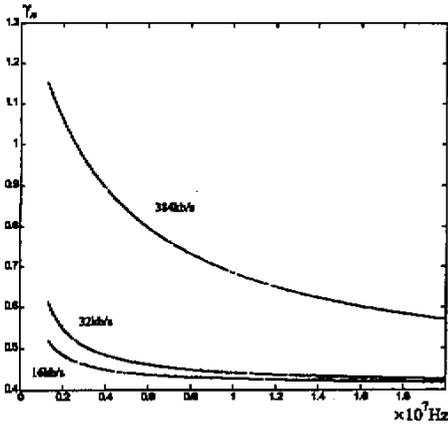


图3 γ_n 相对于与带宽 B 和数据速率

Fig.3 γ_n with respect to bandwidth band data rate

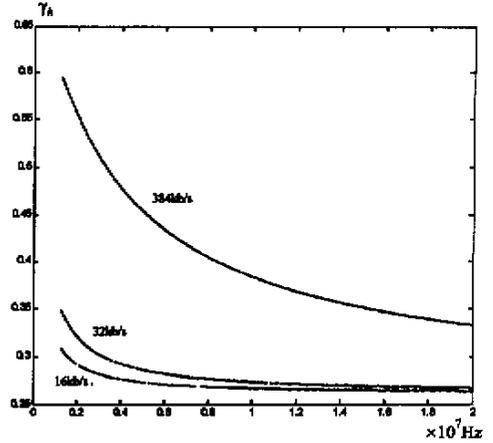


图4 γ_h 相对于与带宽 B 和数据速率

Fig.4 γ_h with respect to bandwidth band data rate

4 结束语

从上述分析中可以看出,一方面,CDMA 蜂房系统的上、下行信道如果分配同样的带宽,因为系统容量最终是由上、下行信道容量的最小值决定,所以,上、下行信道容量的不平衡将造成频率资源的浪费,因此,CDMA 蜂房系统应采用上、下行带宽非对称的分配方式或者其他的办法,如抗干扰技术^[6],以使上、下行带宽容量平衡,达到充分利用频率资源的目的,或者是将上、下带宽对称的 CDMA 蜂房系统的多余单向容量作为单向数据传输用,或者用于系统的上、下行业务容量本身就不平衡的情况(如数据传输等)。另一方面,使用下行功率控制方案能有效的提高系统容量,但最优的功率控制方案如何选择还是一个值得令人深思的问题。本文只给出了一个功率控制方案选择的原则,在仿真计算中,也试用了 $P(d_{11}) = P_c d_{11}^2$ 和 $P(d_{11}) = P_c d_{11}^{2.6}$ 等功率控制方案,系统容量均不如 $P(d_{11}) = P_c d_{11}$,但此方案不能保证是最优的。

在实际系统中,上、下行链路的功率控制并不能达到理想结果,接收功率有些波动,这会使带宽分配因子发生一些相应的变化,同时,系统容量也会有所降低。因此,实用的带宽分配因子还必须考虑这些因素,有待进一步地研究,本文只给出理想情况下的理论结果。

参考文献:

- [1] Jhong Sam Lee, Leonard E Miller. CDMA System Engineering Handbook [M](中译本),北京:人民邮电出版社,2001.
- [2] William C Y Lee, Overview of Cellar CDMA. IEEE Trans.VT.1991, 40(3).
- [3] Ian Oppermann, Predrag B Rapajic. Capacity of a BAND-Limited CDMA MMSE Receiver-Based System when Combined with Treillis or Convolutional Coding [J]. IEEE Trans. con Com. August 2000, 48(8).
- [4] Zahedi A, Pahlavan K. Capacity of a Wireless LAN with Voice and Data Service. IEEE Trans. on Com. July 2000, 48(7).
- [5] Rappaport Theodore S, Milstein Laurence B. Effects of Path Loss and Frange User Distribution on CDMA Cellular Reuse Efficient Frequency. in Proc.GLOBECOM'90 San Diege, CA 1990.
- [6] Margarita A, Flores S J, Rubio L, Almenar V, Corral J L. Application of MUSIC for Spatial Reference Beamforming for SDMA in a Smart Antenna for GSM and DECT [C]. Vehicular Technology Conference, 2001. Volume: 1: 123-126.

