

摘要：本案係多碼多工進接(CDMA)設計實習案，鑑於CDMA是未來第三代行動電話系統所採用的無線進接技術，透過這種技術可以提供高速度及高品質的多媒體服務，這種結合語音、數據、影像等多媒體服務是未來通信的趨勢，面對競爭，有必要先了解相關的技術。本次奉派到法國參加本公司GSM系統供應商NORTEL NETWORKS做相關技術的研習，俾擷取歐美先進國家之相關經驗，供未來網路規劃建設及營運的參考。

## 內 容 及 項 次

第一章、基地台涵蓋區及容量計算.....	3
1.1 涵蓋區的計算 .....	4
1.2 上鏈涵蓋區計算 .....	4
1.3 電波傳播模型 .....	14
1.3.1 涵蓋區面積 .....	16
1.4 細胞容量估算.....	19
1.4.1 上鏈容量估算 .....	19
1.4.2 相關參數說明 .....	21
1.4.3 上鏈細胞容量 .....	24
1.4.4 下鏈容量估算 .....	29
1.4.5 極方程式及細胞容量估算.....	32
第二章、UMTS 基本架構.....	1 24
第三章、WCDMA 基本原理.....	1 28

## 第一章：基地台涵蓋區及容量計算

本節說明基地台涵蓋及容量計算的基本原理，供 RF 設計的參考。

依 ITU 在 IMT-2000 的定義，將行動通信系統依照地形環境特性、無線通道模型、細胞類型以及所提供的服務，分類如表 1.1，其中 LCD (Long Constrained Delay)代表對於 delay sensitive 亦即需要即時(Real-time)性傳送的數據資料，在通信過程中，系統會給予固定的無線電資源，稱之為電路交換(Circuit-switched)的數據服務。UDD(Unconstrained Data Delay)代表對於 delay non-sensitive，因此系統可以動態來指派和釋放無線電資源，並且允許重送的機制，稱之為分封交換(Packet-switched)的數據服務。

表 1.1 行動通信環境特性與服務類型

地形環境	無線通道模型	細胞類型	服務類型
密集都會區 (Dense Urban)	Pedestrian B 3 km/hr	Micro	Speech 12.2K LCD 64K UDD 64K, 144K, 384K
都會區 (Urban)	Pedestrian B 3 km/hr	Macro	Speech 12.2K LCD 64K UDD 64K, 144K, 384K
次都會區 (Suburban)	Vehicular A 120 km/hr	Macro	Speech 12.2K LCD 64K UDD 64K, 144K, 384K
郊區 (Rural)	Vehicular A 120 km/hr	Macro	Speech 12.2K LCD 64K UDD 64K, 144K, 384K

## 1.1 涵蓋區的計算

在行動通信細胞規劃過程中，細胞半徑的大小取決於基地台與行動台間 RF 信號可被允許的最大路徑損失(Maximum allowable path loss)以及電波的傳播環境特性，前者需透過鏈路預算(Link budget)來求得，後者需選擇適合實際情況的傳播模型(Propagation model)來做分析。與 TDMA 不同的是，WCDMA 系統其涵蓋區和話務承載有關，一旦話務量需求增加，涵蓋區就會縮小。加以基地台的發射功率比行動台的發射功率來得大，因此，下鏈電路的鏈路預算會比上鏈電路者來得好，故涵蓋區的限制是在上鏈電路，只要上鏈電路的估算符合需求，下鏈電路自然能夠滿足。

## 1.2 上鏈涵蓋區計算

### (1) 鏈路預算參數與最大路徑損耗

從發射機至接收機，信號會因通道的傳播而造成能量的衰減，為了避免在接收機端因信號能量過低，無法維持理想的鏈路品質，因此發射功率必須足供能量的衰減。以下是鏈路平衡的關係式：

$$UE_{\text{power}} - L_{\text{margins}} - L_{\text{max}} + BS_{\text{gains}} = BS_{\text{sens}} \quad \text{式 1.1}$$

其中

- $UE_{\text{power}}$ ：指行動台的發射功率
- $L_{\text{margins}}$ ：指信號傳送過程中各種可能的增益或損耗的總和
- $L_{\text{max}}$ ：指上鏈的最大路徑損耗
- $BS_{\text{gains}}$ ：指基地天的天線增益含纜線與連接器損耗的總和
- $BS_{\text{sens}}$ ：指基地台接收機的靈敏度

由此公式即可算出上鏈的最大路徑損耗  $L_{\text{max}}$ 。由於最大路徑損耗的計算與鏈路預算的規劃有關，各種參數就顯得相當重要。

在這些參數中,有的跟設備有關,有的會隨著環境而改變,因此,鏈路預算可分成 RF 輸入端信號、基地台與行動台以及餘裕 (Margin)等參數來討論。

(A) RF 輸入端信號參數

(a) 載波頻率  $f_c$  (Carrier frequency)

根據 IMT-2000 的規範,基地台接收機的載波頻段從 1,920~1,980MHz,本文設定值為 1,980MHz。

(b) 展頻頻寬  $W$  (Spreading bandwidth)

WCDMA 展頻後的信號頻寬,其值為 3.84MHz。

(c) 資料率  $R$  (Data rate)

請參考表 1.1 之服務類型。

(d) 處理增益  $PG$  (Processing gain)

將展頻頻寬與資料率代入下式,即可得到處理增益。

$$PG = 10 \log_{10} W / R \quad \text{式 1.2}$$

各種服務類型其處理增益如表 1.2。

表 1.2 不同服務類型所對應的  $PG$

服務類型	$PG$ (dB)
Speech 12.2K	25
LCD 64K	17.8
UDD 64K	17.8
UDD 144K	14.3

(B) 基地台參數

(a) 熱雜訊  $N_0W$  (Thermal noise)

是一種由溫度所引起的雜訊，會隨著溫度而改變。

$N_0 = 10 \log_{10} kT$  (dBm/Hz)，其中  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  (J/K) 是 Boltzman 常數；常溫下 ( $T = 300K$ )，代入信號頻寬  $W = 3.84MHz$ ，得  $N_0W = -108dBm$ 。

(b) 雜訊指數  $NF$  (Noise figure)

用來描述由元件本身引入的雜訊，與設備本身有關，一般介於 3~5dB。本文設定值為 3.0dB。

(c) 位元能量與總雜訊比  $E_b / N_t$  (Energy per bit to total noise ratio)

為維持良好的通信品質，系統通常會定義可接受的錯誤率，其中 speech 及 LCD 的誤碼率(Bit Error Rate, BER) 分別是  $10^{-3}$  與  $10^{-6}$ ，而 UDD 的區塊錯誤率(Block Error

Rate, BLER)則為 10%。表 1.3 是  $E_b / N_t$  的定義值。

表 1.3 不同服務類型與環境所對應的基地台  $E_b / N_t$

$E_b / N_t$ (dB)	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Speech 12.2K	3.7	3.7	4.7	6.5
LCD 64K	3.4	3.4	4.45	4.8
UDD 64K	1.85	1.85	2.95	3.95
UDD 144K	1.4	1.4	2.4	3.4

(d) 接收機靈敏度  $BS_{sens}$  (Receiver sensitivity)

指維持接收機正常運作所須的最低接收功率。組成要素為  $E_b / N_t$ 、 $NF$ 、 $N_0W$  以及  $PG$ ，計算公式如下：

$$BS_{sens} = E_b / N_t + NF + N_0W - PG \quad \text{式 1-3}$$

當考慮不同的資料率  $R$  與  $E_b / N_t$  值時，可得到如表 1.4。

表 1.4 不同服務類型與環境所對應的  $BS_{sens}$

$BS_{sens}$ (dBm)	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Speech 12.2K	-126.3	-126.3	-125.3	-123.5
LCD 64K	-119.4	-119.4	-118.3	-118.0
UDD 64K	-120.9	-120.9	-119.8	-118.8
UDD 144K	-117.9	-117.9	-116.9	-115.9

(e) 天線增益  $G_{BS}$  (Antenna gain)

一般設定值為 18dBi。

(f) 纜線與連接器損失  $L_c$  (Cable and connector loss)

一般設定值為 3dB。

### (C) 行動台參數

RF 信號的發射功率  $UE_{power}$

根據 3GPP 規範，行動台發射功率分成 4 個等級，分別為 33、27、24 以及 21dBm，一般常用的有 24 及 21 dBm，本文語音部分採用 21dBm，數據部分是 24dBm。

### (D) 餘裕參數

(a) 人體損失  $BL$  (Body loss)

靠近頭部接聽電話是一般人使用行動台的習慣，根據行動台的使用情況，若傳送的是 speech，則  $BL = 3\text{dB}$ ，若傳送的是 data， $BL = 0\text{dB}$ 。

(b) 傾斜損失  $SL$  (Slant loss)

交叉極化(Cross-polarized)天線的垂直極化所提供的電波傳播特性優於水平極化，當基地台使用此種  $45^\circ$  傾斜的極化天線，便要考慮 1.0dB 的傾斜損耗。

(c) 汽車或建物穿透損失  $CPL / BPL$  (Car/Building penetration loss)

在細胞涵蓋區規劃時，除了針對室外的情況做評估外，室內的電波傳播必須列入考慮。以鄉村來講，通常只考慮車體的穿透損耗，典型值為 5dB。至於在高樓林立、人口密集的都會區，於室內通話的情形較為普遍，使得電波遭受阻擋及穿透的可能性更大，會造成較大的損耗，典型值為 20dB。4 種不同環境的穿透損耗如表 1.5 所示：

表 1.5 各種環境下的 *CPL / BPL*

地形環境	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
<i>CPL / BPL</i> (dB)	20	15	10	5

(d) 功率控制餘裕  $PC_{mar}$  (Power control margin)

當行動台緩慢移動接近細胞邊緣時，此時若有一個瞬間的衰落(fading)產生，行動台的功率放大器(Power Amplifier)在輸出功率有限的情況下，將無法適時提供足夠的功率將衰落補償回來。因此，在計算鏈路預算時，通常會將  $PC_{mar}$  一併考慮進去，典型值是 0.5dB。倘若行動台呈高速移動，使得通道變成一個快速衰落通道時，則不用考慮  $PC_{mar}$ 。

(e) 對數常態分佈標準差  $\sigma$  (Lognormal standard deviation)

在無線環境中，信號除了因距離的因素而產生路徑耗損外，也會受地形或地物阻擋而導致路徑耗損緩慢的變化，這種現象稱為遮蔽(Shadowing)。如果將路徑耗損的單位取對數，則可視為一個常態分佈，因此又稱為由遮蔽效

應所造成的對數常態分佈。從表 1.6 的結果，可以發現都會區與密集都會區遮蔽效應的現象較為嚴重。

表 1.6 各種環境下的  $\sigma$

地形環境	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
$\sigma$ (dB)	12	12	10	8

(f) 細胞邊緣或細胞涵蓋可靠度  $P_e/P_a$  (Cell edge/area reliability)

$P_a$  是指不管任何時刻，整個細胞涵蓋區域內用戶的信號強度能夠維持一定通信品質的機率，典型的需求值是 0.90~0.95，對應來自細胞邊緣滿足此通信品質的機率值  $P_e$  則為 0.75~0.85。 $P_e$  與  $P_a$  在 Rayleigh 傳播環境下的關係如圖 1.1。

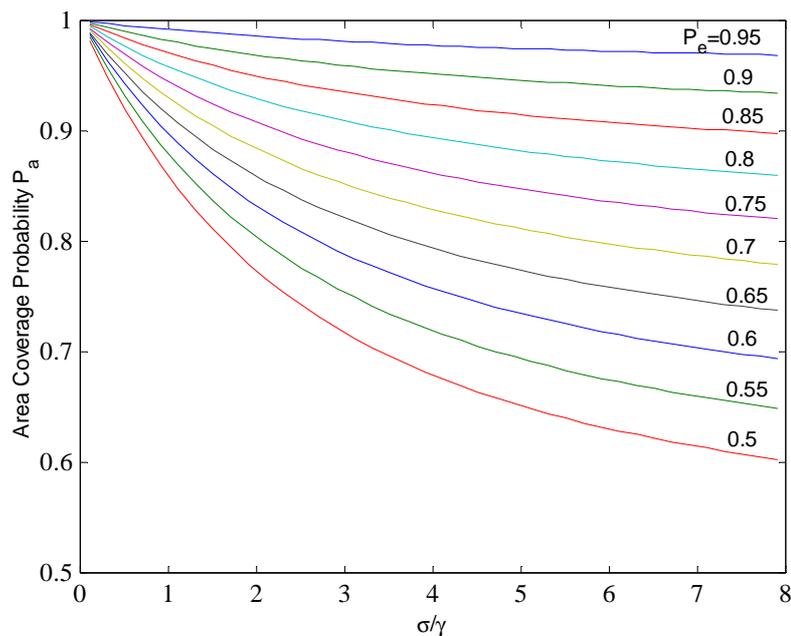


圖 1.1 細胞邊緣相對於細胞涵蓋區可靠度關係圖

(g) 對數常態分佈衰落餘裕  $LNF_{\text{mar}}$  (Log-normal fade margin)

為增加細胞邊緣接收信號能量大於臨界值(Threshold)的機率，必須預留足夠的衰落餘裕來對抗遮蔽效應所造成的耗損，因  $P_e$  呈常態分佈，將  $P_e=0.85$  的值及表 1.6 的 4 種  $\sigma$  代入，可算出不同環境下的  $LNF_{\text{mar}}$ ，如表 1.7 所示。

$$P_e(z) = P_r[Z < z] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} dx \quad \text{式 1.4}$$

表 1.7 各種環境下的  $LNF_{\text{mar}}$

地形環境	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
$LNF_{\text{mar}}$ (dB)	12.44	12.44	10.36	8.29

(h) 上鏈軟性交遞增益  $SHG_{\text{UL}}$  (UL soft handover gain)

行動台一旦進入軟性交遞的區域，會同時與多個細胞建立鏈路，形成所謂的路徑分集(Path diversity)或巨分集(Macro diversity)，如此，可降低行動台的發射功率及系統的干擾量，此即軟性交遞所貢獻的增益，典型值為 5dB。

(i) 細胞負載  $L$  (Cell loading)

細胞負載是指單一扇區實際的用戶數相對於可提供的最大用戶數的百分比。隨著用戶數的增加，系統的總干擾量會跟著增加，此時總干擾量相對於熱雜訊的上升量與

細胞負載會呈一非線性關係，如圖 1.2 所示，為避免干擾量過大增加阻塞的機率，一般採用 50% 的細胞負載。

(j) 上鏈干擾餘裕  $I_{UL}$  (UL interference margin)

假設基地台收到各行動台的信號強度相同，當細胞負載增加時，基地台的干擾量將上升，為對抗干擾，勢必要求提高來自行動台信號的能量，故涵蓋區會縮小。將  $L=0.5$  代入下式，可得到  $I_{UL}$  值， $I_{UL}=3\text{dB}$ 。

$$I_{UL} = 10 \log \left( \frac{1}{1-L} \right) \quad \text{式 1-5}$$

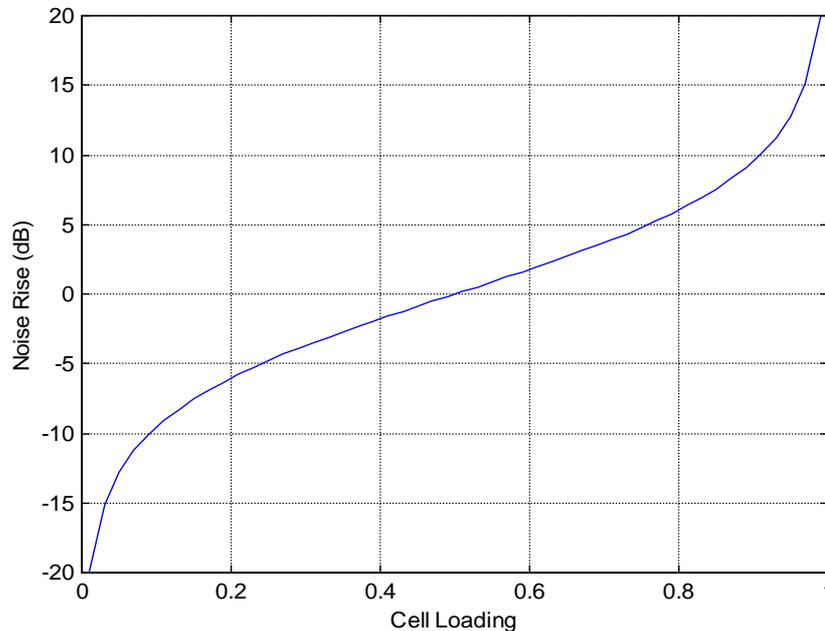


圖 1.2 細胞負載相對於干擾量上升值關係圖

依照下式，將所有的餘裕及損耗參數合在一起，即可

得到上鏈餘裕參數的總和。表 1.8 是考慮各種服務類型及環境的結果。

$$L_{\text{margins}} = BL + SL + CPL / BPL + LNF_{\text{mar}} - SHG_{\text{UL}} + I_{\text{UL}} + PC_{\text{mar}} \quad \text{式 1-6}$$

表 1.8 各種服務類型與環境所對應的  $L_{\text{margins}}$

$L_{\text{margins}}$ (dBm)	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Speech 12.2K	31.95	29.95	22.87	15.8
LCD 64K	28.95	26.95	19.87	12.8
UDD 64K	28.95	26.95	19.87	12.8
UDD 144K	28.95	26.95	19.87	12.8

再將上面各種鏈路預算的參數值代入公式 1.1 中，即可得到上鏈電路的最大路徑損耗  $L_{\text{max}}$ ，如表 1.9 所示。

表 1.9 各種服務類型與環境所對應的  $L_{\text{max}}$

$L_{\text{max}}$ (dB)	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Speech 12.2K	127.33	129.33	135.41	140.68
LCD 64K	126.43	128.43	134.46	141.18
UDD 64K	127.98	129.98	135.96	142.03
UDD 144K	124.91	126.91	132.99	139.06

### 1.3 電波傳播模型

在行動通信系統規劃過程中，如何將最大路徑耗損透過一個合理的傳播模式，轉換成細胞半徑，是本節討論的重點。由於無線通道的環境瞬息萬變，光靠理論導出的模型並無法反應所有的現象，因此，絕大部分的傳播模型都有條件上的限制。以 WCDMA 的使用頻段為例，目前普遍用來計算細胞半徑的傳播模型有 2 種，分別是 COST 231-Hata 及 COST 231-Walfish-Ikegami。前者是 Hata 模型的延伸，把頻率提升至 2GHz，適用在大細胞的地區；後者推導過程比較複雜，但把視線(Line of sight, LOS)與非視線(NLOS)兩種情形合併考慮，其精確度更能反應密集都會區的實際情況。

#### (A) COST 231-Hata 模型

Hata 模型原僅適用於頻率 1.5GHz 以下的系統，為因應個人通信，COST-231 重新修訂，將頻率提升至 2GHz。

$$L_{\max} (dB) = 46.3 + 33.9 \log f_c - 13.82 \log h_b \\ - [(1.1 \log f_c - 0.7)h_m - (1.56 \log f_c - 0.8)] \\ + [44.9 - 6.55 \log(h_b)] \cdot \log(d) \\ - \begin{cases} 0, & \text{city (urban)} \\ 2[\log(f_c / 28)]^2 + 5.4, & \text{suburban} \\ 4.78(\log f_c)^2 - 18.33 \log f_c + 40.94, & \text{open (rural)} \end{cases}$$

式 1-7

式中  $h_b$  與  $h_m$  分別是基地台與行動台的天線高度(m)，

$2[\log(f_c / 28)]^2 + 5.4$  與  $4.78(\log f_c)^2 - 18.33 \log f_c + 40.94$  分別是計算次都會區與郊區細胞半徑時的修正因子(correction factor),  $d$  是細胞半徑(km)。另外, 使用 COST 231-Hata 模型時, 必須注意其條件限制:  $f_c$  介於 1,500MHz 和 2,000MHz 之間,  $h_b$  介於 30m 到 200m 之間,  $h_m$  介於 1m 到 10m 之間,  $d$  介於 1km 到 20km 之間。

### (B) COST 231-Walfisch-Ikegami 模型

Walfisch-Ikegami 模型從 LOS 與 NLOS 的傳播觀點, 將電波傳播損耗的現象分成 3 個部分:

(a) 自由空間損失(Free space loss)  $L_{fs}$ -LOS

$$L_{fs} = 32.44 + 20 \log f_c + 20 \log(d) \quad \text{式 1-8}$$

(b) 繞射及散射損失(Diffraction and scatter loss)  $L_{rts}$  - NLOS

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log w + 10 \log f_c + 20 \log \Delta h_m + \begin{cases} -10 + 0.354 \varphi, & 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075 (\varphi - 35), & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114 (\varphi - 55), & 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad \text{式 1-9}$$

(c) 多隔層損失(Multiscreen loss)  $L_{ms}$  -NLOS

$$L_{ms} = k_a + k_d \log d + k_p \log f_c - 9 \log b + \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_b), & h_b > h_{\text{roof}} \\ 0, & h_b \leq h_{\text{roof}} \end{cases} \quad \text{式 1.10}$$

其中  $w$  是街道的寬度(m),  $b$  是建物的間隔距離(m),  $h_{\text{roof}}$  是屋頂的高度(m),  $\Delta h_m = h_{\text{roof}} - h_m$ ,  $\Delta h_b = h_b - h_{\text{roof}}$ ,  $\varphi$  是

相對於街道方向的入射角度。將以上三種情況合併，可得到損耗總合  $L_{\text{COST}}$ ，公式如下：

$$L_{\text{COST}} = \begin{cases} L_{\text{fs}} + L_{\text{rts}} + L_{\text{ms}} \\ L_{\text{fs}}, \end{cases} \quad L_{\text{rts}} + L_{\text{ms}} \leq 0 \quad \text{式 1-11}$$

此外，該模型亦有其使用限制： $f_c$  介於 800MHz 和 2,000MHz 之間， $h_b$  介於 4m 到 50m 之間， $h_m$  介於 1m 到 3m 之間， $d$  介於 20m 到 5km 之間。

### 1.3.1 涵蓋區面積

考量細胞涵蓋區規劃的準確性，將半徑較大的三種環境如郊區、次都會區以及都會區使用 COST 231-Hata 模型；將半徑較小的密集都會區使用 COST 231-Walfisch-Ikegami 模型。

#### (A) 郊區、次都會區以及都會區細胞半徑

COST 231-Hata 模型有 2 個重要的參數，一個是  $h_b$ ，郊區、次都會區以及都會區分別為 15m、30m 以及 30m。一個是  $h_m$ ，三種環境都是 1.5m。將  $h_b$ 、 $h_m$ 、 $f_c$ ，以及表 1.9 中的  $L_{\text{max}}$  代入公式 1.7，即可得到表 1.10 的結果。

表 1.10 郊區、次都會區以及都會區的細胞半徑

$d$ (km)	都會區	次都會區	郊區
Speech 12.2K	0.71	1.59	3.65
LCD 64K	0.67	1.50	3.77
UDD 64K	0.74	1.65	3.97
UDD 144K	0.61	1.37	3.30

(B) 密集都會區細胞半徑

依 COST 231-Walfisch-Ikegami 模型相關參數的典型值,分別為  $h_m=1.5\text{m}$ ,  $h_b=30\text{m}$ ,  $w=20\text{m}$ ,  $b=50\text{m}$ ,  $h_{\text{roof}}=20\text{m}$ ,  $\Delta h_m=18.5\text{m}$ ,  $\Delta h_b=10\text{m}$ ,  $\varphi=90^\circ$ ,  $k_a=54$ ,  $k_d=18$ ,  $k_p=-2.29$ 。將上述值代入公式 1.8 1.11, 可得到表 1.11 的結果。

表 1.11 密集都會區的細胞半徑

$d$ (km)	密集都會區
Speech 12.2K	0.65
LCD 64K	0.48
UDD 64K	0.53
UDD 144K	0.44

(C) 涵蓋區面積

將表 1.10 與表 1.11 求得的半徑代入以下公式,即可得到三個扇區基地台的涵蓋區面積,如表 1.12 所示。

$$A = \frac{9}{8} \sqrt{3} d^2 \quad \text{式 1.12}$$

表 1.12 3 個扇區基地台的涵蓋區面積

A (km <sup>2</sup> )	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Speech 12.2K	0.82	0.98	4.96	25.98
LCD 64K	0.45	0.87	4.40	27.64
UDD 64K	0.55	1.07	5.32	30.71
UDD 144K	0.38	0.71	3.65	21.26

## 1.4 細胞容量估算

WCDMA 系統的細胞容量計算可從兩個方向來著手，一個是上鏈，一個是下鏈，前者的限制是來自於系統的干擾，若干擾量超過範圍，便無法繼續容納新的用戶；後者的限制是因為基地台能發射的功率及資源有限，若功率用罄，則無法提供新用戶所需的服務。在公式推導的部分，下鏈要比上鏈複雜，原因是因為每個行動台所遭受的干擾都不一樣，且必須共用同一個基地台的發射功率。

### 1.4.1 上鏈容量估算

上鏈的細胞容量一般均根據“*N-pole*”公式來計算。此公式所代表的意義為一個細胞中可以與基地台建立連線的最大行動台數。此公式是根據雜訊與干擾所推導出來的。當系統達到此一極限值時，表示干擾量已達無限大，且細胞半徑亦已縮小為零的情形。故此 *N-pole* 公式是一個理論的極限值。這種模型的觀點在於，假設所有行動台均以達到訊號干擾比(Signal-to-Interference Ratio, SIR)為目標，且行動台所發出的功率皆是用來對抗其他行動台所產生的干擾。

首先，假設所屬細胞與其他鄰近細胞完全隔絕，不受影響，則可得：

基地台接收到單一行動台的訊號功率 ( $S$ ) 為

$$S = E_b/T_b = E_b \cdot R \quad \text{式 1.13}$$

$E_b$  為基地台接收到的位元能量

$T_b$  為位元時間

$R$  為位元速率，是  $T_b$  的倒數

基地台所收到的總訊號功率 ( $I$ ) 為

$$I = N_i \cdot W \quad \text{式 1.14}$$

$N_i$  為雜訊的功率頻譜密度 ( Noise Power spectral density )

$W$  為信號資料傳輸的頻寬 ( 3.84 MHz )

對某一行動台而言，基地台所接收到的其他訊號均視為干擾訊號，所以任何一個行動台的訊號干擾比為

$$\frac{S}{I} = \frac{E_b \cdot R}{N_i \cdot W} = \frac{E_b}{N_i} \cdot \frac{1}{PG} \quad \text{式 1.15}$$

$PG$  為處理增益，等於  $\frac{W}{R}$

$E_b/N_i$  為行動台的訊號經解展頻後所欲達到的訊號干擾比，不同的服務品質 ( QoS ) 會有不同的值，其值如下：

- 語音：BER <  $10^{-3}$
- 電路交換數據：BER <  $10^{-6}$
- 分封交換數據：BLER < 10%

假設在所屬的細胞中，所有的行動台均受到嚴謹的功率控制，使得基地台在接收每個行動台訊號時其強度均相同。令  $M$  為細胞中的行動台數，則針對某一特定的行動台而言，在基地台所收到的其他  $M-1$  個行動台其訊號均視為干擾訊號，此干擾訊號的功率為

$$I = S \cdot (M - 1)$$

$$\text{即 } \frac{S}{I} = \frac{S}{S \cdot (M - 1)} = \frac{1}{M - 1} = \frac{E_b}{N_i} \cdot \frac{1}{PG} \quad \text{式 1.16}$$

將  $E_b/N_i$  的絕對數值以對數表示，則可得“ $N$ -pole”容量理論公式

$$M = 1 + \frac{1}{\gamma} \quad \text{式 1.17}$$

為達到的訊號干擾比 值 ( $S/I_{target}$ ) 則

$$\gamma = 10^{\frac{(E_b/N_t) - 10 \log PG}{10}} = \frac{10^{(E_b/N_t)/10}}{W/R} \quad \text{式 1.18}$$

## 1.4.2 相關參數說明

### (1) 負載因子 ( $F$ )

系統中相鄰細胞間的信號會互相影響。在上鏈中，細胞中的所有行動台均發射訊號至所屬基地台接收，雖然彼此會產生干擾，但是這種干擾與來自其他細胞中的行動台所產生的干擾並不相同，因為本細胞中的所有行動台會通過所屬的基地台來進行功率控制，但是其他細胞的行動台並不會通過本細胞來做功率控制。定義一參數：負載因子  $F$  (Loading factor)，為其他細胞所產生的干擾與本細胞所產生干擾的比值。

$$F = \frac{\text{其他細胞所產生的干擾}}{\text{所屬細胞所產生的干擾}}$$

負載因子的值與細胞規劃有關，會受到地理環境的影響，例如：基地台的扇區數 (Sectors)、天線的波束寬度 (Beamwidth)、長期衰落 (Long-term fading)、電波傳播特性 (Wave propagation characteristics)、軟性交遞 等，均會影響負載因子的大小。表 1.13 為負載因子的估算值。

表 1.13 上鏈負載因子 ( $F$ )

$F$	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Omni	0.67	0.67	0.67	0.67

加入其他細胞的干擾後，“*N-pole*”容量理論公式可寫為

$$M = 1 + \frac{1}{(1+F)\gamma} \quad \text{式 1.19}$$

(2) 頻率重用因子 (Frequency reuse factor, )

定義頻率重用因子 (Frequency reuse factor, ) 為：

$$\rho = \frac{1}{1+F} \quad \text{式 1.20}$$

根據上式，若負載因子 *F* 降低，則頻率重用因子提高。“*N-pole*”容量理論公式可寫為

$$M = 1 + \frac{\rho}{\gamma} \quad \text{式 1.21}$$

根據 Qualcomm 模擬及參考文獻，67% 為頻率重用因子的合理估算值。表 1.14 所列為各種環境下頻率重用因子 ( ) 值：

表 1.14 上鏈頻率重用因子 ( )

	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Omni	0.6	0.6	0.6	0.6

(3) 扇區化增益 (Sectorization gain, )

使用指向性天線，可有效降低每個細胞的干擾量，藉以提升系統的容量。將一個全向性天線改為三個扇區天線的基地台後，若扇區間沒有重疊且不考慮軟性交遞，則扇區所受到的干擾量為原來的三分之一，即容量可以提高三倍。若使用六個扇區天線，則容量可以提高六倍。

實際上，扇區不可能沒有重疊，亦不可能沒有軟性交遞。當扇區愈

小，愈難控制其他鄰近扇區所造成的干擾，且有可能因軟性交遞而造成更多的負載。因此，系統容量增加的倍數不會與扇區數成正比。將 *N-pole* 容量理論公式加入扇區化增益之後，重寫如下式：

$$M = 1 + \frac{1}{(1+F)\gamma} \lambda = 1 + \frac{1}{\gamma} \rho \lambda \quad \text{式 1.22}$$

一般說來，扇區化組態的重疊區約佔該細胞 10% 至 30% 的涵蓋面積，理想的扇區化增益值（ $\lambda$ ）約為 0.7 至 0.9。一般說來，三扇區組態的扇區化增益約 2.2 至 2.6 之間，六扇區組態的扇區化增益約 3.5 至 4.5 之間。表 1.15 為一般估算值。

表 1.15 上鏈

	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
<b>Omni</b>	0.6	0.6	0.6	0.6
<b>三扇區組態</b>	0.52	0.52	0.52	0.52
<b>六扇區組態</b>	0.45	0.45	0.45	0.45

(4) 語音活動因子 (Voice Activity Factor,  $\nu$ )

語音的特性，是非連續性的，在 WCDMA 系統中，當沒有資料傳輸時，發射機不會發射功率，因此可以降低細胞的干擾。結合這兩個特性可以降低整個細胞的干擾量，以提升細胞容量。若將語音活動因子加入 “*N-pole*” 容量理論公式，可改寫為

$$M = 1 + \frac{1}{(1+F)\gamma} \lambda \left( \frac{1}{\nu} \right) = 1 + \frac{1}{\gamma} \left( \frac{\rho \lambda}{\nu} \right) \quad \text{式 1.23}$$

一般說來，語音活動因子的估算值在 40% 至 60% 之間。而當傳送資料時，語音活動因子則為 1。表 1.16 為語音活動因子 0.6 時  $\rho \lambda / \nu$  值。

表 1.16 上鏈 (  $\rho\lambda/\nu$  )

$\rho\lambda/\nu$ ( 語音 )	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Omni	1	1	1	1
三扇區組態	0.87	0.87	0.87	0.87
六扇區組態	0.75	0.75	0.75	0.75

#### 1.4.3 上鏈細胞容量 ( $N$ -pole )

將各種服務類型所需的服務品質、訊號干擾比及處理增益，帶入“  $N$ -pole ” 容量理論公式中，即可得到上鏈細胞的最大容量。

不同的服務品質與地理環境，會有不同的  $E_b/N_t$ ，如表 1.17 所示：

表 1.17 上鏈  $E_b/N_t$

$E_b/N_t$ (dB)	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
語音 8 kbps	4.3	4.3	5.3	7.1
語音 12.2 kbps	3.7	3.7	4.7	6.5
電路交換數據 64 kbps	3.4	3.4	4.45	4.8
電路交換數據 144 kbps	2.65	2.65	3.45	4.25
電路交換數據 384 kbps	1.6	1.6	2.8	3.7
分封交換數據 64 kbps	1.85	1.85	2.95	3.95
分封交換數據 144 kbps	1.4	1.4	2.4	3.4
分封交換數據 384 kbps	1.4	1.4	2.4	3.4

(1) 語音 8 kbps

表 1.18 扇區上鏈容量 (語音 8 kbps)

Erlang	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Omni	179.3	179.3	142.6	94.5
三扇區組態	155.5	155.5	123.7	82.1
六扇區組態	134.7	134.7	107.2	71.1

(2) 語音 12.2 kbps

表 1.19 扇區上鏈容量 ( 語音 12.2 kbps )

Erlang	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Omni	135.2	135.2	107.6	71.4
三扇區組態	117.3	117.3	93.4	62
六扇區組態	101.7	101.7	80.9	53.8

(3) 電路交換數據 64 kbps

表 1.20 扇區上鏈容量 ( 電路交換數據 64 kbps )

Erlang	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Omni	17.4	17.4	13.9	12.9
三扇區組態	15.2	15.2	12.1	11.3
六扇區組態	13.3	13.3	10.6	9.9

(4) 電路交換數據 144 kbps

表 1.21 扇區上鏈容量 ( 電路交換數據 144 kbps )

Erlang	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Omni	9.6	9.6	8.2	7
三扇區組態	8.5	8.5	7.2	6.2
六扇區組態	7.5	7.5	6.4	5.5

(5) 電路交換數據 384 kbps

表 1.22 扇區上鏈容量 ( 電路交換數據 384 kbps )

Erlang	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Omni	5.1	5.1	4.1	3.5
三扇區組態	4.5	4.5	3.7	3.2
六扇區組態	4.1	4.1	3.3	2.9

(6) 分封交換數據 64 kbps

表 1.23 扇區上鏈容量 ( 分封交換數據 64 kbps )

Erlang	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Omni	24.5	24.5	19.2	15.4
三扇區組態	21.3	21.3	16.8	13.5
六扇區組態	18.6	18.6	14.6	11.8

(7) 分封交換數據 144 kbps

表 1.24 扇區上鏈容量 ( 分封交換數據 144 kbps )

Erlang	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Omni	12.5	12.5	10.2	8.3
三扇區組態	11	11	8.9	7.3
六扇區組態	9.6	9.6	7.9	6.4

(8) 分封交換數據 384 kbps

表 1.25 扇區上鏈容量 (分封交換數據 384 kbps)

Erlang	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Omni	5.3	5.3	4.4	3.7
三扇區組態	4.7	4.7	3.9	3.3
六扇區組態	4.2	4.2	3.5	3

負載因子  $F$  會依照每個基地台扇區的數量 1、3、6 而有不同的對應值，分別是 0.67、0.93 以及 1.2。表 1.26 為三個扇區組態的上鏈容量，語音與數據的語音活動因子  $v$  分別為 0.6 與 1.0。

表 1.26 細胞負載 100% 的上鏈容量值 ( $M_{\max}$ )

$M_{\max}$ (user)	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
語音 8 kbps	155.5	155.5	123.7	82.1
語音 12.2 kbps	117.3	117.3	93.4	62
電路交換數據 64 kbps	15.2	15.2	12.1	11.3
電路交換數據 144 kbps	8.5	8.5	7.2	6.2
電路交換數據 384 kbps	4.5	4.5	3.7	3.2
分封交換數據 64 kbps	21.3	21.3	16.8	13.5
分封交換數據 144 kbps	11	11	8.9	7.3
分封交換數據 384 kbps	4.7	4.7	3.9	3.3

#### 1.4.4 下鏈容量估算

在下鏈部分，系統的涵蓋率及容量分析，與上鏈不同。蓋下鏈傳遞時，基地台所屬的行動台都是使用該基地台的功率資源，而基地台可提供的最大功率是固定的，一般約 20W。故討論基地台的涵蓋區大小時，不能僅考慮該細胞所屬的行動台數目，及其使用的服務類別，另外行動台所在位置的分佈也是影響因素，即使是相同的服務類別，與基地台較遠的使用者會比較近的使用者，會消耗更多的基地台功率資源。

##### 1.4.4.1 基地台提供單一行動台所需之功率

在下鏈通道中，基地台所發射的功率可分為專用通道(Dedicated Channel, DCH)和共用通道(Common Channel, CCH)。從干擾產生的觀點來看，下鏈共用控制通道(Common Control Channel, CCCH)可進一步分為兩種類型的通道：一種是非正交同步通道，另一種是正交共用通道。綜上所述，基地台所發射的功率可概分為下列三種：(1).用在個別行動台  $k$  的專用通道  $P_k$ ；(2).用在同步通道的  $P_{SCH}$ ；以及(3).用在共用通道的  $P_{CCH}$ 。

如果基地台  $L$  發射給行動台  $k$  的功率為  $P_{k,L}$ ，發射給同步通道及共用通道的功率分別為  $P_{SCH}$  與  $P_{CCH}$ ，則在一個共有  $M$  個行動台的系統中，基地台所發射的總功率為：

$$P_{tot,l} = \sum_{k=1}^M P_{k,L} + P_{SCH} + P_{CCH} \quad \text{式 1.24}$$

在行動台部分，可將雜訊來源分成三個：(1).所屬細胞產生的干擾；(2).其他細胞的干擾；以及(3).背景雜訊干擾(Background Noise)。

1.所屬細胞產生的干擾：由於同步通道並未經過正交碼的處理，所以會對所有通道產生干擾，干擾量等於基地台發射同步通道的功率大

小；此外，儘管專用通道在發射前經過正交碼處理，但由於在一般的傳播環境下會產生多路徑訊號，這些訊號會破壞原有訊號間彼此間的正交性，從而對所屬細胞造成干擾。干擾量的大小通常隨地形環境而變。

假設發射專用通道和共用通道中會有  $\alpha$  比例喪失其正交性，則在一個有  $M$  個行動台的系統中，基地台  $L$  在行動台端  $k$  處所帶來的干擾量：

$$N_{Self} = P_{SCH} g_{k,L} + \alpha \left( \sum_{k=1}^M P_{k,L} + P_{CCH} \right) g_{k,L} \quad \text{式 1.25}$$

其中  $g_{k,L}$  表示基地台  $L$  到行動台  $k$  端的通道增益。

不同傳播環境下的  $\alpha$  值如下表所示：

表 1.27 不同通道下的  $\alpha$  值

	都會區	次都會區	郊區
	0.06	0.41	0.4

2. 鄰近細胞對行動台  $k$  的干擾部分：由於 WCDMA 系統中不同基地台間並未維持同步狀態，其他細胞所發射的能量對行動台  $k$  而言皆是干擾；下式是鄰近細胞對行動台  $k$  所帶來的干擾量：

$$N_{Other} = F_{k,L} P_{tot,L} g_{k,L} \quad \text{式 1.26}$$

$F_{k,L}$  表示接收到的訊號功率來自本細胞及他細胞之比例， $B$  代表目前系統中所有的基地台數。

$$F_{k,L} = \frac{\sum_{j=1, j \neq l}^B P_{tot,j} g_{k,j}}{P_{tot,L} g_{k,L}} \quad \text{式 1.27}$$

F 值的大小會隨細胞扇區的規劃而異，扇區數目愈大，他細胞溢入的比例就愈嚴重，F 值就愈大。在有些都會區的環境，會出現他細胞溢入的干擾量和本細胞產生的干擾量相當甚至更大的情況。考量上述因素及背景雜訊 N，可得到行動台端訊號干擾比：

$$\begin{aligned} \left. \frac{C}{I} \right|_{k,L} &= \frac{P_{k,L}g_{k,L}}{[P_{SCH} + \alpha(\sum_{k=1}^M P_{k,L} + P_{CCH})]g_{k,L} + F_{k,L}P_{tot,L}g_{k,L} + N} \\ &= \frac{P_{k,L}g_{k,L}}{(\alpha + F_{k,L})P_{tot,L}g_{k,L} + (1-\alpha)P_{SCH}g_{k,L} + N} \end{aligned} \quad \text{式 1.28}$$

不考慮 Macro diversity，行動台僅與單一個基地台通信時，為了達到 QoS 的服務要求，C/I 必須維持在一定值上，除了維持自己的通信品質外，尚須防止過大的發射訊號對他用戶造成干擾。下式代表維持 QoS 時所需的訊號干擾比：

$$\left. \frac{C}{I} \right|_{k,L} = \left. \frac{C}{I} \right|_{target} = \gamma \quad \text{式 1.29}$$

即

$$\frac{r_{k,L}g_{k,L}}{(\alpha + F_{k,L})P_{tot,L}g_{k,L} + (1-\alpha)P_{SCH}g_{k,L} + N} = \gamma \quad \text{式 1.30}$$

經過整理得下式

$$P_{k,L} = \gamma[(\alpha + F_{k,L})P_{tot,L} + (1-\alpha)P_{SCH} + \frac{N}{g_{k,L}}] \quad \text{式 1.31}$$

$$\begin{aligned} P_{tot,L} &= \sum_{k=1}^M P_{k,L} + P_{SCH} + P_{CCH} \\ &= \sum_{k=1}^M \gamma[(\alpha + F_{k,L})P_{tot,L} + (1-\alpha)P_{SCH} + \frac{N}{g_{k,L}}] + P_{SCH} + P_{CCH} \end{aligned}$$

式 1.32

假設在此系統中，所有的  $F_{k,L}$  值趨近於定值  $F$ ，經過整理可以得到基地台  $L$  在  $M$  個行動台下所需發射的總功率為：

$$P_{tot,L} = \frac{[1 + M\gamma(1 - \alpha)]P_{SCH} + P_{CCH} + \gamma \sum_{k=1}^M \frac{N}{g_{k,L}}}{1 - M\gamma(\alpha + F)} \quad \text{式 1.33}$$

由上式很明顯的看出，當行動台數  $M$  增加或維持 QoS 所需的  $\gamma$  值增加時，基地台必須發射更大的功率。當發射訊號喪失太多正交性或是外部細胞干擾太大時，基地台也必須發射更大的功率；反之亦然。

#### 1.4.5 $M_{pole}$ 方程式及細胞容量估算

由式 1.33 可看出在分母為零之下，基地台所發射的功率達到無窮大，此時的容量即達到該細胞下鏈的極限容量  $M_{pole}$  (Pole capacity)。

$$1 - M\gamma(\alpha + F) = 0$$

$$M_{pole} = \frac{1}{\gamma(\alpha + F)} \quad \text{式 1.34}$$

故以  $M_{pole}$  表示之基地台發射功率值為：

$$P_{tot,L} = \frac{[1 + \frac{M}{M_{pole}} \frac{1 - \alpha}{\alpha + F}]P_{SCH} + P_{CCH} + \gamma \sum_{k=1}^M \frac{N}{g_{k,L}}}{1 - \frac{M}{M_{pole}}} \quad \text{式 1.35}$$

當行動台  $k$  與  $L$ 、 $S$  兩基地台進行軟性交遞時，該行動台與此兩基地台間皆有連線(connection)；此連線之基地台會將接收到的訊號送到無線網路控制器(RNC)做最大比例結合(Maximum-Ratio Combining, MRC)，此時，每個基地台的功率控制機制仍將試圖維持：

$$\gamma = \frac{C}{I} \Big|_{target} = \sum_{AS} \frac{C}{I} = \frac{C}{I} \Big|_{k,S} + \frac{C}{I} \Big|_{k,L} \quad \text{式 1.36}$$

假設行動台 k 與基地台 S 有較佳的連線，並且滿足

$$\Delta^{(b)} = \Delta^{(2)} = \frac{\frac{C}{I} \Big|_{k,L}}{\frac{C}{I} \Big|_{k,S}} \leq 1 \quad \text{式 1.37}$$

此時 b=2 代表總連結數為 2。

訊號干擾比 可寫成

$$\gamma = \frac{(1 + \Delta^{(2)})P_{k,S}}{(\alpha + F_{k,S})P_{tot,S} + (1 - \alpha)P_{SCH} + \frac{N}{g_{k,S}}} \quad \text{式 1.38}$$

故基地台 S 所要發射的總功率為：

$$P_{tot,S} = \sum_{n=1}^{M \cdot SHO^{(1)}} P_{n,S} + \sum_{k=1}^{(2M) \cdot SHO^{(2)}} P_{k,S} + P_{CCH} + P_{SCH} \quad \text{式 1.39}$$

其中  $SHO^{(b)}$  代表正與 b 個基地台進行軟性交遞的行動台比例，如果 b = 1，則代表  $SHO^{(1)}$  比例的行動台只與一個基地台有連結(即未進行軟性交遞)。  $2M \cdot SHO^{(2)}$  代表比例為  $SHO^{(2)}$  的行動台正在進行二路軟性交遞連結時，基地台所需提供之總連結數(乘以兩倍表示包括了此細胞對其他細胞內行動台的連結)。假設

$$F_{n,S} = F_{k,S} = F \quad \text{式 1.40}$$

則整理後，可得  $P_{k,S}$  與  $P_{n,S}$  如下：

$$P_{n,S} = \gamma[(\alpha + F_{n,S})P_{tot,S} + (1 - \alpha)P_{SCH} + \frac{N}{g_{n,S}}] \quad \text{式 1.41}$$

$$P_{k,S} = \frac{\gamma}{1 + \Delta^{(2)}}[(\alpha + F_{k,S})P_{tot,S} + (1 - \alpha)P_{SCH} + \frac{N}{g_{k,S}}] \quad \text{式 1.42}$$

一般情況，行動台與基地台通信時，常伴隨著軟性交遞發生，此時，一個行動台至多可與四個基地台同時做通信，當各個基地台將所收到的訊號送到 RNC 做整合時，可降低偵測錯誤率。因此，在一定的 QoS 要求下，基地台可降低對行動台的發射功率，當發射功率一降低，則對環境所產生的干擾也有一定程度的下降。從另一方面來看，雖然基地台降低對行動台的發射功率，行動台卻也佔用了基地台的下鏈資源。

假設  $F_{n,S} \approx F_{k,S} \approx F$ ：

$$\begin{aligned} & [1 - M\gamma(\alpha + F)(1 + SHO^{(2)} \frac{1 - \Delta^{(2)}}{1 + \Delta^{(2)}})]P_{tot,S} \\ & = [1 + M\gamma(1 - \alpha)(1 + SHO \frac{1 - \Delta^{(2)}}{1 + \Delta^{(2)}})]P_{SCH} \\ & \quad + P_{CCH} + \gamma [ \sum_{n=1}^{MSHO^{(1)}} \frac{N}{g_{n,S}} + \sum_{k=1}^{2MSHO^{(2)}} \frac{g_{k,S}}{1 + \Delta^{(2)}} ] \end{aligned}$$

經整理可得

$$P_{tot,S} = \frac{[1 + \frac{M}{M_{pole}} \frac{1 - \alpha}{\alpha + F}]P_{SCH} + P_{CCH} + noise}{1 - \frac{M}{M_{pole}}} \quad \text{式 1.43}$$

其中

$$M_{pole} = \frac{1}{\gamma(\alpha + F)(1 + SHO^{(2)} \frac{1 - \Delta^{(2)}}{1 + \Delta^{(2)}})} \quad \text{式 1.44}$$

$$noise = \gamma \left[ \sum_{n=1}^{MSHO^{(1)}} \frac{N}{g_{n,S}} + \sum_{k=1}^{2MSHO^{(2)}} \frac{N}{1 + \Delta^{(2)}} \right] \quad \text{式 1.45}$$

依照上式，可以推出在一個最多可連線至四個基地台的系統中，基地台所需發射的總功率為：

$$P_{tot,S} = \frac{\left[1 + \frac{M}{M_{pole}} \frac{1 - \alpha}{\alpha + F}\right] P_{SCH} + P_{CCH} + noise}{1 - \frac{M}{M_{pole}}} \quad \text{式 1.46}$$

其中

$$M_{pole} = \frac{1}{\gamma(\alpha + F)(1 + \sum_{b=2}^{AS} SHO^{(b)} \frac{(b-1 - \Delta^{(b)})}{1 + \Delta^{(b)}})} \quad \text{式 1.47}$$

$$noise = \sum_{b=1}^{AS} \frac{\gamma N b}{1 + \Delta^{(b)}} \sum_{k=1}^{M * SHO^{(b)}} \frac{1}{g_{k,S}} \quad \text{式 1.48}$$

以上所推導的 M 值，不管系統能否提供 Macro Diversity 的狀況下，皆假設基地台可發射的功率為無限大。但在一般的系統中，基地台最大發射功率多是有限制的，所以在實際系統中容量達不到預估的  $M_{pole}$  值。假設系統的負載值 L (Load)，定義如下，M 代表當時的使用人數：

$$L = \frac{M}{M_{pole}} \quad \text{式 1.49}$$

不考慮執行軟性交遞而佔用基地台資源的情況下，每個扇區的最大容量如下式：

$$M_{\max} = \frac{1}{r(\alpha + F)} \quad \text{式 1.50}$$

下鏈的  $E_b / N_t$  需求如表 1.28 所示，3 個扇區的  $F=0.93$ ，至於  $\alpha$  依郊區、次都會區、都會區，以及密集都會區分別為 0.4、0.41、0.06 以及 0.06，計算結果如表 1.29 所示。另一方面，基地台為了執行軟性交遞，勢必會使用部分的話務資源，而造成系統容量的降低。假設  $AS=3$ ， $SHO^{(b)}=0.25$ ， $\Delta^{(b)}=0.9$ ，配合先前使用的參數，即可求得加上軟性交遞時負載的容量，結果如表 1.30 所示。

表 1.28 不同服務類型與環境下鏈所需的  $E_b / N_t$

$E_b / N_t$ (dB)	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Speech 12.2K	6.3	6.3	7.2	8.1
LCD 64K	5.9	5.9	6.9	7.7
UDD 64K	4.5	4.5	5.7	6.8
UDD 144K	4.1	4.1	5.2	6.0
UDD 384K	4.1	4.1	5.2	6.0

表 1.29 細胞負載 100% 的下鏈極容量值

$M_{\max}$ (user)	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Speech 12.2K	124.8	124.8	75.5	61.1
LCD 64K	15.6	15.6	9.3	7.7
UDD 64K	21.6	21.6	12.2	9.4

UDD 144K	10.6	10.6	6.1	5.0
UDD 384K	3.9	3.9	2.3	1.9

表 1.30 考慮軟性交遞負載的下鏈極容量值

$M_{\max}$ (user)	密集都會區	都會區	次都會區	郊區
Speech 12.2K	107.8	107.8	65.2	52.8
LCD 64K	13.5	13.5	8.8	6.6
UDD 64K	18.7	18.7	10.5	8.1
UDD 144K	9.1	9.1	5.3	4.3
UDD 384K	3.4	3.4	2.0	1.6