第 19 卷 第 2 期
1997 年 3 月

电子科学学刊
JOURNAL OF ELECTRONICS

Vol.19 No.2
March 1997

CDMA 移动卫星通信系统容量的计算 [1]

张更新

(通信工程学院卫星通信教研室 南京 210016)

摘 要 本文在考虑了下行功率通量密度限制、遮蔽效应、多个系统和相邻波束同频复用、采用话音激活和极化隔离技术的前提下，分别计算和分析了不同下行功率通量密度限制方式、不同信道扩频带宽和不同移动用户接收系统品质因数 (G/T) 条件下 CDMA 移动卫星通信系统的容量，并与 TDMA 和 FDMA 的容量进行了比较，在最后给出了主要结论。

关键词 CDMA, 系统容量，干扰，卫星通信

中图号 TN927.2, TN929.5, TN914

1 引 言

与其它的多址方式相比， CDMA(码分多址) 具有抗干扰能力强、隐蔽性好、多址访问灵活、对非正交系统不需要系统的同步、与同频通信系统之间的相互干扰小、对多普勒频移不敏感等优点；通过采取一些提高容量的措施 (如话音激活、极化隔离和相邻波束同频复用等), 其传统的频带利用率低的缺点也不再存在。因此，目前绝大多数移动卫星通信系统 (包括采用低轨道、中轨道和同步轨道卫星的系统) 的多址方式都采用 CDMA 。但由于以下几个因素的影响，在移动卫星通信系统中采用 CDMA 方式并不能完全达到地面蜂窝系统中的效果 (如在地面蜂窝系统采用 CDMA 方式能达到比采用 TDMA 方式多六七倍的容量等 [1]), 表现在： (1) 由于长传播时延使得只能采用开环功率控制和不完善的交织 [2,3] 。 (2) 仰角不高时，由于树叶等造成的遮蔽效应较严重， CDMA 对此无能为力 [4] 。 (3) 非常小的多径时延扩展 (一般小于 100ns), 要求系统必须采用 10Mcps 以上的扩频码速率才能有效地抗多径衰落，而目前提出的几个移动卫星通信系统的扩频码速率都小于此值 [4] 。 (4) 多个系统同时同频工作，造成邻站干扰的增加，会使各个系统的容量有一定的下降 [5] 。 (5) 由于移动卫星业务 (MSS) 中卫星是移动的，很难与所有地面系统进行协调，只能采用双方遵守一定的协调电平，使相互间的干扰控制在一定限度内的办法。国际电联规定了分配给 MSS 的 2483.5~2500MHz 频段的协调触发电平 (以下简记为 CTL, Coordination Trigger Level) 为 -142dBW · $m^{-2}\cdot(4kHz)^{-1}$, 就相当于规定了移动用户的接收功率通量密度 (以下简记为 PFD) 的上限，使 CDMA 系统工作在一种功率受限状态，造成系统容量的下降。

由于 ITU 规定的 CTL 是针对 4kHz 频带的，而实际 CDMA 系统是在一定频带内扩频的，因此， CTL 与 PFD 之间满足下列关系：

$$[\mathrm{PFD}] = [\mathrm{CTL}] + 10\times\log(B) - 10\times\log(4000), \tag{1}$$

[1] 1995-07-18 收到， 1995-12-15 定稿
国家自然科学基金资助项目

上式中 B 为一条 CDMA 信道的扩频带宽 (Hz), 计算符号两侧加 [ ] 表示是 dB 值，以下同。

在考虑了以上几个因素后，本文分析了 CDMA 移动卫星通信系统的容量，并与 FDMA/TDMA 的进行了比较。

2 分析中的主要前提和条件

为便于说明，选择某个系统中的一个用户作为参考用户，其它用户对此参考用户而言都是干扰源。

有 n 个系统在同一频段内工作，各系统的每颗卫星都有 J 个点波束，每波束有 m 条扩频信道，每条信道内都有 K_n 个用户同时工作，各波束有相同的 EIRP(有效全向辐射功率) 和 (G/T)(接收系统品质因数 (天线增益 / 等效噪声温度)), 各系统都采用完善的功率控制，因此到达卫星转发器或移动用户接收机的各路信号有相同的功率 C 。

一个用户只与其所在系统的一颗卫星进行通信，因此，本文中所说的系统容量实际上是指一颗卫星上的容量。参考用户到其本系统的卫星无遮蔽。各系统工作于相同的频带且采用相同的信道划分方法，即各系统都把相同的可用频带划分为同样带宽的 m 条扩频信道。频率不同的两条扩频信道相互之间无干扰，因此，在所有同时工作的用户中真正对参考用户产生干扰的是工作于同频率扩频信道上的用户。上 / 下行链路采用相同的扩频码速率、码周期和扩频带宽；各用户有相同的扩频码速率和地址码周期，并认为各扩频码间是互不相关的。

采用香蕉天线来克服通信中的远近效应，即用卫星天线的增益来补偿传播损耗的增加而不是用调整发射功率来克服远近效应。

移动用户之间不能直接进行通信，所有的通信都经过网关站中继，因此，移动用户的上行功率控制可由网关站来负责。

各系统都采用话音激活技术来提高容量。由于 CDMA 方式要求码字同步，如果采用传统的话音激活方式，那么每次当话音从无声期到有声期时都需重新同步，这不仅给实现增加了难度，而且影响通信质量。因此，采用自适应话音激活方式是较好的方式，即在话音的有声期采用较高速率的话音编码方式，而在话音的无声期采用较低速率的编码方式。这样，在保持相同的 E_b/N_0(每比特能量 / 单边噪声功率谱密度) 下，如果在话音有声期需发的功率为 t, 那么在话音无声期需发的功率为 bt, b 为功率下降因子 $(0 \le b \le 1)$, 与有声期和无声期中采用的编码速率差值有关。

各系统都采用极化隔离技术来提高容量，并认为每个波束内的移动用户按极化方式可分为两类，一类是采用左旋圆极化方式工作，另一类是采用右旋圆极化方式工作，并认为两类用户的数目始终是相同的。

由于各用户到同一颗卫星的距离不同，因此，在上行链路上采用正交码是非常困难的；不同的卫星到同一个移动用户的距离也不同，因此，实现不同卫星下行信号之间的正交也是很难的；而在同一颗卫星的下行链路上采用正交码是可能的。本文只分别分析了在一个波束或一颗卫星的所有下行链路上采用正交码的情况。

3 CDMA 同频干扰功率计算

在考虑采用多波束同频复用技术、话音激活技术、极化隔离技术时，到达参考用户接收机输入端的由本系统内所有用户产生的总功率为

$$I_1 = [K_n C(1 + N_1 A_1)(1/2 + \mathrm{CPD}/2)] \times \{(1-d) + d \times [a + (1-a) \times b]\}, \tag{2}$$

上式中 C 为到达参考用户或转发器接收机输入端的参考用户信号的功率 (W), CPD 为交叉极化鉴别度 ($0 \leq \mathrm{CPD} \leq 1$), $a(0 \leq a \leq 1)$ 为话音业务的激活概率， d 为话音业务占总业务量的百分比， $(1-d)$ 为其它不采用激活技术的非话业务占总业务量的百分比， N_1 为相邻波束数， A_1 为波束间耦合因子，忽略不相邻波束间的干扰。K_nC 表示一个波束内总的信号功率；$(1+N_1A_1)$ 为考虑相邻波束耦合影响后的因子； (1/2+CPD/2) 项为采用极化隔离技术后的因子； $\{(1-d)+d\times[a+(1-a)\times b]\}$ 为采用话音激活技术后的因子。

除了自己的信号外，其它用户信号对参考用户而言都是干扰。当不采用正交码时，本系统内所有其它用户对参考信号产生的干扰功率为

$$\begin{aligned} I_2 &= I_1 - C \\ &= [K_nC(1+N_1A_1)(1/2+\mathrm{CPD}/2)] \times \{(1-d)+d\times[a+(1-a)\times b]\} - C. \end{aligned} \tag{3}$$

当只在一个波束的下行链路上实现地址码完全正交时，本系统内其它用户产生的干扰功率可修改为

$$I_2 = [K_nCN_1A_1)(1/2+\mathrm{CPD}/2)] \times \{(1-d)+d\times[a+(1-a)\times b]\}. \tag{4}$$

当在一颗卫星所有点波束的下行链路上实现正交码时，本系统内其它用户产生的干扰功率可修改为

$$I_2 = 0. \tag{5}$$

假定 n 个系统有相同的波束覆盖区，则其它 $(n-1)$ 个系统内所有用户对参考信号产生的干扰功率为

$$I_3 = (n-1)\times K_n \times C \times (1+N_1A_1)\times(1/2+\mathrm{CPD}/2)\times\{(1-d)+d\times[a+(1-a)\times b]\}. \tag{6}$$

假设一个用户到其本系统卫星受遮蔽的概率为 S, 遮蔽后用户发送功率的增加因子为 p, 即如果用户在不处于遮蔽状态时发 t 的功率，那么在处于遮蔽状态时就需发 pt 的功率 ($1\leq p$); 信号受遮蔽后其功率衰减为无遮蔽时的 q 倍 ($0 \leq q \leq 1$) 。对于前向链路，由于同一颗卫星发送的信号在到达参考用户时经历相同的遮蔽，因此，考虑遮蔽效应后，所有其它用户信号对参考信号产生的前向同频干扰功率为

$$I = (I_2+I_3)\times[(1-S)+S\times p], \tag{7}$$

式中 $(1-S)$ 和 $S\times p$ 分别表示干扰用户到其本系统卫星无和有遮蔽时的情况。在上式的计算中，当不考虑正交码时， I_2 用 (3) 式计算；当考虑在一个波束内采用正交码时， I_2 用 (4) 式计算；当在一颗卫星内采用正交码时， I_2 用 (5) 式计算。

4 CDMA 链路计算公式

一条双工 CDMA 信道的容量等于前 / 后向 (网关站到移动用户 / 移动用户到网关站) 信道容量中的较小值，不妨认为前向信道的信道容量较小 (如果较大，则一条全双工信道的容量应小于前向信道的容量) 。由于规定了移动用户接收功率通量密度 (PFD) 的上限，通过选择参数就可计算出前向链路的容量上限，也就得到了 CDMA 系统容量的上限。

由文献 [7], 对 CDMA 信道的链路计算公式为

$$(C/n_0)^{-1} = (C/n_0)_u^{-1} + (C/n_0)_d^{-1} + (C/n_I)^{-1}, \tag{8}$$

式中 $(C/n_0)_u$ 和 $(C/n_0)_d$ 分别为参考用户信号的上行和下行 (载波 / 噪声) 功率谱密度，(C/n_I) 为参考用户信号的 (载波 / 总干扰) 功率谱密度，(C/n_o) 为参考用户接收机的 (载波 /(噪声 + 干扰)) 功率谱密度。

由于所有通信都经网关站中继，而网关站的 EIRP 和 (G/T) 值可比移动用户的大得多，因此，可以认为网关站到卫星这段链路上的 (载波 / 噪声) 功率谱密度 (C/n_0) 要比移动用户到卫星这段链路上的大许多，因此，计算时可忽略这段链路上的热噪声影响。这样，对于前向链路 (网关站到移动用户), (8) 式可改写为

$$(C/n_0)^{-1} = (C/n_o)_d^{-1} + (C/n_I)^{-1}, \tag{9}$$

其中

$$(C/n_I)^{-1} = 10\log(3 \times R_C \times C/(2 \times I)), \tag{10}$$

$$\begin{aligned}(C/n_o)_d = {} & [\mathrm{PFD}/(1 + N_1 A_1)] - 10\log(4\pi/\lambda^2) + [(G/T)_m] \\ & - [k] - [mK_n\{(1-d) + d \times [a + (1-a) \times b]\}].\end{aligned} \tag{11}$$

(10) 式中 R_C 扩频码速率；I 为前向同频干扰功率，由 (7) 式计算得到；3/2 是在假定码片 (Chip) 是矩形脉冲下，通过理想相关处理和窄带滤波后得到的。(11) 式是在考虑对单个系统的下行功率通量密度进行限制下得到的，k 为波尔兹曼常数 ($[k] = -228.6\mathrm{dBW/Hz}$) 。由于参考用户接收功率通量密度是由所有波束产生的接收功率通量密度之和，因此，在给定的功率通量密度下，考虑波束间耦合后，对 PFD 还需除以 $(1 + N_1 A_1)$ 才是一条信道实际可用的信号功率通量密度 (忽略不相邻波束间的影响), $[G/T_m]$ 是移动用户接收系统的品质因数，λ 为波长 (m) 。

当有多个系统同时工作，而 PFD 仍是对每个系统进行限制时，其计算公式同上；当 PFD 是对所有系统的总和进行限制时，则 (11) 式中的 PFD 应除以同时工作的系统数 n(假定各系统有相同的功率通量密度) 。

这样，根据系统工作参数，由 (9)–(11) 式就可计算出在一条信道中同时工作 K_n 个用户时，参考用户前后向链路的 (C/n_0) 。令 R_b 为用户信息速率 (bps), 则

$$(C/n_0) = (E_b/n_0) + [R_b]. \tag{12}$$

在一定的用户信息速率下，就可计算出一个用户的 (E_b/n_0) 。在一定的调制和编码制度下，可推算出为达到要求的误比特率 (BER) 所需的 $(E_b/n_0)_{\mathrm{th}}$, 这样就可由下式计算出一条信道前 / 后向链路的余量

$$[M] = (E_b/n_0) - (E_b/n_0)_{\mathrm{th}}. \tag{13}$$

之所以要有链路余量是为了能保证链路在存在多径衰落、遮蔽和降雨衰耗等一些额外损耗时仍能达到要求的误比特率。为达到要求的业务性能，一般都要求链路有足够大的余量 (一般要求大于 2dB) 。只要在 K_n 个用户同时工作时，仍能达到要求的最低链路余量，那么就认为该 K_n 值是一条信道中的最大容量值。

5 数值计算结果

5·1 主要技术参数的选择

在以下的计算中，凡没有说明某个参数的具体值时，它们的约定值如下：每卫星上点波束数 $(J)=6$, 每波束中扩频信道数 $(m)=13$, 工作频率 $(f)=2491\text{MHz}$, 扩频码速率 $(R_c)=1.2288\text{Mbp}$, 扩频信道带宽 $(B)=1.25\text{MHz}$, 业务信息速率 $(R_b)=4.8\text{kbps}$, 要求的最低误比特率 (BER)$=10^{-3}$, 要求的 $(E_b/n_o)_{\text{th}}=3.5\text{dB}$, 链路要求的余量 $(M)=2.0\text{dB}$, 移动用户品质因数 $[(G/T)_m]=-24\text{dB/K}$, 相邻波束数 $(N_1)=6$, 相邻波束间耦合度 $(A_1)=0.1$, 话音业务占总业务的比例 $(d)=90\%$, 话音业务激活率 $(a)=0.35$, 话音无声期功率下降因子 $(b)=0.25$, 交叉极化鉴别度 (CPD)=3dB, 没有遮蔽存在 (即 $S=0.0\%$), 下行链路不采用正交码，只有一个系统工作 $(n=1)$, 总可用频带为 16.5MHz 。

由于这些值的计算参数都是比较保守的，得到的前向链路容量应是上限值，因此，系统容量也应是上限值。

5·2 系统容量计算结果及讨论

表 1 给出了不同扩频带宽 (B) 下，一颗卫星上可同时工作用户数与链路余量 (M) 的关系。从计算结果来看，在相同的链路余量和总可用频带的前提下，采用不同的信道扩频带宽得到的容量并无太大的差别；在相同的扩频带宽和总可用频带的前提下，随着链路余量的下降，容量增加很快。在移动卫星通信中，其多径时延扩展较小 (< 100ns) 而信号的直射分量一般又比多径分量要大，因此采用较高的扩频带宽可以保留较小的链路余量。从这点意义上说，采用较宽的扩频带宽可以得到相对较高的容量。在多条相对较窄的信道上扩频比之在一条宽带信道上扩频的好处是：当移动用户种类较多时，采用多条信道就可使同种类型的站工作于同一条信道，便于进行功率控制；各条信道的带宽较窄，因此，其地址码速率较低，这样也易于实现；通过在不同的信道中分配不同数目的用户，就能为用户提供不同的服务质量等级。

表 1 不同扩频带宽 (B) 下，一颗卫星上可同时工作用户数 $(m\times J\times K_n)$ 与链路余量 (M) 的关系

扩频带宽 (B)	链路余量 (M)								
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
1.25(MHz)	4134	3744	3276	2964	2652	2340	2106	1872	1638
8.2(MHz)	4236	3768	3360	3000	2676	2388	2124	1896	1692
16.5(MHz)	4254	3792	3378	3012	2688	2394	2136	1902	1698

表 2 给出了不同功率通量密度限制方式下，一颗卫星上可同时工作用户数与系统数 (n) 的关系。显然，对所有系统功率通量密度 (PFD) 的总和进行限制时，会使各个系统的容量比对每个系统的 PFD 进行限制时的要小许多。

表 2 不同功率通量密度限制方式下，一颗卫星上可同时工作用户数 $(m\times J\times K_n)$ 与系统数 (n) 的关系

限制方式	系统数 (n)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
对每个系统进行限制	2652	2184	1872	1638	1404	1248	1170	1014	936	858
对所有系统的和进行限制	2652	1326	858	624	468	390	312	312	234	234

在给定的接收通量密度下，系统的容量与移动用户接收系统的品质因数 (G/T) 有关，表 3 给出了不同系统数 (n) 下，一颗卫星上可同时工作用户数与接收系统品质因数 (G/T) 的关系。从表中所示计算结果可看到，当同时工作系统 (n) 较少时，增大 (G/T) 能使系统的容量有明

显上升；当 n 较大时，增大 (G/T) 后对改善容量不明显，主要原因是接收到的干扰功率也随 (G/T) 的增加而增加。

表 3 不同系统数 (n) 下，一颗卫星上可同时工作用户数 $(m \times J \times Kn)$ 与接收系统品质因数 (G/T) 的关系

系统数 (n)	G/T(dB/K)							
	−26	−24	−22	−20	−15	−10	−5	0
1	1794	2652	3744	5070	8736	11232	12324	12714
5	1092	1404	1716	1950	2340	2496	2496	2496
10	780	858	1014	1092	1120	1248	1248	1248

关于 CDMA 与 FDMA/TDMA 方式容量的争论已有一段时间，本文试图从另一个侧面 (容量与总波束数的关系) 对此问题进行分析。表 4 给出了相同可用频带 (16.5 MHz) 、不同多址方式下，一颗卫星上可同时工作的最大用户数 $(m \times J \times K_n)$ 与点波束数 (J) 的关系，计算中认为 FDMA/TDMA 方式处于频带受限状态、频带利用率为 0.6 bit/Hz 、每条信道信息速率为 4.8kb/s 、不能同频复用的波束数为 7 。

表 4 相同可用频带、不同多址方式下，一颗卫星上可同时工作用户数 $(m \times J \times Kn)$ 与点波束数 (J) 的关系

多址方式	每颗卫星上点波束数									
	1	3	4	6	7	8	14	15	21	22
CDMA($n=1$)	702	1755	2184	2808	3094	3836	6188	6630	9282	9724
CDMA($n=5$)	377	936	1144	1482	1638	1872	3276	3510	4914	5148
CDMA($n=10$)	247	585	728	936	1001	1144	2002	2145	3003	3146
FDMA/TDMA	2062	2062	2062	2062	2062	4125	4125	6187	6187	8250

当 CDMA 和 FDMA/TDMA 方式采用相同的点波束数时，从表中可看到当有多个系统 $(n > 3)$ 同时工作时，采用 FDMA/TDMA 方式的系统比每个采用 CDMA 方式的系统有较高的容量；但所有 CDMA 系统的容量和 $(n \times m \times J \times K_n)$ 比 FDMA/TDMA 方式的大。

当只有一个系统工作 $(n = 1)$ 且点波束数较少时 $(J < 4)$, FDMA/TDMA 方式有较高的容量；当点波束数较多时 $(J > 4)$, CDMA 方式有较高的容量，而这种容量的提高也是很有限的，并不能达到地面蜂窝系统中的效果。当 FDMA/TDMA 方式有较多的点波束数时，就能有比 CDMA 方式更高的容量，如当 CDMA 方式采用 7 个点波束时， FDMA/TDMA 方式只要有 8 个点波束就能有较高的容量。

同时工作的系统越多，虽然每个系统的容量越小，但所有系统的容量和越大，亦即采用 CDMA 方式越有好处。因此我们不能脱离具体条件而简单地说那种多址方式有较高的容量。

6 结　论

通过本文的分析计算，在下行通量密度限制和多个系统同时同频工作时，对采用 CDMA 方式的移动卫星通信系统的容量可得到以下几个结论： (1) 在相同可用频带的条件下，采用不同的信道扩频带宽对系统的总容量没有太大影响。 (2)CDMA 方式下有多个系统同时工作 $(n > 3)$ 时，单个系统的容量低于采用 FDMA/TDMA 方式的容量；但所有系统的容量和大于采用 FDMA/TDMA 方式的。 (3) 在同时工作系统数较少 $(n < 4)$ 且多波束条件下，如果 CDMA 和 FDMA/TDMA 有相同的点波束数，那么采用 CDMA 方式可得到高于 FDMA 和 TDMA 方式的系统容量，但这种提高也是很有限的，并不能达到地面蜂窝系统中的提高程度。(4)CDMA 与 TDMA/FDMA 容量相比，系统容量与采用的点波束数有关。点波束数多的容量高。 (5) 多个系统同时工作时，单纯提高移动用户的 G/T 值并不能使系统的容量有明显的提高。

参 考 文 献

[1] Crawford T. Why CDMA should be the digital choice for cellular carriers. Telecommunications, 1993, 27(3): 49–51.

[2] Vojcic B R, Pickholtz R L, Milstein L B. Performance of DS-CDMA with imperfect power control operating over a low earth orbiting satellite link. IEEE J. of SAC, 1994, SAC-12(4): 560–567.

[3] Kohno R, Meidan R, Milstein L B. Spread spectrum access methods for wireless communications. IEEE Communications Magazine, 1995, 33(1): 58–67.

[4] Magill D T, Natali F D, Edwards G P. Spread-spectrum technology for commercial applications. Proc. IEEE, 1994, 82(4): 572–584.

[5] Vojcic B R, Milstein L B, Pickholtz R L. Total capacity in a shared CDMA LEOs environment. IEEE J. of SAC, 1995, SAC-13(2): 232–244.

[6] 张更新，李斌，蔡剑铭. 低轨道卫星通信系统体制和通信协议的研究：内部研究报告. 南京：通信工程学院，1995 年 3 月.

[7] 吕海寰，蔡剑铭，甘仲民，陈久治. 卫星通信系统工程. 北京：人民邮电出版社，1994 年第二版，第 8.2 节.

[8] Gilhousen K S. Increased capacity using CDMA for mobile satellite communication. IEEE J. of SAC, 1990, SC-8(4): 503–514.

THE CAPACITY CALCULATION FOR CDMA MOBILE SATELLITE COMMUNICATION SYSTEM

Zhang Gengxin

(*Nanjing Institute of Communication Engineering, Nanjing* 210016)

Abstract On the basis of considering downlink power flux density limit, shadowing effect, frequency reuse in different systems and adjoining spots of same system, adopting voice activity and polarization isolation techniques, the capacity of CDMA mobile satellite communication system at different downlink power flux density limit mode, channel spread bandwidth and mobile user's quality factor of receiving system (G/T) are analysed and calculated, and compared with the ones of TDMA and FDMA. Finally, the conclusions are given.

Key words CDMA, System capacity, Interference, Satellite communication

张更新： 男，1967 年生，博士，目前主要从事低轨道卫星通信、数据通信和综合业务卫星通信等方面的研究和教学工作.