

国外电子技术专题译丛

# 卫星通信技术

(内 部)

15150

中国人民解放军京字183部队

一九七二年十二月

## 说 明

这是一本有关卫星通信的码分和时分体制方面的专题译丛。因译文是由几个单位提供的，因此很多名词术语未必统一。另外，因为时间短促，而我们的业务水平又不高，因此在编辑上可能存在有错误和缺点，请使用者提出批评指正。最后，对电信技术动态编辑组，京字113部队和北京电信工程学院等提供译稿和移用其译稿的单位表示由衷的谢意。

## 目 录

1. 对硬限幅卫星转发器进行多址联接所使用的调制技术····· ( 1 )
2. 多址卫星通信中的伪噪声调制和一般调制的比较····· ( 21 )
3. 码分多址系统····· ( 41 )
4. 移动站之间的卫星通信····· ( 51 )
5. 时分多址通信试验····· ( 78 )
6. MAT-1: INTELSAT的700路时分多址按需分配实验系统····· ( 143 )
7. T.T.T—具有时间予分配和时间话音内插特点的50兆比特/秒PCM-TDMA系统····· ( 151 )
8. 新的PCM-TDMA卫星通信系统····· ( 161 )
9. 100或50兆比特/秒时分多址系统····· ( 174 )
10. TDMA系统发射端同步控制的作用及问题····· ( 181 )
11. 国防卫星通信系统用的时分多址系统····· ( 188 )
12. 提高TDMA系统效率的可能性····· ( 197 )

# 对硬限幅卫星转发器进行多址联接所使用的调制技术

## 摘要:

本文研究了能使很多地面站同时共用一个具有宽带硬限幅放大器转移特性的卫星转发器的各种调制技术。叙述了四种调制技术及其独特的性能。讨论了三个设计方面的主要考虑问题: 转发器的带宽和功率分配, 通信网定时和工作方面的考虑。

本文为进一步研究多址联接问题打下一个轮廓。硬限幅转发器能与很多种信号设计相适应。没有一种多址调制技术能完全满足利用通信卫星的各种通信网的所有要求。

## 引言

目前已在轨道上的通信卫星表明: 卫星转发器能够提供与其它可能方式同样多或更多一些的通信容量, 而且一个通信卫星能为分布很广的许多地点之间提供很多信道<sup>[3]</sup>。然而直到目前为止, 通信卫星技术的发展趋势一直是向一对地面站(至多是几对)提供大通信容量发展的。对于军事应用来讲, 需要能使许多分布很广的地面站能同时对一个卫星转发器进行多址联接的方法。在使用中高度或以上[高过2000哩(约3200公里)的]高度的卫星轨道时, 转发器可以在地球表面的大部分上看到, 因此它具有能与分布很广的许多地点相互联接的能力。既允许在卫星视野中的任一地面站能与此视野中的一个或更多个地面站进行通信, 而与此转发器的其它用户的相互干扰又尽可能的小, 这是最理想的了。提供具有这种特性的系统所包括的技术上和理论上的困难就是本文所讨论的多址联接这类问题。在中央终端站中, 在卫星线路和由用户来的地面线路之间进行接口时所产生的基带多路复用和转换的问题就不在这里讨论了。

目前已在轨道上的所有卫星以及不久将要进入轨道的那些卫星所受到的大小和重量方面的限制, 对卫星上可能产生的功率大小加上了很严格的限制。因此卫星转发器使用行波管放大器, 这是已研制出的宽带微波功率放大器件中效率和可靠性最好的。为了充分利用行波管所消耗的直流功率, 因此它必须工作在射频功率输出最大点附近, 也就是工作在饱和区附近。但是在行波管工作在饱和状态时, 它具有一些不很好的特点, 其中包括有不均匀的增益—频率特性和相位失真。这些特点能在共用此转发器的信号之间引起串话。因此需要能保证行波管工作在靠近饱和区的工作点上, 而不是在饱和区的工作点上的方法。

一种设计方法就是在行波管之前接入具有很宽频带(10兆赫或更大些)的硬限幅放大器(一种无限的削波器)。硬限幅器的输出是一种恒定包络信号, 其振幅可调到使行波管永远工作在靠近饱和区的选好工作点上。以下的讨论表明, 宽带硬限幅转发器具有很大的通用性, 能够适应很多种信号设计, 并能达到合理的通信效率。这种特点, 再加上只需要规定两个设计参数(转发器的功率输出和带宽), 就使它成为衡量其它转发器的一种很合适的标准。

因此以下主要讨论一些包括能同时联接具有宽带硬限幅放大器特性的卫星转发器的各种信号调制技术的多址联接问题。

註1. 在本文中, 多址联接用于表示高频信号的混合, 而多路复用表示基带频率信号的混合。

## 信号流程

每一个用户地面站将利用两种调制方式将射频信号发送到卫星上去。第一种是多址联接调制，它用来完成两种主要目的：1、它能使具有所要求的解调器的任一接收地面站能分别接收每一个发射的消息；2、在通过卫星转发器时，与其它用户地面站的发射信号的相互干扰应尽可能的小。第二种就是消息调制，它用来传递消息的信息。在以下的讨论中，将经过多址联接调制但未经消息调制的射频信号叫做多址联接载频或简称为载频。分配给经过消息调制的多址联接载频的转发器容量叫做一个信道。两个地面站在一个方向上通信（在给定的信道上，一个发射，一个接收）时构成一个中继线路。

卫星通信网中的信号流程如图1所示。为了简化起见，只示出了一个中继线路；然而在某些情况下，一个发射机可能要与一个以上的接收机通信。

消息波形必须加到每一个多址联接载频的波形上。发送的信号在产生出来时就具有多址联接调制特性，它能将信号“按址送给”接收机并提供一种能使每一个接收机能从卫星转发器发出的复合信号中得到所需信号的方法。例如在时分多址联接（TDMA）系统中，多址联接调制就是一种时间—选通作用，它能将每一发射脉冲组正确地置于与此通信网中其它发射

站的脉冲组有一定相互位置关系的位置上。在恒定包迹频谱展宽多址联接（SSMA）系统中，加入一个宽带的相位或频率编码作为载频的编址、在脉冲编址多址联接（PAMA）系统中，多址联接由调制脉冲的特性图形构成。在频分多址联接（FDMA）系统中，多址联接调制从严格的意义上讲，并不是一种真正的调制；它只是预先选定载频的中心频率。在所有情况下，射频信号都是通过两次操作而得到的，先在载频上加上多址联接调制，然后再将消息信号加进去。

每一个发射信号经过天线辐射出去，按照空间损耗系数受到衰减，然后到达卫星转发器的输入端。这种过程用符号表示在图1中，用菱形圈起的一般项（ $P_{tG}$ ）代表卫星转发器输入端的有效接收功率。用户地面站的发射信号连同热噪声，再由卫星转发器经过宽带硬限幅后转发出去。如图1所示，转发器输入的复合信号经过外差下降为适合限幅器设计的中频，然后再经过外差上升为输出的高频。输入和输出频率要错开以防止信号环流。

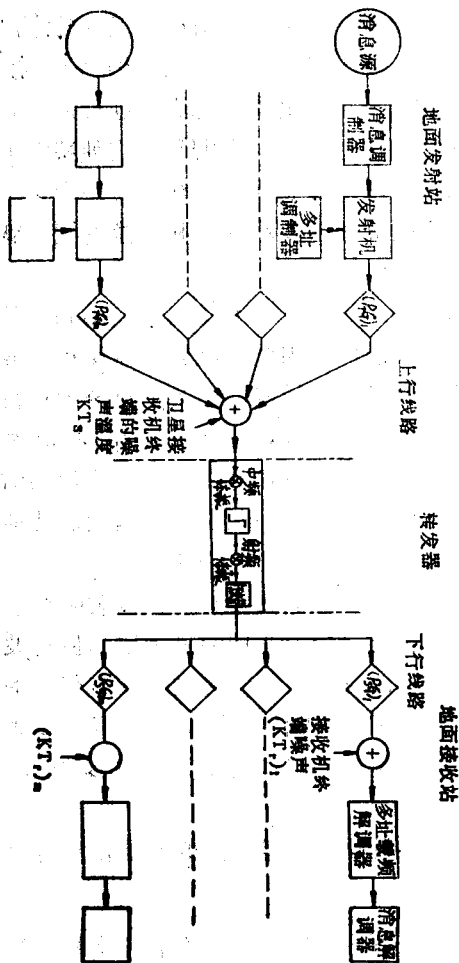


图1、多址联接信号流程

在大多数情况下，用户地面站的信号功率在卫星转发器输入端要比热噪声功率大的多。而且当与热噪声共用转发器时就成为问题时，则与其它用户地面站的共用就变成无意义了。因此，除非特别指明，在转发器输入端有一个或多个信号时，都假定热噪声对转发器输出信号无影响。然而当转发器输入端无信号时，则输出信号就是由输入噪声引起的，并假定其为高斯噪声，在整个转发器带宽上具有平滑的频谱。

复合的转发器输出信号以功率 $P_s$ 辐射出去，而且以功率 $P_r = P_s G$ 在每一个接收机进行接收。在接收机输入端，接收机的每单位带宽的热噪声功率 $N_0 = K T_r$ 与从卫星接收到的信号混合在一起。通常，转发器将具有足够的带宽以满足 $P_r/N_0$ 比值的要求，这是对通信容量最起限制作用的量。这个比值具有带宽的因次，而且为每一个接收站，按照关系式 $P_r/N_0 = (S/N) W$ ，根据所要求的接收机输入端的信噪功率比，限定了它的射频信号带宽 $W$ 。在多址联接工作方式中，在每一个接收站所需要的信号将为 $P_r$ 的一部分。一个 $P_r/N_0$ 比值的解释性计算见附录。

接收用户站利用多址联接解调器“调谐”到所需信号，对进入的信号进行解调。多址联接解调器与多址联接调制器属于同一类型装置。例如，在TDM A系统中，解调器是一个固定位置的时间选通器。在SSMA系统中，具有同样的相位或频率编码的相关器用作解调器。在PAMA中，以选通匹配的脉冲图形未完成解调工作。在FDMA系统中，调谐本机振荡器的频率以进行多址联接解调。

### 多址联接调制技术

为了实用目的，硬限幅转发器要破坏通过它的振幅调制（通—断选通除外）。另一方面，相位和频率信息却保存下来了。因此，与硬限幅转发器一起使用的多址联接调制技术可以利用信号的三个特性：通—断选通、频率和相位。本文中，将各种多址联接调制技术组合为4类：频分多址联接（FDMA）；恒定包络频谱展宽多址联接（SSMA）；时分多址联接（TDM A）；脉冲编址多址联接（PAMA）。因为它将具有类似特点的系统组合在一起，所以这种分类方法在讨论中是很有用的。图2表明这种分类的方式。

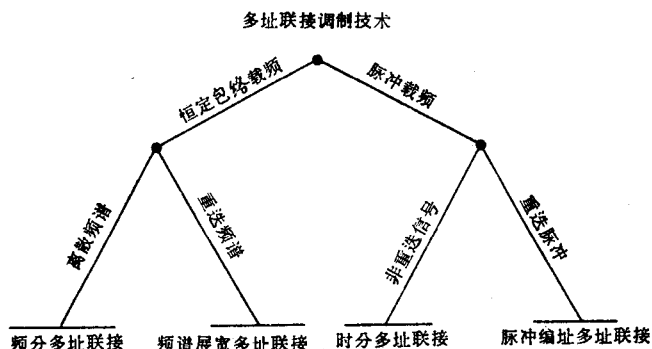


图2、多址联接调制技术的分类

### 频分多址联接

在频分多址联接系统中，将转发器带宽分为多个不重叠的频段，由它们组成联接信道。为每一个中继线路指定一个联接信道。对于宽带硬限幅转发器来讲，信道的安排不是由这个转发器设定的；每一个特定的安排都是受对每一个发射用户站的信号频谱的规定的影响的。

指定不同的频段作为区分无线电信号的一种手段是通常通信中实际使用的。然而，当这些信号在硬限幅转发器中混合时，却要产生一些复杂问题[3]~[9]。

当几个信号同时出现在转发器输入端时，它们通过转发器要有相互干扰作用，要蒙受诸如交扰调制噪声和影响明了度的串话的损害。这些损害主要来源于转发器的硬限幅特性，它能在同时出现在转发器输入端的信号之间引起交扰调制。这种交扰调制噪声可能是频带以外的噪声，它将只夺取一部分能用于所需信号的输出功率，或者它是在所需信号频带之内的。如果要想有效地将信道分布成使所有交扰调制噪声都在信号频带之外时，则转发器的带宽的很大部分就不能利用[10]。

不管是两个或多个独立的信号通过硬限幅转发器时，在输出端的任两个信号成分的功率比与同样两个信号成分在输入端的功率比是不一样的，这种变化总是使较强的信号受到好处，而使弱信号受损害。

当有两个恒定包络信号时，而一个信号比另一个强4或更多倍时，这种抑制作用是最坏的。因此，较小信号的相对输出功率要比其在转发器输入端的相对输入功率减少另一个4倍（6分贝）。与此最坏情况相反，如果这两个信号中较大的一个具有高斯过程特性时，则较小信号至多比其输入的相对功率低1分贝。当许多具有近乎相同功率的大的恒定包络信号同时达到转发器输入端时，其效果与高斯信号时的类似，因此其中的某一个恒定包络信号将被抑制约1分贝。

如果与转发器相连的接收站都具有同样的规模和灵敏度时，而所要求的数据率相等时，则相对应的发射站的上行线路功率应该相同。上行线路功率能够协调的程度还不清楚，但是上行线路功率之间的很大不等情况将减少转发器输出功率的利用率。假定转发器的功率和带宽在M个中继线路间平均分配。如果上行功率在转发器输入端不能保持相等时，则转发器的输出功率就不能平均分配，因而有些站将接收到比所需的功率要多一些，而另外一些则要少一些。这种情况要求对每一个地面站在功率要求方面要有很严格的界限，这样就减少了能同时使用此转发器的地面站的总数目。而且，如果转发器输入端的一个信号比其它信号的总和还大4倍以上时，则强信号将控制转发器输出功率的与之不相称的一大部分，这样将越过输入功率的相互关系，而将其它信号的输出功率夺走。对于不相同的要求来讲，因为信号之间的指定的功率比不相同，上行线路功率的协调就变得更复杂了。

FDM A的一个优点就是用户站的调制设备能与很多现有的设备并用。对于模拟调频信息调制来讲，只要有调频发射机和接收机，而且线路输入和输出均为模拟形式，能用来接入通常的电话设备。

### 时分多址联接 (TDM A)

在TDM A系统中，不同线路中的传输在转发器中不重叠。在特定的时隙中，指定每一个中继线路单独使用此转发器。这样，通过此转发器的信号实际上没有相互干扰。在TDM A中，一个联接信道就表示一个特定的时隙序列。这种序列的最简单的情况将是，每一个信道的时隙将以一定的重复频率周期地出现，此重复频率可叫做此系统的“帧频”，此种安排中的其它信道将具有相同的帧频，但出现的时间不同，而且可能具有不同的时隙时间[11]。

如果将卫星发射的一个信号指定为时基或卫星时钟，则这些信号只要保持相对于卫星时钟的特定时间间隔，就可以在时间上区分开并保持特定的序列里。利用直接的闭环定时技术[12]就可在0.1微秒或可能更短的时间内完成这动作。这种步骤不要一个给定的发射站去考

虑任何其它站的路径时延。而且，因为它是一个闭环动作，因此允许一个地面站按时发送而无需精确计算卫星时钟的绝对相位和频率或它自己的路径时延。

图3表明了这种步骤，假定时标信号是由卫星以时间间隔  $T$  来发射的，而且 A 站希望以在时标之后  $t_1$  秒能收到的脉冲将消息发送给 C 站。为调定其本身的时钟，A 站要在正常为  $T$  的时间间隔内发射一组脉冲，当这些脉冲以时标的重复脉冲经过卫星转发而被收到后，A 站就比较这些脉冲的重复频率，然后 A 站就按所接受信号中的精确差值来改变它本身的时钟。A 站也要将时标和相继的消息脉冲之间的间隔与  $(T_A/T) t_1$  进行比较（在大多数情况下， $T_A$  应等于  $T$  以达到测量精度），并调节其本身时钟的相位以消除任何差值。当这两次比较结果没有任何误差时，则本身时钟就正确地调好了。

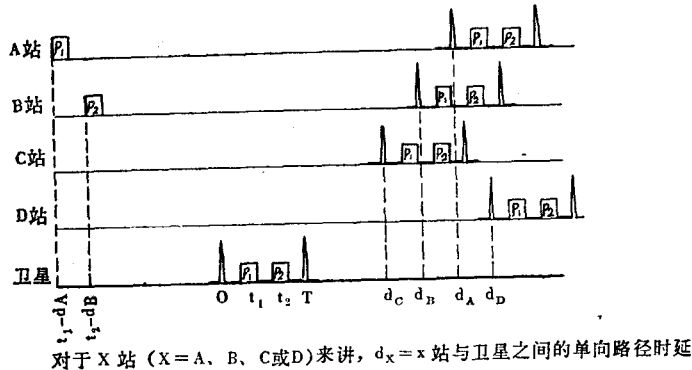


图3、时间刻度上的相互关系，符号  $d_x$  ( $x = A, B, C$  或  $D$ ) 代表  $x$  站与卫星之间的单向路径时延。

应该注意到这种步骤不受予定接收站本身的影响，即它可能是 B 或 D 站而不是 C 站。而且，这种步骤也不受卫星运动的影响，本身时钟是以接收到的时标的重复频率来加以调节，以便与返回信号的重复频率相吻合的，而相位比较是在时标到消息频率的时间间隔与  $(T_A/T) t_1$  之间进行的。

转发器的带宽必须足够大以保证一个时隙中的信号不会影响其它时隙中的信号。只要消息的波形适宜通过转发器而且不使指定给它们的时隙重叠时，则用户站可按照需要，以任何方式发送消息信息。注意到 TDM A 系统实际上不需要进行上行线路功率协调这一点是很重要的。只有在强发射机的频率调制的时间旁瓣对相邻信道的弱信号发生干扰的偶然情况下，功率的协调情况才对系统的性能产生影响。对于卫星通信系统中可能发射机功率不一样的情况来讲，希望这种时间旁瓣的影响能忽略不计。

在规定联接信道时，有两种主要选择办法。第一种是，是否所有的时隙都一样，这样每个中继线路中的用户必须调节它们的消息率到能适合联接信道，或者它们都不一样，而为每一个线路安排一个特定的数据率？利用不同规模的接收天线，并指定不同的时隙大小，就可能为中继线路安排一定的数据率。如果要想避免发射信号功率的损失，一般来讲，调节一个时隙的大小时，其它时隙的大小也要求调节。

第二种是选择时帧长度  $T$ ，在选择这个参数时可能有很大的自由，一种简单的工作方式就是将帧频选择得与卫星时钟重复频率相当，两种频率都与消息调制所要求的最高取样频率一样高。在这种方式中，每一个站在一帧中只给定一个时隙。为了进行实时语音传输，帧频可以等于通常的语音信号的取样率 8 千赫，也就是  $T = 125$  微秒。另一种工作方式是存储和



转发操作方式中。在这种方式中,将许多消息取样存储起来,然后以脉冲串方式一起发射出去。

因为在理论上,仅有的不能充分利用的时间都是由于相邻的时隙间的保护时间引起的,而且相对于时隙本身来讲可以将它做得很小,因此在理论上 T D M A 系统可提供最大的信道容量。然而, T D M A 系统要求例如语言这类模拟信号要以脉冲串或脉冲形式发送,而且这样就需要模拟数字转换。在大多数情况下,这种转换就要使效率降低,因此对于总的系统来讲,容忍其它多址联接技术的“低效率”,可能总效率还要高一些。而且,在某些情况下,具有很小天线的地面站还可能接收不到自己的发射信号和时钟信号,这将使 T D M A 系统无法工作。

### 恒定包络频谱展宽多址联接 (S S M A)

在 S S M A 系统中,每一个多址联接载频信号通常要占据整个转发器的带宽。一个联接信道就由一个具有独特的宽带相位或频率调制特性的载频波形所组成。宽带相位或频率编码用来将载频“按址送给”所需要的接收机。消息调制带宽比高频带宽要小,而且是作为附加的相位或频率变化加到此载频上。消息调制可采取模拟的频率或相位调制信号的形式,或采取诸如相位或频率偏移键控的数字式形式。多址联接调制可以是模拟的〔例如,线性调频信号(Chirp)〕或数字式的(例如频率音调跳变或快速相移键控)。编址的接收站利用相同的多址联接相位或频率编码将所需信号从转发器发送给用户站的复合信号中区分出来。

因为到目前为止大都考虑数字式技术,因此本文将叙述一个采用快速相移键控技术的例子[13]。另外,为了使讨论简化,将使用二相(180°)相移键控以合成一个恒定包络频谱展宽多址联接载频。此种讨论所叙述的大部分是关于“经典”的伪噪声信号技术,这对大多数读者来讲可能是较熟悉的[14]。为了方便起见,这种技术将以作用分部件的形式来加以叙述。

参见图 4 (A),此时先认为压控振荡器(VCO)的输入端短路,这样就产生了一个为某一合适中频,例如50兆赫的纯正弦波。这个VCO的输出与一个伪随机(二进制)键控流发生器相乘,此振荡器工作在为所需频谱展宽带宽一半的基频上。键控流振荡器的作用就是使VCO的输出相位按照键控流改变180°。

伪随机键控流振荡器可描述为一个方波振荡器,而将由正到负的规则变化过程改变为伪随机的变化过程。在一个给定线路中的发射机和接收机必须产生同样的键控流,而且必须与其它线路中所产生的不一样。这样,这个键控流发生器就完成了编址和展宽频谱的作用。

具有伪随机方波的VCO输出就经过外差升高为例如8千兆赫的高频,并辐射给卫星。利用具有预定的基带上部频率,例如为8千赫的消息信号去激励VCO,将消息信息加进去。

这种信号当其到达转发器输入端时,其数学描述式可用下式给出:

(A) 发射站

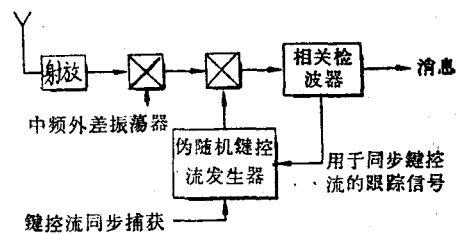
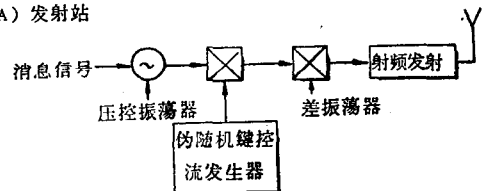


图 4 频谱展宽多址联接的发射和接收站的作用图 (A) 发射站 (B) 接收站

$$S(t) = \sqrt{2(P_t G)} \cos [w_c t + \phi(t) + m(t) + \psi]$$

式中:

$(P_t G)$  = 在转发器输入端的  $S(t)$  的平均功率

$w_c$  = 载频的中心角频率

$\phi(t)$  = 利用键控流振荡器去乘余弦波所得出的二进制相位编码

$m(t)$  = 携带消息的信号; 相位或频率积分

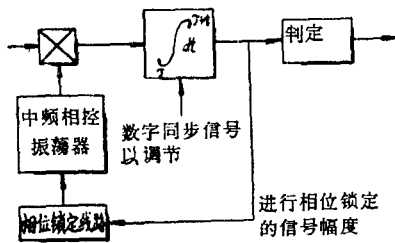
$\psi$  = 统计性的随机 (但在时间上是恒定的) 射频参考相位以及路径时延和发射机开机的相位

携带消息的相角  $m(t)$  可以是具有平常的相位或频率调制的, 也可以是具有相移键控的, 不管是那种情况,  $m(t)$  的带宽要比  $\phi(t)$  的小的多, 典型的为 8 千赫, 而  $\phi(t)$  的为 5 兆赫。

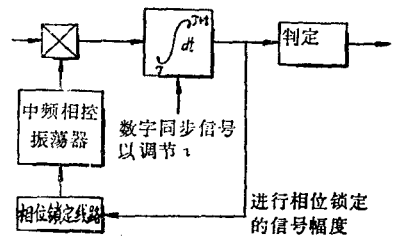
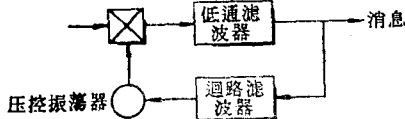
所有工作中的线路的信号都同时到达转发器的输入端, 并占据同样的带宽, 例如为 5 兆赫, 中心频率为 8 千兆赫。转发器将这些输入总合起来, 经过外差下降为中频, 并利用硬限幅中频放大器将其放大。中频放大器的输出再经过外差上升为射频, 例如 7 千兆赫, 在行波管中进行放大, 然后发射至地球。

地面接收站必须使用同样形式的相关接收机, 如图 4 (B) 所示。在经过射频放大并变换为接收机中频后, 由卫星接收到的复合信号再与一个伪随机方波信号发生器拍频, 此信号发生器的输出正好与所需信号发射机中的键控流一样 (这就要求发射机和接收机同步)。得出的信号用来去激励相关消息检波器。接收机就利用这种精确匹配的同样的所需的伪随机键控流, 从卫星幅射的复杂的复合信号中取出有用输出。

(A) 数字式消息检波器



(B) 模拟式消息检波器



模拟式消息检波器

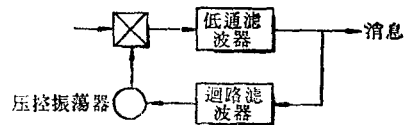


图 5 频谱展宽多址联接接收机的检波器 (A) 数字式消息波检器 (B) 模拟式消息检波器

接收机的检波器部分可采用两种形式, 这要根据是解调数字式或模拟式消息来定。对于数字式解调来讲, 检波器的作用如图 5 (A) 所示。中频利用与射频参考相位进行相位锁定而去掉, 这样得出的信号与消息的数字同步地进行积分, 积分线路的输出送给数字判定线路, 对于简单的二进制信号来讲, 它将是一个极性限幅器。注意接收机要利用接收到的消息数字中的信息来保持同步。示于图 5 (B) 中的模拟检波器是锁相环路形式的, 可以用来对相位或频率调制进行检波。也可能应用为一种压缩调频检波器。

由于接收机必须利用精确匹配的，与发射的键控流一样的键控流，因而在发送消息之前就存在着同步的问题。与发射的伪随机方波一样的接收机的伪随机方波必须与所需发射信号的接收在时间上很同步。而接收机在事前也不可能知道何时被呼叫，而且经过发射机—卫星—接收机线路的传播时延也不知道。这种情况就要求接收机有一个初始的同步寻找步骤，以便接收机的本身键控流发生器能与由发射机的键控流发生器所确定的接收相位编码相同步。线路的同步要求是采用伪噪声载频的SSMA系统中的严格要求的一个方面。如果使用5兆赫频谱展宽带宽，则接收机本身的键控流发生器必须与接收的信号的出现同步在0.2微秒以内。

测量利用相位编码频谱展宽技术的卫星通信系统性能的一个有用数量就是检出性 $d^2$ ，它可以解释为相关接收机输出端的信噪比。对于数字式消息来讲，检出性可以用来计算误差概率；对于模拟的相位或频率消息调制来讲，用信噪比表示的解调输出的性能质量可以用与调制制度和检出性有关的一个系数来表示（在阀限以上）。

频谱展宽相位编码技术的一个重要特点是，由于相关性的有益作用，接收机的输出表现出好象所需信号是埋在高斯噪声以内似的。这种效果甚至在信号受到硬限幅转发器的严重非线性作用时仍然还具有（限幅转发器的出现表现在检出性的计算中）。一个真接的效果就是，能以很好的近似程度来使用数字式信号隐在高斯噪声中的误差概率表示式，并且模拟消息调制的输出信噪比可以简单地计算为调制制度改进系数乘以检出性（在门限以上时）。例如，如果采用二进制消息信号制，则比特误码概率（假定为大概相同的发射消息比特数）给出为：

$$P_e = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_d^{\infty} e^{-x^2/2} dx$$

式中， $d^2 =$  检出性，另一方面，如果是采用调频时，则

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{输出}} = g_{FM} d^2$$

式中， $g_{FM}$  = 大调制制度调频和相位锁定或频率压缩接收机的调频改进系数

对于在白高斯噪声中的信号来讲，检出性由接收信号功率与消息带宽和噪声功率乘积之比的2倍给出（这个系数2是由于接收机为相干性的引起的）。如果转发器输入端不是由一个单个的强信号来支配，而且有足够的处理增益时，这个结果就适用。然后，检出性的表示式可按下述方式得出。

首先，假定用受平均功率限制的线性转发器代替硬限幅转发器，具有相同功率的M个信号加到转发器输入端，而且每个信号在整个带宽W上具有很平的频谱密度。这样，接收这些M信号之一的用户站的有用功率为 $P_r/M$ ， $P_r$ 是复合的转发器信号的功率。有效噪声功率密度由接收机噪声功率密度N<sub>0</sub>和由复合卫星信号中的其余的M-1个信号所产生的噪声功率密度之和来给出。由于这些信号均匀分布在转发器带宽W上，因此它们的合信号的功率密度为：

$$\left(\frac{M-1}{M}\right) \left(\frac{P_r}{W}\right),$$

或近似为 $P_r/W$ ，如果M是很大的话。

这样，对于一个理想的受平均功率限制的线性转发器来讲，由每一个用户站所接收的所需功率将为 $P_r/M$ ，而且有效噪声功率密度将是接收机的噪声密度N<sub>0</sub>。与卫星信号 $P_r/W$ 中的噪声密度之和。硬限幅转发器的作用就是要使在每一个用户站的有用信号功率按 $\pi/4$ 系数来减

少（1分贝），而噪声基本上没有变化。因此接收的信号功率为  $(\pi/4) (P_r/M)$ ，而噪声功率密度为  $N_0 + P_r/W$ 。对于  $M$  个等功率信号来讲，检出性可给出为

$$d^2 = \frac{2 \left( \frac{1}{b} \right) \frac{\pi}{4} \left( \frac{P_r}{M} \right)}{N_0 + P_r/W} = \frac{\pi}{2} \frac{P_r}{MbN_0} \left[ \frac{W/W_0}{1 + W/W_0} \right]$$

式中，

$P_r$  = 从转发器接收到的功率

$N_0$  = 用户站热噪声密度

$W_0 = P_r/N_0$

$W$  = 系统的带宽

$b$  = 消息的带宽

$M$  = 信号数目，所有均假定其在转发器输入端的功率相等。

假定工作在频谱展宽方式的所有地面站都达到同一个数值  $W_0 = P_r/N_0$ ，则上面的检出性表示式表明，要想使多址联接的容量为最大，对  $W$  的较好选择方法就是使它比  $W_0$  大一些。然而，太大的数值将要产生临界性改进，而且应记住键控流发生器同步要求的重要性，这种要求实际上为  $W$  的选择提出了上限。 $W$  值为  $W_0$  的 2 ~ 4 倍似乎是适当的。

利用恒定包络频谱展宽技术，以要求线路同步作为代价，可以得到某些所需要的特点。相位或频率编码既用来展宽多址联接载频的频谱，也用于自动地将发射载频按址送给所需要的接收机。通常，由于所使用的编码的长度，因此能有比卫星转发器所能承受的线路数目要大的多的独立不同的编址数目，相位编码还具有使实际的硬限幅转发器从信噪比的计算方面来看，与理想的受平均功率限制的线性转发器起相同的作用，但具有一个很重要的例外，这种特点的重要例外情况在卫星转发器输入端的一个信号对其余的输入信号占统治地位时出现。此时这种强信号就“占据”了此转发器，而使其余信号在转发器输入端的信号比之外又抑制了4倍。然而，这种占据现象是恒定包络信号的一个特性，而不是专对频谱展宽技术的；也就是说，FDMA也蒙受这种占据的损害，PAMA的性能也要由于占据作用而降低一些，但程度上略轻一些。

### 脉冲编址多址联接 (PAMA)

PAMA 技术有许多种而且不一样，能得出具有不同特性的许多系统。它是一种几乎能具有任何一个所需特性的技术。

脉冲编码载频波形就是在一特定频段内的脉冲系列。在给定的载频波形中，脉冲和脉冲间的间隔组成一定图形。每一个载频的占空系数很小，也就是说脉冲出现所占的时间比没有脉冲的时间要小的多。在这类系统的典型系统中，相同的图形用来携带消息的每一取样信号 [15]~[18]。

每一个波形可以用分隔时间频率平面为矩阵的方式来规定，如图 6 所示。时间轴区分为帧长度  $T$ ，每一个帧长度再区分为长为  $t_s$  的  $N$  个时隙。频谱区分为若干个带宽为  $B$  的频带。一个消息取样是在  $T$  秒内发送，最小的脉冲宽度是  $t_s$ ，因此  $B$  最少应等于脉冲的带宽。一个联接信道就规定了一个在时间和频率上的独特图形，而且其本身以一串数目字来规定，例如联接信道 2、0、03、0、1……3、4 就表示在图 6 上<sup>2</sup>。

注2：在某些技术中脉冲本身包含多址联接调制，因此一个联接信道是由一个以上的时间频率矩阵上的特定脉冲位置所组成。例如可能使用频谱展宽脉冲，这种技术现要加以讨论。

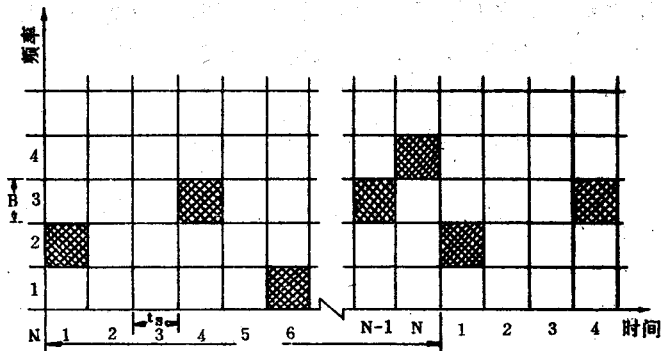


图 6、矩阵形式的时间频率空间，用交差线画出的方块就表示为联接信道 2、0、0、3、0、1……3、4

如果没有通信网定时作用，则时间刻度就不能精确地分为时隙和帧。因而一个联接信道就规定了在载频波形中的脉冲相对位置。例如，联接信道 2、0、0、3、0……3、4 就规定了一个载频波形，其中的一个脉冲在频带 2 中，然后在  $2t_s$  秒之后有一个脉冲在频带 3 中，再过  $t_s$  秒之后又有一个脉冲在频带 1 中，等等。注意，如果一个载频在每帧中重复一个图形时，则具有 2、0、0、3、0、1、……3、4 图形的波形就不能与具有 0、0、3、1、……3、4、2 图形的波形相区别，也不能与具有此基本图形的周期性偏移的图形的波形相区别。

消息信息可以各种方式来发送。利用脉位调制 (PPM)，图形 2、0、0、3、0、1、……3、4 可表示“传号”，而 4、2、0、0、3、1、……3 可表示“空号”。或者利用频移键控 (FSK)，图形 2、0、0、3、0、1、……3、4 表示“传号”，而图形 3、0、0、4、0、2、……4、5 可表示“空号”。将这种步骤加以引伸，则 PPM 或 FSK 都可用来传送多电平数字式数据或模拟数据。数字式信息也可以利用许多不同的图形之一去规定一个取样值，其中也包括对二进制数据的通断信号制。还有许多其它的消息调制形式。

虽然 PAMA 系统无通信网定时作用时也可以工作，但有定时作用时其工作性能要好一些。现在还来考虑规定波形图形问题，这可以按编码问题来处理。每一个规定了一个波形的序列就是一个代码字，而代码字集中在一起就构成编码。如果没有系统时钟，则由代码字 2、0、0、3、0、1、……3、4 所规定的波形就不能与由 0、0、3、1、……3、4、2 或此基本序列的周期性偏移的任何序列相区分。因此，如果此通信网不是同步的，则每一个波形可表示为  $N$  个代码字的任一个，其中包括 1 个基本的代码字和  $N-1$  个周期性偏移所形成的代码字。如果发射是相对于系统时钟来定时发送的，则每一个周期性偏移的代码字可以用来去规定一个不同的波形，这样指定的波形数目就增加了。而且，当发射是相对于系统时钟定时发送时，就可以只利用基本代码字周期性偏移所形成的代码字的一部分，来减少相互干扰<sup>[19][20]</sup>。

两个用户间的线路是以下述方式来建立的。每一个接收机都“调到”能响应于一个具有特别图形的波形上。当收到这个波形时，就以具有选作为回答图形的另一波形发射出去作为认可号信。这个回答波形是根据工作条例来选定的。例如，它可以是指定给被呼叫站的用作“回答”用的第二个波形，或是指定给呼叫用户的波形，呼叫用户可以在它的呼叫信号中认

出它自己来。

因为PAMA系统能使用户对之间的线路以通常的方式建立起来，因此它很有用。它能给出大量可以永久指定给单独用户的波形，因此这个波形可用作编址信号。在大多数脉冲编址系统中，发射机功率不一定要严格控制，而且发射也不一定要相对于系统时钟来定时发送。将接收机锁定在进入信号的步骤是很迅速的，而所需设备最少。因为它能提供最通常的联接方式，某些脉冲编址系统以随机联接分散地址系统（RADA）而闻名。本文倾向于固定编址系统，这是一种将载频波形永久指定给特定用户的系统。固定编址系统能为速速而简单地接入工作在全容量以下的通信网提供一种方式。然而，当此通信网过负荷时，则用户将不能自然地按照能使通信网工作性能最佳的步骤进行工作。需要有一个工作条例，以便在通信网接近全负荷时，能保证适当的工作。

PAMA系统具有如此之多的形式，因此很难列出适用于它们的优缺点来。不过它们共有的一个缺点就是数据率低。然而，一个PAMA系统可以设计成具有几乎任一个所需特点的系统，就是说，能在无定时作用下进行工作，无需上行线路功率协调即可工作，利用简便的地面设备即可工作，能抗人为的干扰和能使用小型地面站，等等。当在转发器输入端的噪声或干扰相当大时，则PAMA系统的数据率低的通性就要产生例外情况，这时具有短而高峯值功率的脉冲的载频则在对付上行线路噪声方面要比恒定包迹载频优越。

TDMA是脉冲技术中的一个特殊类型，其中的每一个时隙都专门指定给一个联接信道。这只能在有定时作用时才可能，因此它限制了在永久基础上指定联接信道的数量。在PAMA系统中，没有一个时隙是专门指定给一个单独的联接信道的。因为每一个波形都是一个唯一的脉冲图形，因此其波形是独特的。甚至一个波形的一些脉冲与其它波形的脉冲重叠时，接收机也能识别出此图形。这就允许PAMA系统能在无通信网定时作用时工作，而且大量的明确区分开的联接信道可以指定给用户，虽然这些信道并不能同时加以利用。

利用PAMA技术所得到的比较低的数据率是由于两个原因引起的：在传送给卫星的信号之间的干扰和时间频率平面中未利用的部分。而且，在这两个因素之间还可以加以折衷。能用作合适的例子的一种PAMA系统已由Reiffen加以分析过了<sup>[2]</sup>。在这种系统中，如图6中一样，时帧分成N个长为 $t_s$ 的时隙，频谱分为带宽为B的频带，在特殊情况下， $t_s=1/B$ ，而B为脉冲宽度；B要选择的比转发器总的带宽W要小的多。

转发器以恒定的功率电平来发射，这样每一个时隙就传送一固定的能量E。如果在时隙中没有从任何线路中来的脉冲出现时，则限幅器输入的就是热噪声，而输出功率就扩展在整个转发器带宽W上。在任何宽度为B的频带上的输出能量此时就等于 $EB/W$ 。如果在一个时隙中只有一个脉冲，并使限幅器饱和，则此时隙中的所有输出能量就限制在脉冲带宽B之内。接收机可根据测量在时隙中的脉冲宽度中所接收的能量大小来确定在一个时隙中是否出现了一个脉冲。

在此例中，所有脉冲都以同一个中心频率来发射的。要想传送二进制信息，每一个单个线路要指定两个波形，一个用来发送电码，另一个用来发送空閒码。由于所有信号都在同一个频带内发送，规定波形的代码字就是一个二进数序列，其中1表示有脉冲，而零则表示无脉冲。每一个波形由每帧几个脉冲组成，因此每一个所产生的序列就包含有n个1。每一个波形的占空系数是 $n/N$ 。

接收机是非相干的。它对指定给它的两个波形中的每一个中的第一个出现有脉冲的时隙中的能量进行比较，并确定脉冲出现在具有较大能量的一个时隙中。它重复此操作n次，每

一个时隙进行一次，并根据能量大小来确定发送的是电码还是空码。由于所有发射机都以同一频带来发送脉冲，因此不管是由那一个发射机发送的，在一个特定的时隙中的脉冲看起来都一样。因此，其它发射机对一个给定的接收机的工作的干扰可假定为仅使其产生误脉冲（这个假定，由于在同一频带内的重叠脉冲将要产生交扰调制噪声，这将减少信号频带中的功率，因而并不完全适用）。

当一个用户发射机以占空系数为 1 即  $n/N = 1$  来发射时，则能得到最高的通信网数据率（具有适当的消息调制形式时）。然而，要想进行多址联接时，每一个载频波形的占空系数必须小，也即是  $n/N \ll 1$ 。如果在一给定时间内只有一个用户进行发射，而且  $n/N \ll 1$ ，则总的通信网数据率就是它的数据率，并限制为  $n/N$  去乘如果它是以占空系数为 1 来发射时可能具有的数据率。首先，如果附加的发射机也工作，即使每一个中继线路的容量由于脉冲之间的互扰而减少时，其对通信网数据率的上限也要增加；但是随着更多的发射机都工作时，用户之间的干扰就增加而达到某一点，此时附加的用户将要减少可能达到的通信网数据率。因此，通信网数据率的上限对每一个时隙至少有一个脉冲出现的概率的曲线就与图 7 所示曲线相似。应注意，这是假定每一个载频保持一个固定的占空系数  $n/N$ ，而且使时隙更充满一些的唯一办法就是增加工作的用户的数目。

$n$  = 每帧每载波中的脉冲数

$N$  = 每帧时隙数

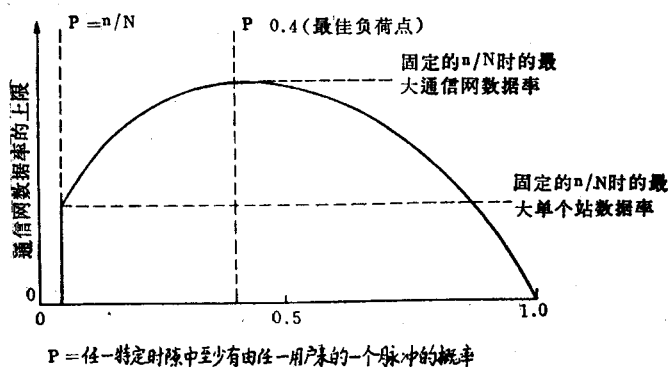


图 7 总通信网数据率上限对任何一个时隙至少含有一个从任一用户来的脉冲的概率的曲线（对所叙述的这一特定 P A M A 系统假定了一个固定的  $n/N$ ）。

描绘通信网数据率的上限对每一个时间频率矩阵单元出现有脉冲的概率的曲线，也可以为其它的 P A M A 系统得出类似的曲线。在每一情况下，都有一个负荷点，它能得出在固定的  $n/N$  时的最大数据率。如果超过了此负荷点，则干扰就太大；如果不到此点，则转发器的功率就不能充分利用。

根据假定  $n/N \ll 1$ ，就存在一个  $n/N$  值，它能对一特定的误码率，在一最佳负荷点上，使通信网数据率为最大。然而，在此点的通信网数据率对  $n/N$  的变化并不很灵敏，而且  $(n/N)_{最佳} \approx 1 / (2M - 1)$ ， $M$  是工作的发射机的数目（参见 Cahn[2]）。对所叙述的系统来讲，在此点的最大通信网数据率比一单个发射机若以占空系数为 1 的载频发送二进制数据时可能达到的数据率要低 15 分贝。因此，在最好的情况下，此例举的具有  $n/N \ll 1$  的系统只能以单个发射机工作在占空系数为 1（或者假定保护时间可忽略不计的 T A M A）可能达到的数据

率的百分之三来发射。

这个分析假定脉冲是均匀分布在时隙中的，也就是每个时隙出现脉冲的概率是相同的。如果每一线路在每一相继的帧中都使用同一个图形，以致产生重复性误码时，则此假定可能不适用，而且要加修正。这种分析又假定没有短语的部分重叠（短语重叠如果没有通信网定时作用时将要出现，并使性能降低不超过3分贝）。而且，在最佳负荷点，每一脉冲位置的误码概率较高（大约为25%）。如果要想得到最大数据率而又有适当的低误码率时，则地面站要求有编码设备。

所叙述的系统只要求有简单的发射和接收设备，能在无通信网定时作用情况下工作，而且因为重叠信号不会彼此抑制，因而不需要上行线路功率的控制。因此这种系统可能应用在将来可能的用户比较多，但在任一时间内实际工作的用户比较少，而且数据源的数据率低（电传机）的通信网中。对于这种通信网，通常的联接方式很重要，除去任何实际运用价值以外，这种系统因为能用作信号间干扰研究的简单而合理的模型，因而能起到分析的作用。

其它可能的PAMA系统可以认为是由这种基本系统加以改进得出的。一种改进型可对每一中继线路只指定一个波形，而消息信息是由信号的中心频率来传送的。所有地面站都以一个频带发送电码，而以另一个频带发送空码。因为在时间上重叠的脉冲可能彼此产生破坏性干扰，因此重叠脉冲之间的干扰就不再能很容易地加以明确规定。由于这种系统使用了比第一个系统要更多的时间频率矩阵单元，因此在最佳负荷点上，有更多的时隙几乎被充满。因此，这种系统的最大数据率似乎要比第一种系统的要高一些。

这个第二种系统还可以使不同的线路采用不同的中心频率再稍微改进一点。另一种型式可以具有如图6所示的在不同的频带中的脉冲所组成的波形。与前述例子不一样，这种系统能通过频率的滤波作用和时间选通作用，将不需要的信号抑制掉。时间上重叠脉冲之间的干扰，在这种系统中比起前两个系统来就更难于做成模型。因为在最佳负荷点上，它可能有更多的时隙被充满，因此可能要比第一个例子具有略微较高的最大数据率。它可能由于交叉调制噪声和上行线路功率不够协调要受些影响，而且可能需要更加复杂一些的设备。

对信号结构为非相干的PAMA系统所举的任何例子可以认为也适用于相干的系统。然而，要保持由频率跳动的脉冲组成的图形上相干可能是实际上不容易达到的。相干接收机可能使数据率比具有同样的信噪比的非相干接收机的要增大6分贝。

相干检波还可能构成另外的系统型式，即采用占空系数小于1的相位编码信号的脉冲频谱展宽系统<sup>[21]</sup>（有一些完全不同的脉冲频谱展宽系统。其中之一是，对每一个脉冲重复进行同一个相位反转图形，而每一个脉冲就携带一个消息取样。另外一种，是对一个带有长的，并且基本上是非重复性的反转相位图形的脉冲编码频谱展宽信号进行时间选通。同样地，也可以使用线性调频信号）。时间选通的，相位编码的频谱展宽系统可能具有任一PAMA系统中的最高的最大数据率，这是因为它是相干的，并使用频谱展宽信号以减少重叠脉冲的干扰所造成的。

然而，当考虑采用脉冲频谱展宽系统时，其所要求的设备可能比恒定包迹频谱展宽系统的还要复杂的多。考虑采用通断选通频谱展宽信号的动机是由限幅器的抑制作用引起的。与恒定包迹系统有关的一个问题是，各种信号的上行线路功率的不平衡可能达到使几个强信号将所有下行线路功率都夺去的极端情况。这可以利用占空系数小于1的信号来克服。

然而，在出现上行线路功率不相同，脉冲式信号不一定总是优越。现考虑出现有其上行线路功率比所有其它用户的混合功率稍微低一些的强信号情况，对恒定包迹信号来讲，此信号不会占据限幅器。如果是使用脉冲式信号时，这个强信号当其出现时，将要具有比所有其它



用户的混合功率要少一些,因而有时要占据限幅器。另一方面,如果一个信号的上行线路功率大到即便所有其它信号都出现时,也要占据限幅器时,则脉冲式信号就具有优越性了。使用脉冲式信号,有时此强信号不出现,而在这些时间内出现的其它信号就不会受到抑制。

PAMA技术看来最适用于由要求数据率比较低的小型用户站组成的通信网。尤其好的是,这些站的每一个只需要在很分散的一段时间内发送短消息。因此,PAMA技术特别在下述的通信网中很有用,这个通信网由具有有限的发射功率的或能有限地协调其发射功率的,以及不可能达到TDMA所要求的通信网同步的那样一些站所组成。

### 设计考虑

宽带限幅转发器允许调制系统有很大的选择余地以适应多址联接的需要。4种调制技术类型的每一个的特性、优点和缺点都列在表1中。很明显,一种类型不可能适用于所有各方面的应用中,而且在每一类型中,在选择系统时还有许多可供选择的型式。另外,还有一种本文没有讨论的可能情况,但可能是不重要的,就是在采用一种调制技术,例如TDMA系统的用户通信网与使用不同的调制技术的,例如SSMA系统的用户网之间共用转发器的问题。

本文的以下部分将要讨论三个设计方面的问题:转发器的带宽和功率分配、通信网定时作用和工作条例。

表1 多址联接技术的特性、优点和缺点综合表

	特 性	优 点	缺 点
FDMA	信号具有恒定包迹而且频谱限定在组成联接信道的不重叠的频带上(在转发器输入端)。多址调制是利用滤波器将频率调谐到所选定的频带上来完成的。可能需要压缩技术以战胜由硬限幅所产生的交扰调制噪声。消息信息可以利用任何形式的相角调调来传送。	比其它技术能更充分地利用现有技术和设备。不需要通信网定时作用,而且转发器的负荷情况可用比较简单的步骤来确定。	一段时间内出现在转发器的信号多于1个时将产生降低转发器有用输出功率的交扰调制噪声。由于转发器带宽内的不同部分的不同功率频谱密度所引起的问题可能使它很难与各个用户站的不同接收灵敏度一起工作。要求进行上行线路功率协调,以便充分利用转发器的容量。
TDMA	载频进行通断选通,使得由不同线路来的信号在任何时刻都不会同时出现在转发器,而是按顺序通过它。多址调制由时间选通来完成。消息信息由每一载频脉冲串中的任何形式的相角调制来传送。	这种技术避免了同时通过转发器的信号之间的相互干扰。理论上,对于给定的卫星功率,由于没有交扰调制噪声,可以得到最大的容量,具有不同的接收灵敏度或不同的发射功率的用户站要比使用恒定包迹载频时更好处理。上行线路功率不需要协调,而且每一个用户站可以使用可能的最大峰值功率以消除上行线路中的干扰,而不会因此降低其它线路的性能。	要求有通信网定时作用。模拟消息信息经常要变为数字形式。