

ITU-R F.2061报告

高频固定无线电通信系统

(2006年)

1 引言

高频系统的发射可分为自适应和非自适应两种。非自适应系统依赖于操作员的培训和技能水平来评估传播变量和干扰，以寻找一个干净、可靠的信道。自适应系统将这一过程自动化。尽管自适应系统有许多优势，包括降低对操作员的培训在内，非自适应系统仍将在可预见的将来继续运行下去。在这两种系统间存在着潜在干扰的可能。在给定的环境中进行精确的自适应和非自适应系统发射特性的电磁兼容分析，需要独立的特性数据。

高频频段的现代通信系统也具有特定的属性，使得其成为满足许多应急响应要求的可行解决方案。高频系统和网络为从事公众保护和人道主义工作的众多用户提供了一种高度灵活通用的方法。这样的系统也可为偏远和人口稀少的地区提供便宜且可靠的设备。

在由于自然灾害（如地震）和其它紧急情况造成常规电信运营中断的情况下，可在很短的时间内建立中频/高频系统，以在预警的第一阶段或救灾工作的协调中提供需要的应急链路。

2 非自适应系统

2.1 引言

在非自适应人工操作程序中，操作员必须通过监测电离层的状况、跟踪变化的传播条件以及选择允许信号得以最佳传播的操作条件（主要是频率）等方法调整系统的参数，以获得最佳性能。

高频传播环境在短期内有着很大的变动和不可预测性。该频段的传播主要是天波模式，利用电离层对无线电波的折射。在某些情况下，也通过表面波模式。

2.2 传播

ITU-R《电离层及其对无线电波传播的影响》手册以及ITU-R P-系列建议书（ITU-R P.368、ITU-R P.369、ITU-R P.371、ITU-R P.434、ITU-R P.531、ITU-R P.532、ITU-R P.533、ITU-R P.534、ITU-R P.535）等描述了电离层及通过其进行的电波传播。也可在ITU-R《高频广播系统设计》和《中频/高频（MF/HF）频率自适应通信系统和网络》手册中找到一些额外的信息。

简而言之，电离层在地球大气上层约80公里的高度，受太阳电离辐射的影响而形成。电离的高度和密度取决于所受的辐射、大气的组成要素及其随高度产生的变化、地球磁

场、大气层上层的流动等因素。来自太阳的辐射通常随太阳活动周期的变化而变化，从诸如太阳表面黑子数量的变化等方法可以看出该周期大约为11年。

来自太阳的辐射将大气上层的气体电离，由此释放的自由电子形成了电离层，可以折射或反射无线电波。在电离层的下端，自由电子重新组合前生命有限，电离密度大概随着太阳的仰角而变化。这些电离层的下端称为D和E区或D和E层。在电离层更高的F区，电子的生命更长，电离密度也受到风和地球磁场存在的强烈影响。

可从电离层垂直发射的最大频率取决于电离密度，称为关键频率。电离密度，也包括关键频率取决于地理位置和太阳角。由于太阳辐射、太阳-地球环境、大气上层的风和地球磁场的变化，每小时、每天、每个季节的电离密度和关键频率都是变化的。电离层的下端也同样衰减无线电信号，而且与地球磁场的相互作用也改变了信号极化。

陆地传播可看作是来自电离层的间接入射反射，额外的传播模型可能有多个来自电离层和地表的多重反射。每一种模式的传播频率取决于关键频率和发射层的仰角。因而，通常接收到的信号包括几种模式，每种附有不同的、变化的到达时间和极化。

这些传播条件中每个小时的、每天的、每个季节的、每个太阳活动周期的长期变化在统计基础上是可预测的。采用ITU-R P.533建议书或其它许多方法，可以获得预测的方法。

这些长期的预测方法不能对一个特定的电波路径上，在特定日期和时间的最佳频率进行精确预测。传统惯例是采用一个比预测的最大可用频率(MUF)低些的频率，以便确保在一个月的大部分天数中可以收到满意的信号。将为各月的每天规划频率变化安排，以维持可用通信。负责电路的无线电操作员将采用这些安排，结合其经验和当天的实际情况，从有限的可用频率中选择最佳频率，并在每分钟的基础上管理电路操作。

长期预测也提供了有关活跃传播模式与天线辐射所需仰角方面的信息。

地波传播模式稳定且可预测。ITU-R P.368建议书对此进行了描述，且[ITU-R网站上的软件](#)提供了一种预测方法。在高频频段，这种模式只有在海上几百公里和陆地上更短的距离时，在频率范围的低端才较为明显。尽管如此，在适当的境况下，这种模式可能较为重要。

电路操作受限于这些传播模式、长期电离变化、密度和极化衰减。但是，也有其它重要的短期和很大程度上不可预测的因素。

在电离层的下端，即100公里处，可能发生额外的电离，但由于气象因素和微量元素以及高纬度和赤道纬度的其它机制，无法充分预测。“偶发E层”电离可对电波传播有着重要影响，可提供一种额外的传播模式。

太阳表面的爆发，即通常所见到的太阳耀斑，对入射的辐射也有着重要的影响。太阳耀斑释放出的紫外线和X射线、高能粒子和中等能量粒子的等离子体可能在太阳风中传播，透过日地环境到达地球。当这些辐射到达地球附近后，直接产生了额外的电离。它们也与地球的磁场相作用，将电离沉降至两级地区，改变上大气层中性气体的温度，改变风系和电离的分布。这些事件被描述为地磁和电离风暴，可对高频传播产生重大影响。对之无法提前较长时间预测，其效应甚至无法提前数个小时进行精确预测。经验丰富的操作员可能可以在风暴期间进行不间断的操作，但由于对这些事件的经验有限，他只能在尝试和可能出现差错的基础上开展工作。在风暴效应明显的高纬度地区，较为有用的一个方法是路径分集，即采用备选的电波路径来回避最受干扰的地区，但这需要网络层面的快速可用信息。

如今需要通过带宽更大的系统的现代高频通信来传输日益增加的数据速率。这些系统的性能将取决于当时主动传播模式的多径时延扩展，这些主动传播模式起因于各种层的传播。由于大气风的存在，电离也在移动，这样每个模式由于多普勒效应，将存在不同的频移。在赤道纬度，靠近地磁赤道的地方，电离层可能在日落后分裂为一个扩散区，由此信号被大的时间和频率扩展分离。在高纬度，电离层可能因电离风暴而分裂，导致信号被大的时间和频率扩展分离。

对于那些采用了地波传播且不需要通过电离层进行远距离通信的系统，选择频率应利用传播条件，限制无用传播。达到此目标的方法有：在白昼时间，在可用传播模式最低可用频率（LUF）以下选择频率；在夜晚，对于长路径，为使用的天线选择MUF以上的频率。应注意LUF独立于太阳活动周期，随着太阳活动周期指数的升高而增加。在热带地区的夜晚采用MUF以上的频率时，应谨慎注意，因为可能会刺激产生长距离“弦传播”或“跨赤道传播”。发射机或接收机应具备整个自适应操作频率范围内的宽带或快速调谐功能。

3 自适应系统

3.1 引言

中频/高频自适应系统指能自动（即无需无线电操作员干预）以灵活应变并适应中频/高频频段在电离层中传播所固有的易受干扰的方式，执行建立无线通信链路并交换信息的功能。此外，自适应系统可以定期监测频谱占用情况，并能比其它在用的许多非自适应系统更有效地选择工作频率，以避免对其它用户产生干扰。

3.2 操作特性

中频和高频自适应系统的特征是：

- 减少操作培训：自适应系统无需操作员介入即可建立、维持和切断中频和高频链路。由此，消除了必须采用受过培训的无线电操作人员的必要性。
- 提高了可靠性：自适应系统提供高质量业务的时间百分比远高于传统的固定频率系统。通过采用自适应频率选择、自动重复请求(ARQ)和自适应选择最适合的调制波形。
- 灵活性：自适应系统持续地分析和更新链路质量评估信息，从而可以为每一个特定的时刻选择最合适的业务频率和调制方式。这种自适应方式将台站无法通信的时段减至最小，并增加了固定和移动业务中降低功率的机会。

几十年来，中频和高频无线电一直用于长距离通信。通过采用自动和自适应技术，中频和高频无线电的许多有益特性可以进一步改进，其不足也可以最小化。高频频段通信的有益属性包括具备成本效益的远距离传输。其不足之处在于操作劳动强度大、传播变化多、整体可靠性一般且数据带宽有限。高频频段内的通信要求各种条件最优化，才能使得其可靠性达到合理的水平。高频无线传输的可靠性取决于以下的多个因素：

- 工作频率；
 - a) 电离层电离的程度和分布；
 - b) 台站间的距离（跳数）
- 操作功率；
- 调制方式；
- 信噪比要求；
- 信令开销程序（即误码检查、信号交换等）。

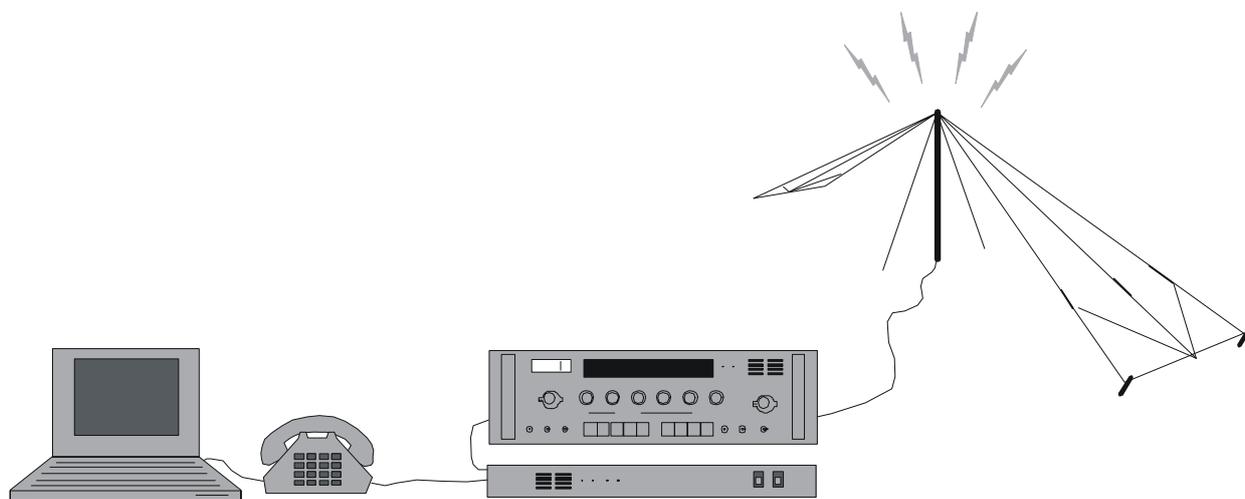
在手动操作程序中，操作员必须通过监测电离层的情况，跟踪各种可变的传播条件，选择可让信号得到最佳传播的操作条件（主要是频率）调整系统的参数，来获得最佳性能。该方法直到近年一直在使用，以求优化高频无线电通信。鉴于其所需的大量劳动、经验和技能，高频和中频无线电很容易成为实现自动化和采用自适应技术的改造对象。现今的自动化技术通过增加频率管理、链路建立、链路维持等子系统，降低了操作员的负担。这些技术可以用来降低对技能和无线电操作员或通讯员值班的要求。典型地，增加自动化的功能可以使得无线电设备看起来像是“在最佳的信道上一键即通”，而实际上，无线电设备是可以同时执行多个后台功能的多信道通信设备。

3.2.1 一般描述

以下描述了内置于已开发的绝大多数类型系统内的一系列常见功能。此处的“常见”并不意味着这些功能都能以同样的方式实现，因而可以实现互联通信。它仅表示实现了同种类型的功能。更详细的说明可查阅ITU-R F.1110建议书“30 MHz左右以下频率的自适应无线系统”。

自适应台站，此处定义为能够向操作者提供由以下要素构成的无线电路。

图 1
典型的自适应台站



Rap 2061-01

自适应系统中控制单元的主要作用是频率管理和链路质量评估、准备和建立链路、维持和切断链路。

3.2.2 频率管理和链路质量评估

潜在地可用于一个特定链路的所有频率存储于系统的“频率池”中。有些自适应系统的接收机和发射机频率不同，其它的系统接收和发射则可能使用相同的频率。一些自适应系统采用集群方式，即一个子集的可用频率存储于池中，用于呼叫，而其余的频率则仅用于业务；通过使用呼叫频率来协调链路业务频率的选择。一般而言，在一个“频率池”中存储5-10个频率，但部分自适应系统可存储并使用多达数百个频率。

如未传输业务，台站将扫描池中的频率，在每一个频率上驻留一个足够长的时间，以确保能检测到一个来电。一些系统将通过测量每个频率上的干扰或噪声水平来同时进行被动信道分析。

在链路切断之后收集链路质量评估的信息。该信息用于选择网络中台站之间适当的业务频率。如果网络中的业务量很少，则可能启动自动探测功能，以提供链路质量的评估。一个台站将定期地在频率池的每一个频率上进行特别的探测发射。网络中其它探测到该探测发射的台站将更新其链路质量评估表。

3.2.3 探测

探测信号是在未占用频道上定期进行的单方单向传输。为执行该功能，在控制器上增加一个计时器，以定期启动探测信号（如果信道是空的）。探测并不像轮询那样是一个交互的双向技术。但是，通过听到其探测信号来确定来自一个台站的连接意味着双向连接的很大可能（并不能保证），也可在接收机端被动地进行。至少，向操作员显示信号（地址）信息，而且对于配有连接和链路质量分析（LQA）存储器的台站，该信息被存储并用于以后的连接。如果一个台站最近在将要探测的信道上已有发射，从这些发射开始，直至下一次探测时间间隔，就不一定需要在这些信道进行探测。此外，如果已对一个网络（组）的台站进行了轮询，它们的回应当于其它网络（或组）的接收台站来说，也可以作为探测信号。所有台站都可以在事先安排的空信道上进行定期探测。探测功能可以选择性地激活，探测之间的间隔也可由操作员或控制器根据系统要求进行调整。

在可用时，除非操作员或控制器另有安排或指示，各台站自动临时性地显示所有听到台站的地址以及可选择操作员的警告。

探测的结构与基本呼叫类似；但是，其仅需要发送发射台站的识别。第二代（2G）和第三代（3G）自动链路建立（ALE）系统中异步模式的探测采用了扩展的发射确保扫描的接收机在发射期间将至少在活动信道上驻留一次。在同步模式3G ALE系统中，探测是可选项；当需要时，同步3G ALE探测发射的持续时间少于1秒。

3.2.4 链路准备和建立

通过普通的电话、数据网络或操作员终端启动一条链路。当命令一个台站建立链路时，它将选择频率池中被认为是最合适的频率。接收机被调到该频率上，控制单元将测量该频率上的射频能级。如果能级超过一定的门限，则认为该频率已被另一个用户占用并拒绝其请求。控制器将测试第二个频率。如果不能发现一个可用频率，将给操作员发送一个“失败”的状态报告。否则，将启动一个呼叫。

当一个被呼叫台站检测到呼叫时，它将自动回复并向操作员报告该呼叫。呼叫台站确认其收到了回复，然后就可以传送讯息；后者也可将链路转交给操作员，开始音频操作。

3.2.4.1 2G ALE系统

关于多个台站和在多基站网络中选择一个最佳频率，通常系统为到一个移动节点的每一个链路选择最佳频率/基站组合。有两种方法：呼叫方选择或回复方选择。

在第一种情况下，如果移动节点启动了呼叫，它将查询其本地测量数据库，将信道/台站组合分为不同等级。然后按照该等级由高到低的顺序，在特定频率的特定台站上进行呼叫，直至呼叫成功。当呼叫来自于固定方时，采用一个统一的数据库，通过基站，以最佳频率将呼叫路由至移动方。

在第二种情况下，移动方将其呼叫作为一个整体发送给网络，基站比较接收到的信号质量，以决定谁来回复。

在点对点操作中，无法选择呼叫哪一个台站，频率也只是简单地按照连接尝试的顺序进行分类。

并不能保证每次都采用了最佳频率。采用最近的测量结果来设定尝试信道的顺序，但现有的传播、占用和干扰决定了实际要采用的信道。系统尝试在最佳频率上进行连接，但接受第一个可以工作的频率。

关于2G ALE在发射前收听信道接入效率，鉴于2G ALE网络已经过载，其吞吐量在饱和值之后变得平缓，而载荷增加后吞吐量下降。

各系统采用各种算法来为发起呼叫的信道排列等级。通常选择一个好信道，但一个好信道并不一定是最佳信道。

3.2.4.2 3G ALE系统

3G ALE被设计用来满足大业务量，在有效利用频谱方面是2G ALE的改进。它采用呼叫和业务信道分离的同步时隙信道接入协议。独立的业务信道可采用接近100%容量的吞吐量，而呼叫信道的使用随应用的不同而变化。但通常低于业务信道。在蜂窝和集群无线电业务中，与业务信道相比，需要更少的呼叫建立信道。集群模式与呼叫和业务混合在同一个频率上相比，效率更高。

关于3G ALE中的最佳信道选择问题，在同步扫描集中第一个可以工作的呼叫信道完成呼叫的设置。然后业务在由呼叫设置参与方商定的频率上继续，其频段不一定与呼叫设置信道的频段相同。在业务传送过程中，3G ALE链路维护可以定期重新评估并改变频率，以维持足够的性能。

3.2.4.3 扫描速率

3.2.4.3.1 2G ALE系统

典型的扫描速率在每秒2-10个信道之间（驻留时间为每个信道100-500毫秒）。也有可能实现更高的扫描速率。探测2G ALE信令的接收机在试图与输入信号同步时，将扩展驻留时间至每个信道784毫秒。

3.2.4.3.2 3G ALE系统

集群是3G ALE系统的一个附加功能。当未参与任何2G ALE或3G ALE协议时，3G ALE系统持续扫描指配的呼叫信道，收听2G ALE和3G ALE呼叫。当被呼叫或发起呼叫时，这些系统退出扫描状态。

3G-ALE同步模式接收机以每信道1.35或5.4秒的同步速率扫描。台站也可能由网络管理员指配给驻留组。每一个驻留组在每个驻留期间，根据以下公式收听一个不同的信道：

$$D = ((T / 5.4) + G) \bmod C$$

其中：

- D: 驻留信道号码
- T: 自午夜起的秒数（网络时间）
- G: 驻留组号码
- C: 扫描列表中的信道号码

注意：由此产生的信道号码在0至C-1之间。

采用同步模式3G ALE的3G ALE系统以至少每秒1.5个信道的速率扫描指定的呼叫信道。对于每秒10个信道的扫描速率，当评估收到信号需要时，对应的100毫秒驻留时间可扩展至667毫秒。如果在667毫秒内未能探测到3G ALE的突发前导（burst preamble），系统可以重新扫描。3G ALE系统包含了保持网络中所有台站同步的机制。当3G ALE工作在同步模式时，台站之间最早时间和最晚时间之间的差别不能超过50毫秒。在非同步网络中，网络时间的允许范围由现有的链路保护水平（如果有的话）决定。

提供了一个外部同步方法，以从全球定位系统（GPS）和GLONAS接收机等来源设定本地时间。内部时基与外部来源之间的差别在这样的时间更新之后不得超过1毫秒。时基漂移通常不超过百万分之一。

当没有外部同步源时，3G ALE系统可以采用空中同步管理协议保持同步。

在3G-ALE中，探测通常是不必要的。关于传播信道的信息可用于同步网络，延迟呼叫开始以降低呼叫信道的占用率。但是，除非将非传播信道从扫描列表中移除，由于同步扫描，传播信道的信息对连接延迟的影响微乎其微。当同步网络包含多个“服务器”台站，为“客户”台站呼入服务器池（server pool）提供地理多样性时，服务器应进行探测，以在客户台站端提供用于选择最佳呼叫服务器的传播测量数据库。同步探测包含一个单个的通知协议数据单元（PDU）。在异步3G-ALE网络中，如果传播数据通过其它方式无法获得，采用探测的方法也可能是必要的。

3.2.5 链路维持和切断

如果链路处于控制器单元的控制下，如传送文字或数据信息时，它可能根据链路条件的变化而作出相应的反应。如果链路质量下降了，可能会自动启用新的频率。

操作员或控制器单元都可以切断链路。控制器单元然后会发出适当的指令，确保双方的台站会以恰当的方式切断连接。随后台站会继续扫描频率池中的频率。

3.3 波形特性

3.3.1 2G ALE波形

3.3.1.1 介绍

2G ALE波形被设计用来通过标准SSB无线电设备的音频通带。该波形为多个目标准备了稳健的低速数字调制解调器能力，以包括选择性呼叫和数据传输。该节定义了波形的音调、其含义、定时和速率以及其准确性。

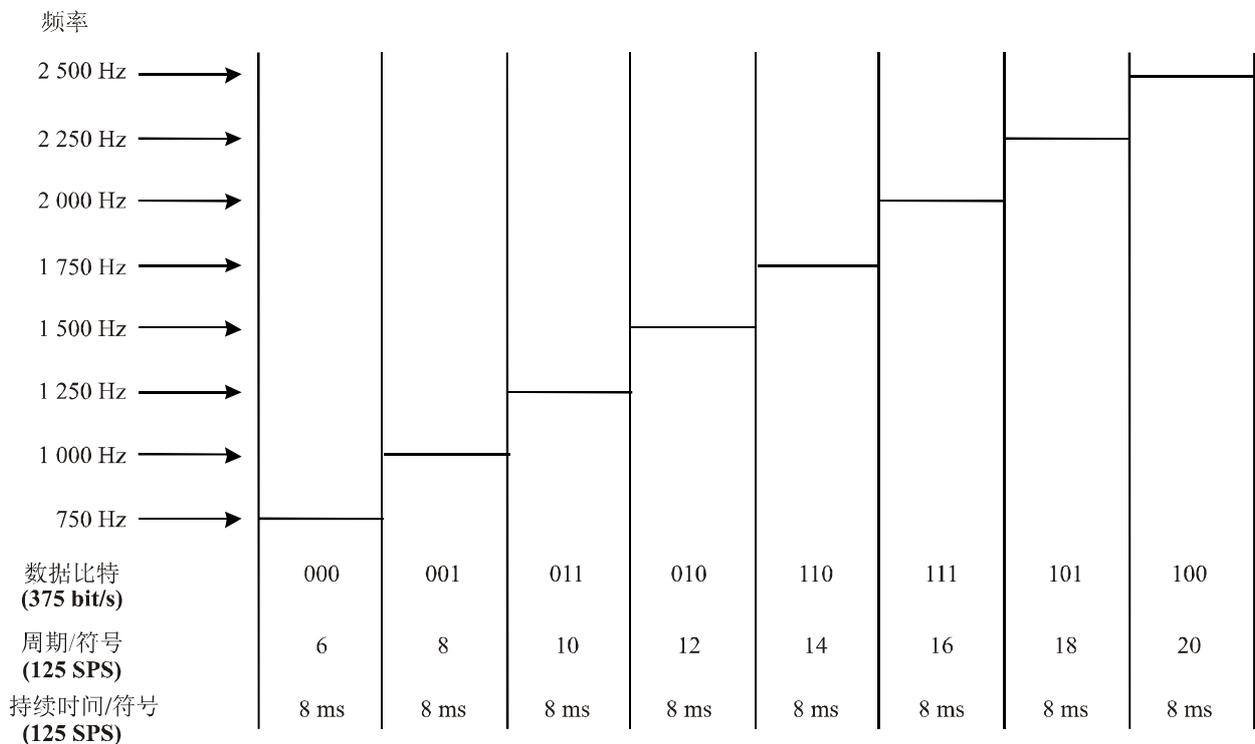
3.3.1.2 音调

通常音调是一种频移键控（FSK）调制，一次带有八个正交音调和一个音调（或符号）。每一个音调表示如下的三个比特数据：（右侧为最低有效位（LSB））：

750 Hz	000
1000 Hz	001
1 250 Hz	011
1 500 Hz	010
1 750 Hz	110
2 000 Hz	111
2 250 Hz	101
d2 500 Hz	100

图2描述了在通带八个FSK音调的安排、其以秒和周期表示的持续时间以及用于ALE信令的比特安排。应注意到安排了比特指配，以便一个音调的解调误差只产生一个比特误差。

图 2
2G ALE 的8进制FSK调制



注 - 符号传输应为连续相位。

3.3.1.3 2G ALE字

2G ALE传输的基本单位为ALE字。每个ALE字包括24比特的协议数据，该数据通常包含一个3比特的先导（定义ALE字的类型）以及21比特的呼叫标志或其它ALE操作数据。对每一个ALE字实行前向纠错（FEC）编码（包括1/2格雷(Golay)编码和三重冗余），以增加其稳健性。每一个编码的ALE字的空中传输时间为392毫秒。最短的2G ALE传输包含三个字；该短传输在2G ALE握手中很常见。用于启动链路建立的更长传输包含一个10秒左右的扫描呼叫阶段。最长的、可能的2G ALE传输（很少采用）可持续20分钟。

3.3.1.4 2G ALE数据波形

目前采用了一系列的数据调制来通过高频信道传送数据，包括并行音调（OFDM）和串行音调（PSK和QAM）调制在内。对于标称3 kHz信道内的操作，采用得最多的还是串行音调调制。

3.3.2 3G ALE波形套件

对于综合的3G ALE协议，采用一套可称的突发波形：ALE（也称为链路建立或LSU）、业务管理（TM）、自动链路维持（ALM）、低延迟数据链路（LDL）和高吞吐量数据链路（HDL）。

3.3.2.1 调制

3G ALE波形采用移相键控调制的短脉冲群。该短脉冲群的变化也用于3G ALE链路管理和数据传输。3G ALE波形家族的特性如下表所述。

表 1

典型3G波形的特性示例

波形	用于	突发持续时间	有效载荷	前向纠错编码	交织	数据格式	有效码速率 ⁽¹⁾
BW0	3G-ALE PDU	613.33 毫秒 1 472 PSK 符号	26 比特	速率 1/2, $k = 7$ 卷积(无刷新 比特)	4×13 块	16进制 正交 沃尔什函数	1/96
BW1	业务管理 PDU; HDL 收悉PDU	1.30667 s 3 136 PSK 符号	48 比特	速率 1/3, $k = 9$ 卷积(无刷新 比特)	16×9 块	16进制正交 沃尔什函数	1/144
BW2	HDL 业务 数据PDU	640 + ($n \times 400$) 毫秒 1 536 + ($n \times 960$) PSK 符号, $n = 3, 6, 12,$ 或 24	$n \times 1881$ 比特	速率 1/4, $k = 8$ 卷积 (7 刷新比特)	无	32 未知/ 16 已知	可变: 1/1 到 1/4

表 1(完)

波形	用于	突发持续时间	有效载荷	前向纠错编码	交织	数据格式	有效码速率 ⁽¹⁾
BW3	LDL业务数据PDU	373.33 + ($n \times 13.33$) 毫秒 32n + 896 PSK 符号, $n = 32 \times m$, $m = 1, 2, \dots, 16$	$8n + 25$ 比特	速率 $1/2$, $k = 7$ 卷积 (7 刷新比特) ⁽²⁾	卷积块	16进制正交 沃尔什函数	可变: 1/12到 1/24
BW4	LDL 收悉PDU	640.00 毫秒 1 536 PSK 符号	2 比特	无	无	4进制正交 沃尔什函数	1/1920

⁽¹⁾ 仅反映前向纠错(FEC)和沃尔什函数编码, 不包括已知数据或卷积编码器刷新比特。

⁽²⁾ 在这种情况下, 刷新比特的数量超过了刷新卷积编码器所需的一个最小数量; 这样使得编码的比特数量如沃尔什函数调制格式所要求的那样, 成为4的倍数。

串行音调波形和高数据速率波形等其它波形可用于在利用3G-ALE和TM协议建立的电路链路上传送数据和数字化的话音信令。

3.3.2.2 编码组合

3G ALE数据链路协议采用一项称为“编码组合”的先进自适应技术来增强每一个通过高频信道传送的能量爆发。当数据的一帧包含不可更改的错误时, 每一个收到的符号的软判决被存储在接收机中。该帧的重新传输携带了额外的纠错比特, 这些额外的比特在接收机中以模拟方式与先前收到的信号能量进行组合, 以便以更强SNR到达的符号在组合功能中被给予更高的加权。对于一个给定的SNR, 这就提供了一个可衡量的帧误码率下降并增强了3G ALE系统通过信道以低SNR和高干扰传输数据的能力。

3.4 增加数据速率的技术

可采用“信道捆绑”, 该方法基于采用数个3 kHz的信道。

3.4.1 独立边带操作

现今, 调制解调器可在多个独立的边带中同时传输数据。这样的调制解调器包含用于每一个音频信道的独立PSK/QAM调节器, 但采用一个单一的前向纠错编码器, 其输出比特流在传输的独立信道中分布。当这些信道由相邻的频率携带时, 信道的SNR趋向于类似, 但信道误码并不完全相关。由此, 通过采用多样组和, 可以在输出中获得一些改善。

ISB调制解调器现在可以在两个3 kHz(标称)信道中提供高达32 kbit/s的数据速率, 在4个信道中可提供高达64 kbit/s的数据速率。

3.4.2 非相邻信道内的操作

当相邻信道的数量不足以支持数据要求时，就需要在非相邻信道内进行操作。在这种情况下，信道SNR值可能相差很大，因此一个单个编码比特流在整个信道上的分布就不是最理想的。作为替代，为每一个信道组合生成独立的编码比特流。每一个信道组合独立进行流量控制，以便将数据吞吐量保持在接近使用中频率的最大限度。
