

ITU-R M.1314-1 建议书*

降低工作在 **400 MHz** 频带的
雷达系统的无用发射

(ITU-R 202/8 号研究课题)

(1997-2005)

范围

本建议书提供了在雷达设计中，影响雷达发射机的无用发射特性的信息。也建议为使无用发射达到实际可行的最小化，应该使用的发射机输出装置的某些类型。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 可用于无线电测定业务的无线电频谱是有限的；
- b) 如《无线电规则》第 4.10 款规定的，无线电导航业务是一种安全业务，此外，某些其他类型的雷达例如气象雷达可以完成救生功能；
- c) 在无线电测定业务中，为了有效地完成它们的功能雷达站发射的必要带宽是很大的；
- d) 新出现的技术系统可能使用数字或其他技术，它们更容易受到来自雷达的无用发射的由于高峰值包络功率造成的干扰；
- e) ITU-R 已在研究雷达系统有效利用无线电频谱的问题；
- f) 雷达系统的无用发射在某些情况可能对在邻近的和有谐波关系的频带上工作的其他无线电业务中的系统造成干扰；
- g) 《无线电规则》附录 3 规定了杂散或杂散域发射的最大容许功率电平，ITU-R SM.1541 建议书规定了无线电测定雷达的带外限值，

建议

- 1** 在选择雷达输出装置时，使用包括在附件 1 中的影响雷达的无用发射特性的雷达发射机设计因素的信息；
- 2** 在实施时，在雷达中应使用最易获得的输出装置技术，以减少非谐波雷达杂散发射电平；

* 应提请国际海事组织 (IMO)、国际民用航空组织 (ICAO)、国际海事无线电委员会 (CIRM)、世界气象组织 (WMO) 和无线电通信第 1 研究组和第 9 研究组注意本建议书。

- 3 在必要和可能时，应使用雷达输出滤波器以降低雷达无用发射。

附 件 1

降低雷达系统的无用发射

1 引言

对未来的频谱利用率进行最大化，应对雷达发射机予以选择、设计和创新构造以使在雷达性能、大小、成本、重量、可靠性、可维护性等给定的限制条件下发射频谱衰落尽可能快。发射频谱的边缘的衰减率（带外发射特性）和发射基线（杂散发射）是由发射机的硬件和发射波形的结构决定的。那些影响在下面会讨论。

2 雷达设计因素

一副雷达的功能或使命主要决定雷达的设计。雷达的功用有着千差万别（例如：导航、气象观察、风速确定、监视、成像和测绘、地形跟踪、测高等等）且通常需要独特的性能规范。由这些功用决定的又不在雷达设计人员控制下而直接影响着雷达设计因素的一些参数诸如：所需发射机功率、发射机波形选择、发射机输出设备的选择、天线增益、接收机灵敏度、射程和方位分辨力以及多普勒覆盖。为改善发射频谱控制而对雷达设计因素的明智的折衷在提高雷达系统和其他业务之间的兼容性中十分重要。

3 波形选择和成形

脉冲波形类型的选择和波形成形的方式也对频谱控制具有重要的影响并由此对兼容性也产生重要的影响。大多数雷达，特别是那些采用单功率振荡器或功率放大器的雷达，受到使用除子脉冲之间的短暂跃迁之外具有基本等幅的脉冲的能效和热消散的考虑的限制。可选择的波形类型是有限的。甚至在受到这些限制的约束后，选择仍对发射频谱有着较大的影响。

雷达波形可以分类，在第一层，分为普通脉冲或未调制脉冲，波形（具有“P0”的发射指定者）和脉冲内调制波形。尽管在波形用于频率操控阵列的情况下出现例外，脉冲内调制通常适合作为实现脉冲压缩的一种手段。脉冲内调制又可进一步分成以下的子类：

- 连续 FM，或“啾声”脉冲；
- 步进啾声脉冲；

- 用于频率操控雷达的步进频率脉冲；
- 离散编码脉冲。

从发射频谱控制的立场，在波形的选择和成形中的指导原则是尽可能地在众多派生出的波形中去除间断，这是因为它决定着最终频谱衰落的斜率，频率偏移以 dB/十倍频完成的。各种不同的脉冲波形是由其脉冲中幅度、相位和频率变换的不同来区分的。

所有脉冲波形，当然包括整个包络上的上升沿和下降沿。其他东西也相当，希望得到逐渐和平滑的上升沿和下降沿。然而，其他东西并不总是相等。特别是交叉场设备中产生的脉冲要求具有快速上升沿以避免会使频谱恶化的寄生振荡模式的激励。当采用的是放大器，而不是交叉场设备时，平滑、渐变的上升沿有益于实现频谱控制。然而由于放大器没有工作在接近饱和时，功率放大器的耗散通常很高，因此这种实现仍会相当困难；甚至当不考虑寄生振荡时，也可促进采用快速上升沿和下降沿。

连续频率调制或啾声、具有高脉冲压缩比的波形或带宽一脉冲宽度产物具有非常陡的频谱下降速率。这适用于线性 FM 和非线性 FM 波形二者。造成这些波形的无用频谱成分的主因是采用了短脉冲上升沿。

步进啾声波形具有在整个脉冲中单调增加或单调减少的分段恒定频率。可以把它们视为连续频率调制啾声的子集。而步进啾声波形以及采用了频率操控天线阵的非单调步进频率波形，比连续 FM 啾声波形具有更差的发射频谱。这是因为波形中非连续的结果。通过在频率步幅之间的接合处保持相位连续的方式来实现步进啾声以去除那些不连续也许是可行的。即使这样，在真正的连续 FM 波形不发生的第一派生出的结果中也还是不连续的，且将保持，因此其频谱不会像具有相同脉冲压缩比的连续 FM 脉冲那样好。

还有某些多相编码波形，其中弗兰克多相编码波形是原形，它有效地近似于啾声波形；即它们近似“连续编码”波形¹。然而，这些在相位中包含了陡变的台阶，因此它们的频谱不像连续 FM 啾声波形那样衰落得那么陡。

在这当中离散编码雷达波形指的是那些不管怎样都不像连续 FM 波形的雷达波形。由于排除了多相编码，大多数离散编码雷达波形可被进一步分为二相编码和频率编码类型。这些种类编码的波形既可以是 Barker 编码的也可以是伪随机二进制序列编码的。

在没有改进的情况下，离散相位编码波形在恒定的相位“啾声”之间有着突然的跃变。（对于弗兰克编码和其他多相编码也如此。）由此得出，它们的频谱衰落仅为 20 dB/十倍频。但是，可用一些选择来改善相位编码波形的频谱。

原则上，RF 驱动（激励）波形的频谱可做成通过对调制波形的滤波或以调制的低电平驱动波形（既可以在 IF 也可以在 RF）而任意快速的衰落。但是，在发射机功率放大器中和置于环境中的接收机中发生的频谱再增长实际上会使那些增益逐渐消减。当采用了预调制滤波，码片—码片的转换逐渐代替了跃变，但是在那些包含 180° 相位跃变的二相波形和多相波形上，由于从一个相位跃变为另一相位时包络通过零点而在波形包络中仍有零点或纹波。这并非是它自身的问题，但由于两个因素使获益减小。一个因素是在功率放大器设备中发生的 AM-PM 变换。寄生相位调制导致频谱加宽。另一个缺点是功率放大器发射机级或受害的接收机中出现的任何限制又有可能在已有纹波的波形中再引入突然的跃变。那些陡变的台阶转换为具有仍为仅 20 dB/十倍频衰落的频谱边缘的无用频谱边带。

¹ 啾声波形有时被认为是编码波形，尽管它们的“编码”并不是离散的。

有可能将频谱再增长减轻到相当可观的程度。可通过构成不仅是在子脉冲存在的区间还包括相位跃变的区间保持几乎不变的包络的激活（低电平、驱动器）波形来实现。在这样的波形中， 180° 的相位跃变由通过 I-Q 中或代替沿通过原点的 I 或 Q 轴运动的实像平面中一个半圆形的载波相位的旋转来构成。采用正交调制器和适当的波形成形电路的方式可实现。

另一种可供选择的离散编码波形类型是连续相位移频键控。这些波形本质上与应用于某些通信系统中的被称为最小移位键控（MSK）波形是相同的。尽管有时被称为相移键控波形，但由于在它们基本的未滤波形式中，瞬时频率突然变化而在每个子脉冲始终保持不变时相位是不断变化的，因此这些波形确实是频率编码的。在波形本身中没有中断，但在第一次微分中就不连续了。因此，频谱逼近渐进线以 40 dB/十倍频的速率衰落。此外，即使在它们的子脉冲跃变时这些波形具有恒定的包络，因此它们对伴随相位编码波形发生的频谱再增长问题具备固有的免疫。（由于扫频波形无子脉冲，因此它们也对由限制和 AM-PM 转换引入的频谱再增长有免疫。）在通信系统中，MSK 波形的预调制滤波被广泛应用。这种滤波也有望用于雷达，这样发射频谱的衰落从理论上可变得比 40 dB/十倍频更陡降。

当希望发射频谱陡降衰落时，不能不关注对射程的分辨率和多普勒覆盖的影响而一味地追求这一目标，通常用“模糊函数”的形式来表示。该函数表示从一个靶点返回得到由滤波器产生的匹配于发射信号的输出信号的大小。模糊函数是目标返回的射程（时延）和多普勒漂移二者的函数。作为一个极端的例子，具有无限时间一带宽乘积（即无穷压缩比）的线性 FM 矩形脉冲波形，除了上升沿和下降沿分量之外，会有一个极佳的矩形频谱。但是对这样一个波形匹配滤波器的响应对一次恒定多普勒目标返回就会有一个 $\sin(t)/t$ 响应。这样一个响应有着仅比主响应低约 13 dB 的时间（即射程）旁瓣，这对要求较高的多靶分辨率的一些应用就不够用了。匹配滤波器响应不是发射频谱的简单傅立叶变换。但是，有这样一种趋向，伴随响应中高射程的旁瓣而陡降的发射频谱，很像伴随着发射频谱中大旁瓣在时间波形中的陡降步幅。在某些范围，通过接收机信号处理器对发射脉冲的失配可改善射程旁瓣的抑制，但这也引来了相关匹配滤波器的灵敏度的减损。因此需要选择波形以使频谱控制、射程旁瓣抑制和灵敏度之间得到合理平衡（采用些微非线性 FM 形式的扫频波形对某些应用是较好的折衷）。但一般来说，良好的分辨率和灵敏度的要求使设计人员的选择余地变小。此外，许多雷达应用在多普勒频率的基本区间上要求要有几乎一致的响应；即要求它们具有低“多普勒灵敏度”。这就对设计人员选择波形引入了另一限制条件。

在通信系统中，频谱衰落的改善是通过来自字符间干扰恶化的代价的预调制滤波获取的。不过在符号间干扰变得无法接受之前，可在频谱控制中常可获取相当可观的改善。在一副雷达中，可通过来自降低雷达分辨力的代价，采用预调制滤波以获取频谱改善。对于波形中包含圆角（由于预调制滤波造成的）也有望仅遭受由于构建完全匹配的滤波器（或纠错处理）的难度导致检测灵敏度的些微损失，而不是明显的中断。在模拟通信系统的情况下，有理由认为在模糊函数或灵敏度明显恶化之前，在频谱控制中常可获得相当可观的改善。正如上面显示的那样，尽可能多地去除派生波形中的中断，决定了在大频率偏移所得到的最终频谱衰落的斜率。这并不必须要求有很窄带宽的滤波，尽管带宽决定了达到最终频谱斜率的频率偏移。

前面的讨论适用于波形在其子脉冲驻留期间具有恒定幅度的情况下。在波导组合器或空间功率合成结构中，采用多个功率放大器模块（通常是固态放大器），使得应用平滑的调幅波形成为可能。据了解在目前建造的雷达中还未采用，但这种波形将来可能会被采用。这将为从某种程度上控制雷达发射频谱提供另一设计的自由度。

4 雷达输出设备的选择

雷达发射机输出设备的选择不仅影响着发射机的设计，还影响着雷达的接收机和天线系统的设计。而且，多功能雷达系统的设计甚至会增加雷达输出设备选择的复杂性。在输出设备选择中的其他主要设计因素包括：能效（DC 能量至 RF 的转换）、瞬时带宽（无调节时的可用调谐带宽）和脉冲对脉冲的相干性（对于多普勒处理非常重要的各脉冲的相对相位）、重量、大小、机械强度、设备的寿命和价格。

表 1 给出了雷达系统设计中要考虑的主要设计因素的输出设备性能。正如从表 1 所看到的，对于峰值功率、瞬时带宽和能效的主要设计因素，输出设备特性有着很大的变化。应注意的是上述设计因素在雷达输出设备的选择中必须予以基本的考虑以保证雷达可完成其承担的任务。雷达输出设备杂散发射特性是在完成所有任务目标之后才需要考虑的。

表 1

设计雷达系统时考虑的雷达输出装置特性

输出装置	峰值输出功率范围 (kW)	能量效率 (%)	瞬时 1 dB 带宽 (载波 频率的%)	脉冲对脉冲的相干性	重量 (kg)	大小	机械强度	相对寿命 ⁽¹⁾	相对 成本 ⁽²⁾
交叉场: ⁽³⁾									
交叉场放大器	60-5 000	40-65	5-12	是	25-65			1.0	
磁控管 (未锁定)	20-1 000	35-75	⁽⁴⁾	否	1-25	小	好	1.0	低
磁控管 (锁定)	20-1 000	35-75	⁽⁴⁾	是	1-25			1.0	
同轴磁控管	10-3 000	35-50	⁽⁴⁾	否	2-55			5.4	
线性波束:									
耦合的空腔行波管	25-200	20-40	10-15	是	10-135			7.4	高
速调管	20-10 000	30-50	1-12	是	25-270	大	好	13.5	中
行波速调管	2 000-5 000	30-40	1-12	是	55-65			10.4	高
固态晶体管 (平行级 C 模块):		⁽⁶⁾							
Si 双极性	10-90	20-30	10-30	是	0.5-2.5	小	极好	15	高
GaAs 场效应管 ⁽⁵⁾	0.5-5.0	10-25	10-30		每个模块				

⁽¹⁾ 寿命的标准化, 相对于 20 世纪 70 年代的常规磁控管, 并不反映更新的技术下常规磁控管更长的寿命。

⁽²⁾ 取决于生产量。

⁽³⁾ 交叉场输出装置在未来设计雷达最有可能被逐步淘汰; 然而, 预计在海事无线电导航系统中仍将会继续使用。

⁽⁴⁾ 虽然磁控管不具有瞬时带宽能力, 可以实现把频率范围调高到工作频率的 10%。

⁽⁵⁾ 一般在低于 3.5 GHz 使用硅 (Si) 双极性模块, 在 5 GHz 频带上使用 Gallium Arsenide (GaAs) 模块。

⁽⁶⁾ 取决于在输出级组合的模块数目。

雷达发射机的杂散发射电平取决于雷达发射机中使用的输出装置。在雷达发射机中使用的各种输出装置的固有杂散发射特性的知识，是促进频谱的有效利用和对工作在邻近频带上的业务干扰最小的基础。

表 2 列出了雷达系统使用的输出装置的杂散发射特性（非谐波的和谐波的）。使用交叉场输出装置的雷达系统具有固有的非谐波杂散发射电平，如果杂散发射限制大于大约-60 dBc，则要求滤除。线性波束管和固态输出装置具有低于-100 dBc 固有非谐波杂散发射。所有的雷达输出装置都具有-15 到-55 dBc 范围内的谐波杂散发射，并且要求滤除以抑制谐波杂散发射。对于采用分布式输出装置（相位阵列）的雷达，滤波可能是不实际的。

表 2
在 3 和 5 GHz 频带上系统的无线电测定脉冲输出装置杂散发射特性

输出装置 ⁽¹⁾	杂散发射电平			
	在 1 MHz 中的非谐波 (dBc)	谐波 ^{(2), (3)} (dBc)		
		第 2 次	第 3 次	第 4 次
交叉场： 交叉场放大器	-35 到-50 ⁽⁵⁾	-25	-30	-45
磁控管（未锁定） ⁽⁴⁾	-60 到-80 ⁽⁵⁾	-40	-20	-45
磁控管（锁定） ⁽⁴⁾	-75 到-90 ⁽⁵⁾	-40	-20	-45
同轴磁控管 ⁽⁴⁾	-60 到-75 ⁽⁵⁾	-40	-20	-45
线性波束： 耦合的空腔 TWT	⁽⁶⁾			
速调管	-105 到-115	-20	-25	-35
行波速调管	-110 到-120	-20	-25	-35
行波速调管	-105 到-115	-20	-25	-35
固态晶体管（平行级 C 模块）： Si 双极性	-100 到-110	-45	-55	-65
GaAs FET	-100 到-110	-35	-45	-55

⁽¹⁾ 对工作在 5 GHz 以上的系统，任选的输出装置可能是更适合的。这些选项包括，但不限于螺旋/环状条状行波管和更新技术磁控管。

⁽²⁾ 列出的谐波杂散发射电平是标称值。谐波杂散发射范围通常是标称值的+5 dB 到-10 dB。

⁽³⁾ 用谐波滤波器（低通）可以把谐波杂散发射电平减到-100 dBc 以下。

⁽⁴⁾ 旧的磁控管输出装置固有的 $\pi-1$ 模式，可能只比载波低 40 dB。在启动振荡时期这些模式是间歇的和短期产生的。设计了新技术磁控管以抑制这些发射。

⁽⁵⁾ 一个波导带通滤波器可以把在交叉场装置中的非谐波发射电平，减小到低于-100 dBc。这些滤波器一般有十分之几分贝的插入损耗。

⁽⁶⁾ 线性波束输出装置，根据整个空腔选择性的特性，可能有接近载波的在-80 dBc 到-90 dBc 量级的非谐波杂散发射。

5 雷达输出滤波器

位于发射机输出的 RF 滤波器在抑制谐波发射中非常有用。RF 滤波器也可用于抑制很接近基本发射而非谐波的带外杂散发射和非谐波杂散发射。然而，对于控制相对离发射频谱很近的部分，它们的效用就有限了。部分原因是它们的额外成本、重量和大小，且事实上许多雷达是可调的和/或采用了多种波形，某些还比其他具有大得多的必要带宽。几乎没有实用的大功率 RF 滤波器可用以改装为适应载波频率或脉冲波形的变化，尤其要考虑这种变化可能发生在毫秒之内。

发射机的结构对频谱控制成功的程度也是一个重要的决定因素。在采用了多功率放大器时，发射频谱衰减率和衰减电平受到是发射机波导内组合的那些功率放大器的输出，还是仅为发射之后空间中的输出的影响。波导内组合有效地产生一个对从功率放大器输出的波形的互不相干成分的严重的阻抗不匹配，使得相对于放大器的计入噪声功率的辐射噪声功率显著地降低。在用多个放大器的阵列雷达时，一方面空间功率合成是很有吸引力的结构，但另一方面它使放大器的所有噪声功率都辐射出去了。在这种阵列中也限制了 RF 滤波的机会。部分原因是因为每个放大器都需要一个单独的滤波器，在这种应用中放大器的数量可达成百上千。还有部分原因是滤波器之间所需的间隔达到半个波导的量级，这是因为辐射单元通常密封在一起以避免天线增益方向图中出现不可接受的波瓣。这种间隔对高效滤波是不够的。

如表 2 所示，雷达输出装置的选择在滤除非谐波杂散发射的要求方面具有主要的影响。然而，如上面提到的，选择雷达输出装置不可能完全依据杂散发射特性。因为所有输出装置谐波杂散发射固有的高电平，实际上通常通过使用谐波（低通）滤波器来抑制谐波杂散发射。为减轻来自于某些中等的和高功率雷达在邻近于无线电测定频带上的雷达非谐波杂散发射频带，对某些雷达输出装置也会要求在雷达发射机后安装带通滤波器。它们一般应该与谐波滤波器分开，因为谐波抑制滤波器的宽阻带特性和邻近频带抑制滤波器的陡峭的截止特性通常不能一起实现。然而，要求的滤波器数量可以大于两个，在有源阵列雷达中，会需要一个或两个滤波器被插在每个功率输出装置和天线单元或它馈给的子阵之间。会一起要求上千个滤波器。

这些滤波器的货币成本可能很高，因为需要非传统的滤波器类型，它们有时要求增压或排空，被要求去处理高功率和维持在宽的阻带上要求的抑制特性。这些滤波器的使用在雷达系统性能上也强加了折衷。雷达发射机谐波滤波器和带通滤波器的插入损耗在这些频带上是 0.1 到 0.7 dB。如果谐波和带通滤波器都需要，那么插入损耗大致是两倍。由于雷达工作中的许多变化，在检测和跟踪性能中通常不注意这种伴随的衰减，但是事实是甚至 0.2 dB 都意味着 RF 功率的重要损耗（例如，在 1 MW 雷达的情况中，47 kW 的峰值功率）。需要发射机更强有力地弥补性能的损失，必须假设已经开发了改进性能的更经济有效的方法。例如，0.4 dB 的损耗，对应检测范围减少 2.3%，对大多数雷达这是不重要的，但对某些雷达是重要的。两类滤波器的电压驻波比在 1.1 到 1.3 的范围内。

在雷达上特别在移动雷达上，考虑可能使用输出滤波器的因素是滤波器的功率处理能力、大小和重量。在有源阵列雷达移动情况中可以优先考虑大小和重量。要求接近雷达工作频带的滤波频带有陡峭的选择性边缘，并且因此有高能量的存储，这产生了损坏的危险（或降低了功率处理能力）并且也可能在通带内引入相位失真——这是有源阵列雷达的另一个主要考虑的问题。雷达功率越高，越需要更大的衰减去把杂散输出抑制到给定的电平上，也就需要更多节的滤波器，并且因此它们的插入损耗、大小和重量会趋于更大。

在雷达最初设计时，发射机的滤波得到最好的实现。在许多情况下，在使系统性能产生最小影响的条件下已经实现了把发射机滤波器加到现有的雷达上，但是还有另外的情况，当加入带通滤波器去抑制邻近频带发射时，发生了损坏的问题。

6 雷达的趋势

推动雷达输出装置选择方向进步的主要方面是：

- 数字雷达信号处理，它导致多普勒雷达的迅速增长，多普勒雷达要求高的脉冲到脉冲的相关性（线性波束和固态输出装置），
- 较高功率固态发射机装置的开发（模块化/瓶装和分布式（相位阵列）配置），
- 新技术磁控管的开发已经特别设计以减少无用发射，其使用寿命也比旧的传统型号要长得多。

这些趋势会对降低更新一代雷达的无用发射电平具有影响。
