

# 无人机射频干扰原理概论

2017-05-25 刘虎 科创 射频百花潭

## 1、引言

近年来无人机（本文指民用多轴飞行器）正以空前的速度普及，由此引发的关于安全的忧虑日益增多。许多有关部门甚至个人都希望采取一些措施，阻止无人机飞临敏感区域。为了达到这个目的可以采用很多方法，比如训练老鹰飞去抓捕。



除了这类眼球效应大于实用的方法，最实用、性价比最高的方法莫过于无线电干扰。

目前所有的民用无人机都需要用到无线电技术来实现定位、遥控、图像传输等功能。当然某些特殊用途的无人机可以采用诸如地形匹配、图像识别以及高精度惯性导航的办法来确定自己的位置，并且自主的完成任务，但在民用领域尚未普及。既然无人机必须使用无线电技术，就可以对无线电进行干扰，从而达到使无人机失控或折返的目地。

目前商品无人机必备的主要是GPS定位和遥控这两个部分。如果用于拍摄图像或其它测试用途，还必须有下行的图传和遥测通信。无线电测高和防撞设备也偶有使用。

在攻防态势上，通常无人机的操纵者和需要设防的敏感区域之间有一定距离。无人机从操纵者附近起飞，然后逐渐飞临设防区域。当无人机到达设防区域附近，能够开展有效的侦查或破坏活动时，无人机到设防区域的距离，通常比它到操纵者的距离要近得多。

在上述态势中，操纵者发送的一切上行信号（从地面向无人机发送）都会因为距离远而比较微弱。采用同样的功率，防御者由于距离无人机更近，信号将比操纵者强。防御者收到的下行信号也会比操纵者强。但是对下行信号的防御目标是让操纵者收不到，而此时无人机到操纵者的距离，和防御者到操纵者的距离是差不多的。所以对下行信号的阻断不占地形优势。

从上面分析可以看出干扰上行信号更为有利。恰巧上行信号通常是遥控信号，直接关系到对无人机的操控，如果上行信号被干扰，无人机将失去即时控制，只能按照程序预设的步骤运行（通常是降落或者悬停）。而下行信号主要是遥测和图像等，虽然也可能存在敏感信息，但相比控制信号而言就不那么重要了，再加上防御者在态势上不占优势，通常对下行信号采取放任态度。

GPS依靠中轨道卫星。通俗而言就是信号经过上万公里到达地球表面，已经非常微弱。所以要在无人机离防御者很近的情况下干扰GPS信号是比较容易的。如果想欺骗它就需要用比较复杂的手段来模拟GPS卫星，会困难得多。



## 2、对GPS的干扰

GPS信号十分微弱，在地面附近已低于自然本底噪声。采用常用的3-6dB增益的无源天线在开阔地接收，其总接收电平最高可达约-120dBm。民用GPS信号是频率1575MHz，2.046MHz带宽的扩频信号，扩频增益43dB，Cb/N0按6dB考虑。固然任何方式的干扰只要

足够大都能产生效果，但由于扩频增益太高，部分频带干扰的效益很差。在容易实现的方式中，全频带噪音干扰较有优势，满足如下条件时误码率高于10%：

- (1) 干扰信号的带宽等于或大于2.046MHz，覆盖GPS信号的整个频带。
- (2) 干扰信号经GPS天线接收后，其总功率电平要高于-83dBm。

无人机上的GPS天线主瓣方向朝向天空，对于地面来的干扰能提供一定的隔离。隔离的大小取决于天线的品质、安装方式和无人机本身的结构与材料。如果天线安装在无人机正中心位置，无人机上又有整块的碳纤维网板遮挡地面方向，那么通常能提供30-40dB的隔离。如果天线方向性不佳，安装不够垂直，则隔离度会有所降低。设无人机GPS天线对地面防御者（干扰源）的增益为-40dB，对天空的增益满足正常接收GPS天线的要求，也就是总接收电平能达到-120dBm，无人机距离地面100米，干扰发射机的天线增益为0，根据自由空间损耗公式，则需要的发射功率是：

$$P_t = P_r + 32.45 + 20 \log d + 20 \log f - G = -83 + 32.45 - 20 + 64 + 40 = 33.45 \text{ dBm}$$

上述计算的意思是：如果干扰带宽适中，则只需要2W的发射功率，就能干掉100米范围内的无人机GPS。假如干扰天线有6dB增益，那么只需要0.5W功率。

实测发现，0.01W功率的噪声调幅配合增益为5dB的R100天线，已经能在100米范围内许多品牌无人机的GPS。这可能是以下几个原因导致的：

- (1) 品牌无人机大量采用轻质塑料，导致GPS天线的对地隔离度远远不足40dB。
- (2) 总接收电平达不到-120dBm（该值接近理论最佳值，工程中通常按-130dBm考虑）。
- (3) 廉价接收器解扩方案过于简化，没有充分利用43dB的扩频增益。

最简单的宽带信号是噪音调频。当然还可以采用相关性更强的干扰直至欺骗，比如用GPS模拟器产生一些假信号。但考虑到干扰功率本来就不大，似乎没有必要费这个事。无人机丢失GPS信号以后的行为取决于飞控的功能及设置。对于技术娴熟的操作者而言，GPS不是必要的，在没有GPS的年代里，航空模型的飞手们依然可以靠目视或图传完成自己设想的飞行路线。但是对于技术不娴熟的操纵者，干掉GPS信号的后果已经相当严重，因为此时无人机的自动返航功能已经失效，必须完全依赖人工操作。根据已经掌握的防御经验，这基本等于飞不回去。

如果想避免GPS受干扰的后果，可以在下面几点上做文章：

- (1) 操纵者必须经过无GPS飞行方面的训练。
- (2) 严格考核GPS天线的对地隔离度，使之提升到比如50dB；选用性能足够好的GPS接收机。

(3) 采用更高精度的惯性平台，确保在GPS丢失后能支撑足够返航的时间。

(4) 利用机载摄像机的图像进行定位和返航。

### 3、对遥控信号的干扰

商品遥控发射机的功率通常为100mW，特殊用途或自行改装的遥控发射机可能具有更大的功率。如果按100mW考虑，遥控发射天线配置普通鞭状天线，增益约3dB，无人机上的接收天线增益也为3dB的情况下，设操纵者距离飞机100米，采用2450MHz频率，则接收机收到的功率电平最大为：

$$20+6-32.45+20-68=-54.45\text{dBm}$$

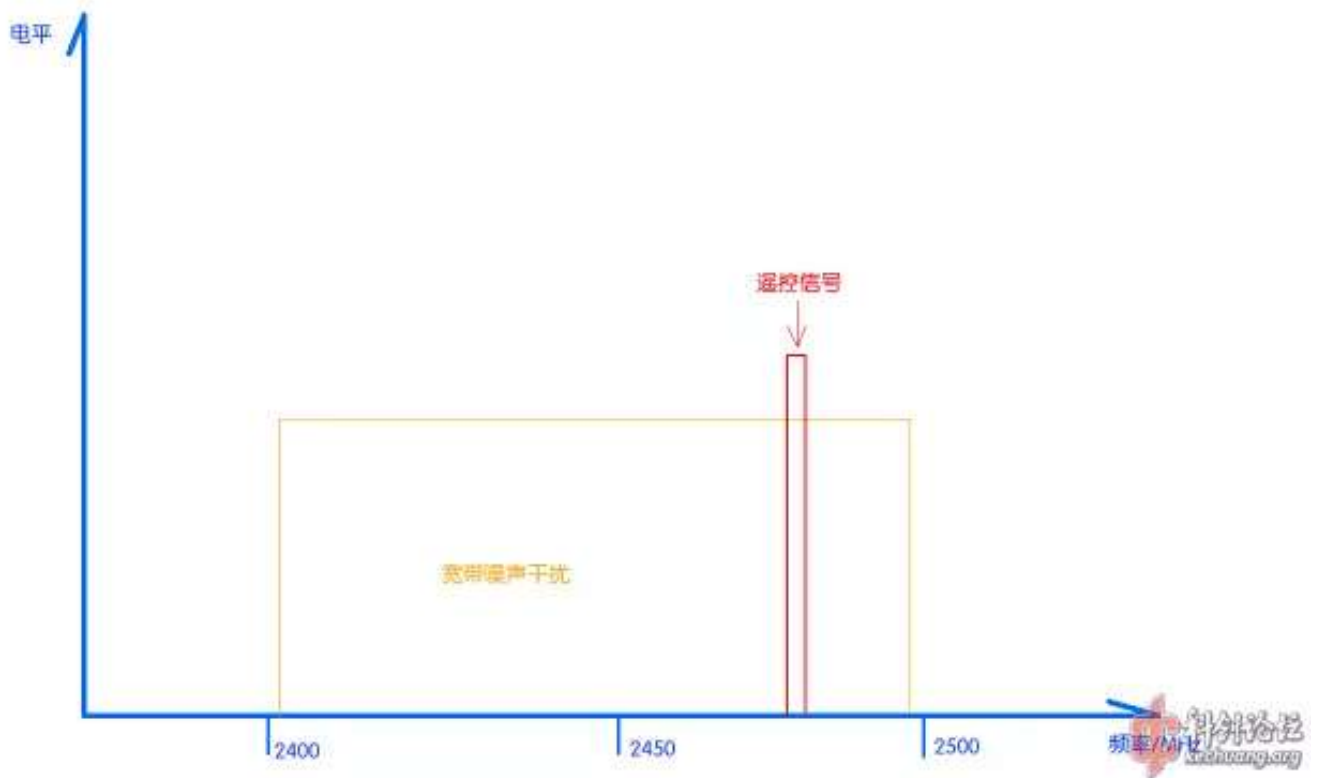
可见遥控信号的强度远大于GPS信号。

不过，遥控接收天线的主瓣方向必须朝向地面，所以不能像GPS天线那样对地面干扰提供隔离。

目前，遥控发射机已经普遍采用跳频、扩频技术，而且跳频参数还可以自适应，具有一定的抗干扰能力。在计算需要的干扰大小时，必须已知跳频、扩频的参数才能得到准确的结果。不过我们依然可以知道所需干扰的大致范围。遥控发射机仍按上述参数，假设防御者距离无人机为100米，天线增益为3dB，如果采用相关的干扰，需要的干扰功率与遥控发射功率接近，即0.1W以上。如果遥控信号存在跳频措施，而干扰者除了频带范围之外，并不知道这些措施的任何参数，只能用噪声进行全频带暴力覆盖，那么所需功率将有所提高。就经验而论，通常需要提升30dB，具体来说就是100W。

这个干扰功率就比GPS具体多了，而且难以低成本的产生。同时，过大的干扰功率可能会影响其它正常的无线电通信，出现干死一大片，无人机照样飞的窘境。

如下图所示，如果遥控信号的跳频范围是2405~2495MHz，而防御者不知道跳频参数，那么就只好用噪声进行全频带覆盖，即黄色区域。而遥控信号功率集中，当它的总功率电平比干扰的总功率电平小的时候，依然可能在局部比干扰电平高不少，从而不受干扰影响，如红色区域。目前先进的遥控器已经能够根据干扰的情况自动调整跳频频率，所以对于采用跳频的遥控器，窄带强干扰效果不佳。



跳频和直接扩频联合应用可以弥补各自的不足。但是遥控器的扩频增益比GPS低得多，所以扩频部分的抗窄带干扰能力较差，通常只需要3~6dB的干信比。因此采用梳状谱的干扰源，例如间隔1MHz的100个干扰峰，其总干扰功率比有用信号高26dB，可比宽带噪声干扰节约3~10dB功率。

除了频域上的宽带干扰，还可以在时域上有所变化，即采用脉冲干扰源。如果遥控器没有采取重复编码措施时，使用脉冲干扰可以节约平均功率，或者在平均功率一定的情况下，提高脉冲功率。但如果采取了重复编码措施，脉冲干扰效果不佳。

除了暴力的噪声干扰之外，还可以采用阻塞干扰和瞄准干扰，将在后面讨论。

#### 4、对下行图传和遥测信号的干扰

这部分干扰与对遥控信号的干扰没有本质的区别，不同之处是攻防态势更加不利于防御者。由于干扰的对象是操纵者的接收机，一般而言防御者与操纵者的距离大于或接近于无人机与操纵者的距离。另外，无人机至少有几十米到数百米高度，信号传播条件比位于地面的防御者要好得多，操纵者还可以使用定向天线瞄准无人机，甚至使用可自动调零的天线对干扰信号产生隔离。防御者的优势是天线增益能够比空间和重量都十分局促的无人机高。但由于不知道操纵者的方位，只能在垂直面想办法。一般讨论这个问题按操纵者（接收机）方位

不明、干扰距离与无人机的通信距离相同，接收天线提供的隔离度和地面附近的附加损耗总共20dB来考虑。

雪上加霜的是，最新的商品无人机的图传或遥测信号发射功率在不断的加大，2W功率已经登场。

按照上述条件，如果扩频增益为20dB， $C_b/N_0$ 为6dB，采用不相关的噪声干扰，天线增益与无人机相同，总功率电平应高于 $33+34=67\text{dBm}$ 才产生效果，相当于5KW！假设地面采用比无人机高10dB的水平定向天线（如共轴同相阵），也需要500W的功率。

由上述计算可以了解，如果无人机采用扩频、跳频技术，且防御者不知道有关参数而只能暴力蛮干，需要的功率将十分可观。

古老的图传采用固定频率，如果能够侦察得到具体的频率，就可以施放简单的瞄准干扰。仍使用全向天线且假设干信比为0dB即可有效干扰，则需要的功率将减小到 $33+20=53\text{dBm}$ ，相当于200W。如果使用比无人机高10dB的高增益天线，就只需要20W了。

## 5、阻塞干扰

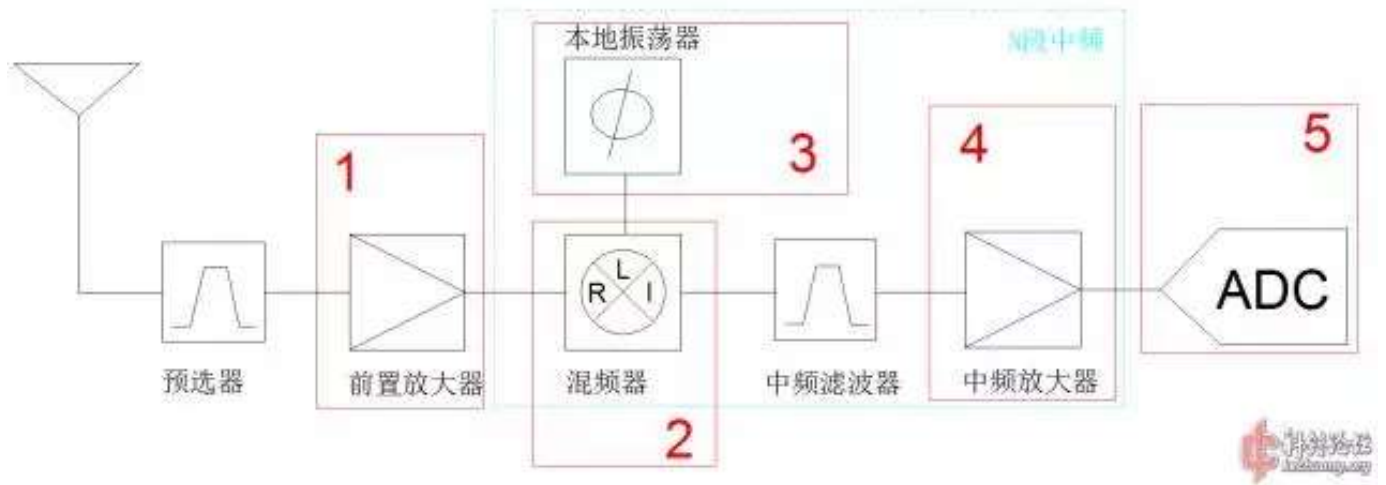
本文凡是提到阻塞干扰，是指位于通信信道之外的，超过接收机电路的承受能力，能够导致接收机对正常信号的处理能力降低的干扰。

采用扩频、跳频技术有利于对抗噪声干扰，但并不能提高接收机的阻塞电平。相反，由于必须具备较宽的前级，更容易发生阻塞。这里，阻塞电平的定义是：位于接收机瞬时通带之外的，使接收灵敏度压缩6dB所需要的干扰电平。

民用接收机为了提高灵敏度，通常天线信号经简单的滤波以后就进入低噪放和混频器。从省电考虑，这些电路不能采用大功率器件，他们的动态范围是比较小的，通常只需提供-20dBm左右的干扰信号，即使干扰频率与接收频率有一个小的偏差，也能使接收灵敏度降低6dB。这时，-20dBm就是该接收机的阻塞电平。如果干扰进一步增强，接收机将完全收不到有用信号。如果接收机前级没有适当的限幅电路，更强的干扰能将其烧毁。

下图是一部典型的接收机的框图。数字序号代表可以引起阻塞的环节。





放大器1和放大器4在专业接收机中必然会采用输入压缩点接近0dBm的器件，而在民用接收机中往往达不到这个水平，常见为-10~-20dBm。混频器2的截点往往也不会太高，因为高的截点意味着需要大的驱动功率。当有强干扰落在预选器带内时，混频器将无法正确输出中频信号；如果再落在中频滤波器带内，那么ADC之前就会全军覆没。

不论模拟IQ下变还是中频直接采样，本地振荡器的相噪都会与强干扰在混频器中相乘，从而落到中频上，导致底噪抬高。如果干扰靠得近，待接收的信号将落在干扰的混频产物的裙边内部，如果有用信号较小，就会被裙边淹没。

ADC的位数通常只有12或14位，动态范围捉襟见肘。为了能够采用高速跳频方案，通常中频滤波器的带通很大，非接收频率上的干扰也会到达ADC。干扰稍大就会让ADC过载，或者，如果通过AGC使得ADC不过载，那么正常信号到达ADC时就会弱到不足1bit。

以常见的收发机芯片AD9361为例，它几乎不能抵抗高于-24dBm的带外干扰。要在接收机上感生-24dBm的功率并不复杂。仍以100米距离，收发天线增益均为3dB为例，需要的功率是：

$-24 + 32.45 + 68 - 20 - 6 = 50.45\text{dBm}$ ，即100瓦。

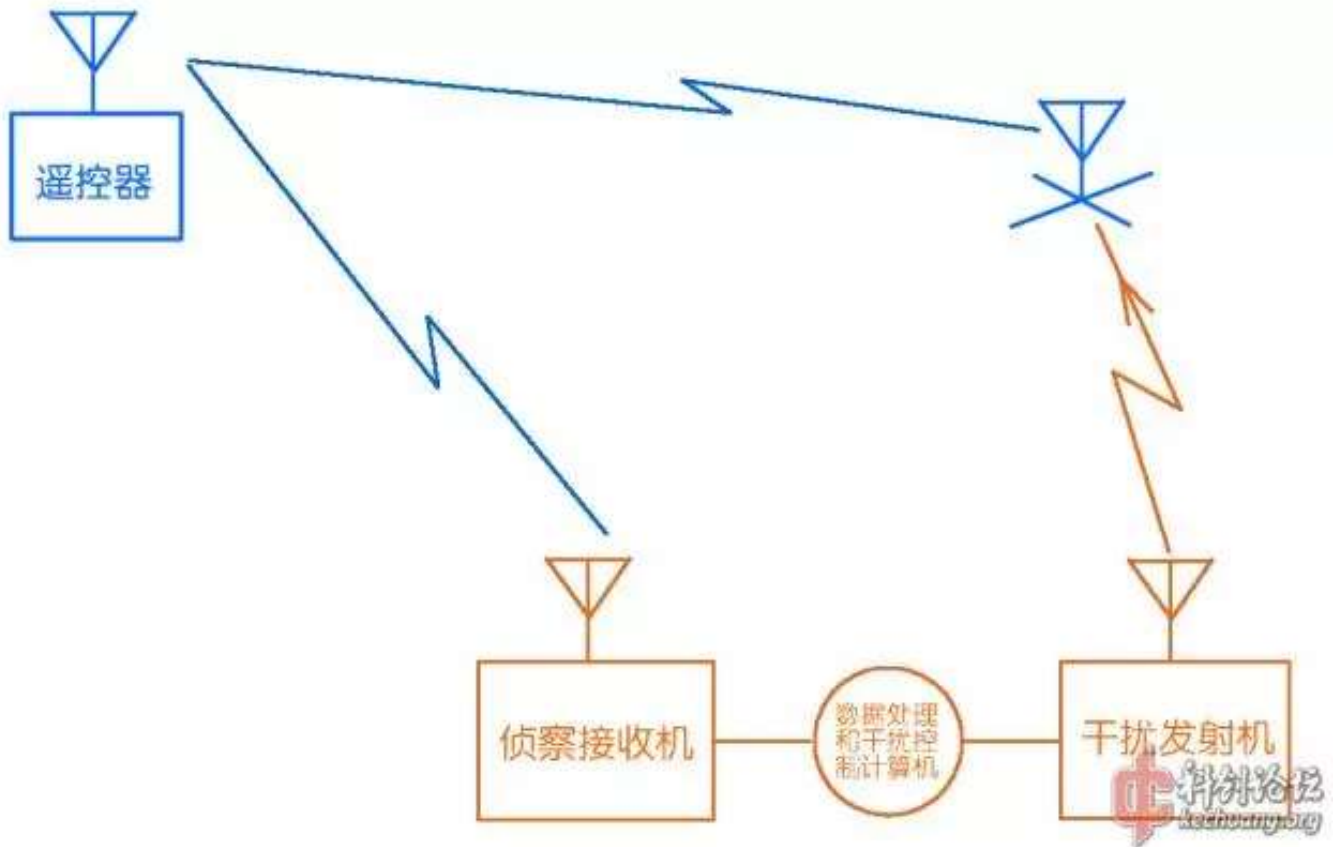
产生100W的噪声是复杂的，因为特定调制的干扰器很难做大功率。而如果不对信号的带宽、品质提出要求，就能使用磁控管轻松的产生高功率。当然，增加一些磁控管力所能及的调制更好，比如采用注入已调信号的方法或者采用脉动直流来驱动。

阻塞干扰由于简单粗暴效果好，目前是那些不用担心因为干扰别的通信业务而负法律责任的“有关部门”最常用的拒止手段。由于辐射大，风险大，运行成本高（费电且寿命短），一般不能持续开机设防，要求见到无人机才开机。

## 6、瞄准干扰

本文所述的瞄准干扰是根据被干扰信号的瞬时频率和开机时间施放的针对性干扰。窄带数传或跳频信号在任意瞬间的频率是确定的，干扰只需要针对这些频率，而不需要覆盖所有可能跳到的范围。这将大大节省干扰功率。对于单纯的直接序列扩频，通常不定义瞄准干扰。

一个典型的瞄准干扰场景如下图所示。侦察接收机持续的监听可能的通信频段，将数据送给计算机。当计算机发现遥控器的信号以后，立即把需要施放干扰的参数告诉干扰发射机，使干扰发射机开始发射。当经过一段时间（例如1毫秒），让干扰暂停，侦察接收机继续搜寻遥控信号，如果遥控信号继续存在或变更频率，则把新的参数告诉发射机，再次启动干扰。如果遥控信号消失，则停止干扰。让接收机与发射机分开布置，可以侦察和干扰同时进行。



这种干扰的好处是没有信号则不放干扰，而且干扰电平很小，环境友好程度高。如果遥控信号未经扩频，通常使接收电平等大或略大一点即可。如果是扩频信号，由于扩频增益不高，通常也只需要大20dB以内。功率的设定可根据遥控信号的瞬时带宽而定，带宽大的时候适当提高一些。不论频率、带宽都可以被侦察接收机测定，如果技术允许，还可以测定调制方式，并对某些信号（比如防御者附近的WIFI信号）顿感。

瞄准干扰的主要挑战是响应速度。如果跳频速度为1000跳/秒，则单频点的驻留时间只有1ms。按干扰一半算，只有500μs的时间来进行侦察、分析、判决、指令和启动发射机。



现在这种指标已经可以比较容易的达到了。如果不要求具体识别信号种类，只进行FFT和谱型判断，整个过程可以在几微秒内完成。不过发射机需要特殊设计才能这么快调定和达到足够功率。好在现在遥控器的跳速都不快。

除此之外还要考虑侦查接收机的防御态势。无人机的高度较高，有可能无人机能收到遥控信号，而地面上的侦查接收机却收不到。此时需要加高天线，提高增益。但又会导致收到诸多非遥控信号，尤其是设防区域在城里面的时候。这会给信号识别提出较高要求，如果遥控器模拟城市常见的比如WIFI信号或者就是采用WIFI技术，难度就比较大。

整套设备比较贵，如果跳频范围进一步加宽，或者采用其它UWB技术，侦查和干扰设备的成本将进一步上升。

## 7、设防事项

应主要考虑对GPS和遥控上行信号的干扰。对于固定式干扰设备，应当确保设防区域内部和上空达到足够的场强，而在设防区域之外迅速衰减。除非特别敏感的地方，一切干扰设备的设置都应遵循正当、适度的原则，只在确有必要的区域、确有必要的区域施放确有必要的强度，避免对正常的无线电用户产生影响。

本文的某些预算较实际经验显著偏大，这是因为本文是按照防控比为1：1的态势来考虑的，而常见的情况是防御距离远小于操纵距离，通常优于1比3。所以在实际设防时，可以按照比本文的预算值小10倍来考虑。干扰设备应有高低两档或更多档的功率可供选择，常规情况下只使用低功率。

有固定干扰设备的，应在值班场所、瞭望场所安装操作面板，便于随时启动。便携设备应当放置在便于取用的地方，随时保持整备状态。相关设备应有专人管理和使用，否则需要授权措施，比如采用钥匙、密码、指纹等方可启动。

如果无人值守或者没有专门的观察员，就需要通过一定的手段识别无人机威胁，然后发出报警或自动启动干扰。侦察接收机是一种手段，但在城市区域使用不太靠谱。其它手段有声音识别、图像识别、一次雷达等。总的来说，目前还没有一种可靠而廉价的手段。

无线电管理机构不会为干扰设备颁发频率许可和电台执照，原则上这些设备都属于非法使用。国家强力部门使用是他们自己的事，但如果企事业单位或者个人使用，则可能存在法律风险。无人机受到干扰以后可能造成财产损失和二次伤害。比如坠落的无人机可能造成人员死伤，故应当在地面安全和防御需求之间平衡风险。

SMW200A



提供 **射频微波仪器** 的租赁、维修、销售、回购服务

深圳市君鉴测试仪器租赁有限公司

☎ 400 860 3035



分享是一种积极的生活态度！



## 微信万人群

1. 仅限射频，各群不重复加入
2. 先加群主，验证后邀请加入
3. 需要注明：单位+岗位/方向



## 射频百花潭

关注国内最大的射频公众号



### 射频百花潭

**专注于射频微波/高频技术分享和信息传递。**由资深射频专家、兴森科技射频实验室主任、《ADS2008/2011射频电路设计与仿真实例》《HFSS射频仿真设计实例大全》主编徐兴福创建。该号已经50000人关注，10000+人加群（博士2000+）。微信群集合全球华人射频精英，汇聚行业大师经验智慧，答疑释惑，交流分享。群里包括众多单位总经理、总工、主任、技术总监、教授、千人计划、长江学者、首席科学家、IEEE Fellow等。