

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R M.1464-2 建议书
(02/2015)

**非气象无线电定位雷达的特性以及
2 700-2 900 MHz频段内无线电
测定业务的航空无线电导航
和雷达共用研究的特性
和保护标准**

M系列

**移动、无线电测定、业余
无线电以及相关卫星业务**



国际电信联盟

前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电通信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率范围限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由世界或区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

知识产权政策（IPR）

ITU-R的IPR政策述于ITU-R第1号决议的附件1中所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策实施指南》和ITU-R专利信息数据库。

ITU-R 系列建议书

（也可在线查询 <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>）

系列	标题
BO	卫星传送
BR	用于制作、存档和播出的录制；电视电影
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电定位、业余和相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调
SM	频谱管理
SNG	卫星新闻采集
TF	时间信号和频率标准发射
V	词汇和相关问题

说明：该ITU-R建议书的英文版本根据ITU-R第1号决议详述的程序予以批准。

电子出版
2017年，日内瓦

© 国际电联 2017

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

ITU-R M.1464-2 建议书

非气象无线电定位雷达的特性以及2 700-2 900 MHz频段内
无线电测定业务的航空无线电导航和
雷达共用研究的特性和保护标准

(2000-2003-2015年)

范围

应利用本建议书进行无线电测定业务系统与其他业务系统之间的分析，不应利用该建议书做出雷达对雷达的分析。

关键词

航空、无线电导航、保护标准、特性

缩略语/词汇表

AESA	有源电子扫描阵列
ATC	空中交通管制
CFAR	恒虚警率
CPI	相干处理间隔
CW	连续波
MLT	平均电平门限
PESA	无源电子扫描阵列
PPS	每秒脉冲数
PRF	脉冲重复频率
QPSK	四相移相键控
STC	敏感时间控制
TDMA	时分多址
TWT	行波管

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 完成各自功能的雷达，其天线、信号传播、目标检测和大的必要带宽特性在某些频段是最佳的；
- b) 航空无线电导航和非气象业务所用雷达的技术特性取决于系统要完成的任务，即便在同一频段内也会有很大不同；
- c) 无线电导航业务是《无线电规则》第4.10款规定的一种安全业务，不能受到有害干扰；

- d) 从WARC 79以来已对无线电定位和无线电导航的频谱划分进行了大量消减或降级（合计约1 GHz）；
- e) 一些ITU-R技术小组正在考虑在无线电导航和气象雷达使用的420 MHz和34 GHz之间频段内引入新型系统（例如固定无线接入和高密度固定和移动系统）或业务的可能性；
- f) 为了确定在无线电导航和气象频段中引入新类型系统的可行性，需要了解无线电导航和气象雷达的典型技术和操作特性；
- g) 需要确立无线电导航和气象雷达与其他业务中系统之间兼容性分析的程序和方法；
- h) 在该频段内，批准用于气象的地面雷达与航空无线电导航业务台站以同等条件工作（见《无线电规则》第5.423款）；
- i) ITU-R M.1849建议书包含了地面气象雷达技术和操作方面的信息，可作为分析地面气象雷达与其他业务系统之间共用和兼容性问题的导则；
- j) 该频段的雷达用于进行飞机场监控，在航空器进场和降落过程中提供地面相撞引导，这对于飞机场安全服务至关重要。航空管理机构负责确保和维护航空安全并实施强制性最低性能和服务劣化标准，

认识到

- 1 保护标准取决于具体的干扰信号类型，如在附件2和3中所描述的那些干扰类型；
- 2 应用保护标准需要同时考虑标准的统计特性和完成兼容研究所需要的其它气象要素（例如天线扫描和传播路径损耗）。可以酌情将这些统计上的考虑事项的进一步研究纳入本建议书以及其他相关建议书将来的修订文本中，

建议

- 1 附件1中描述的航空无线电导航雷达的技术和操作特性应认为是那些在2 700 2 900 MHz频率范围内工作的雷达的典型技术和操作特性；
- 2 ITU-R M.1461建议书应被作为对航空无线电导航和气象雷达与其他业务系统兼容性分析的导则；
- 3 航空无线电导航雷达的保护触发电平应依据附件2，特别是第4段，以便评估与来自其它业务的各种干扰信号类型（附件2列出了其中的典型类型）的兼容性。若存在多个干扰源，这些标准代表了综合保护电平。

注1 – 在得到更多详细信息后，将修订本建议书。

附件1

航空无线电导航和非气象无线电定位雷达的特性

1 引言

2 700-2 900 MHz频段划分给了作为主要业务的航空无线电导航业务和作为次要业务的无线电定位业务。在5 600-5 650 MHz频段内，批准用于气象的地面雷达与航空无线电导航业务台站以同等条件工作（见《无线电规则》第5.423款）。2 900-3 100 MHz频段划分给了作为主要业务的无线电导航和无线电定位业务。3 100-3 400 MHz频段划分给了作为主要业务的无线电定位业务。

航空无线电导航雷达用于空港的航空交通管制（ATC），且进行安全业务（见《无线电规则》第4.10款）。相关情况表明，在世界范围内，该频段是民用航空交通终端进场/空港监控雷达的主要频段。

2 技术特性

2 700-2 900 MHz频段由许多不同类型的陆基的固定和可搬运平台上的雷达使用。在该频段中雷达系统执行的功能包括ATC和天气观测。雷达的工作频率可假设成均匀地散布在整个2 700-2 900 MHz频段内。大多数系统采用一个以上频率实现频率分集的优势。两个频率的使用司空见惯，但尚未看到四个频率的使用情况。表1包括了部署在2 700-2 900 MHz频段内典型的航空无线电导航雷达的技术特性。这些信息在评估这些雷达与其他系统之间兼容性的一般计算中通常是足够的。

2.1 发射机

工作在2 700-2 900 MHz频段内的雷达采用连续波（CW）脉冲、频率调制（线性调频脉冲的）脉冲。发射机的最后一级采用了正交场、线性波束和固态输出设备。由于多普勒信号处理的要求，新的雷达系统的趋势是趋于线性波束和固态输出设备。另外，采用固态输出设备的雷达具有较低的发射机峰值输出功率和较高的、接近10%的脉冲型占空比。还有一个趋势是趋于使用频率分集的雷达系统。

工作在2 700 2 900 MHz频段内的雷达的典型发射机射频（RF）发射带宽范围是66 kHz至6 MHz。发射机的峰值输出功率范围包括从固态发射机的22 kW（73.4 dBm）、行波管（TWT）系统的70 kW（78.5 dBm）到采用速调管和电磁管的大功率雷达的1.4 MW（91.5 dBm）。

高功率系统通常一个频率上有一个单一发射机，而且往往拥有窄带输出级。采用TWT或固态的低功率系统拥有可在多个频率上操作的单一发射机，因此，它们具有使用多个频率的宽带输出级。

表1

2 700 2 900 MHz频段内航空无线电导航雷达的特性

特性	单位	雷达A	雷达B	雷达C	雷达D	雷达E	雷达F
平台类型（机载、船载、地面）		地面，ATC					
调谐范围	MHz	2 700-2 900 ⁽¹⁾					
调制		P0N		P0N, Q3N	P0N	P0N, Q3N	P0N, Q3N
进入天线的发射机功率 ⁽²⁾	kW	1 400	1 320	25	450	22	70
脉冲宽度	μs	0.6	1.03	1.0, 89 ⁽³⁾	1.0	1.0, 55.0	0.4, 20 0.5, 27 ⁽⁴⁾
脉冲升/降时间	μs	0.15-0.2		0.5/0.32 （短脉冲） 0.7/1 （长脉冲）			0.1（典型）
脉冲重复频率	pps	973-1 040 （可选）	1 059- 1 172	722-935 （短脉冲） 788-1 050 （长脉冲）	1 050	8号, 1 031 to 1 080	1 100 840 ⁽³⁾
占空比	%	0.07最大	0.14最大	9.34最大	0.1最大		2（典型）
线性调频带宽	MHz	不适用		2	不适用	1.3非线性 FM	2
相位编码子脉冲宽度		不可用					
压缩比		不适用		89	不适用	55	40:1 55:1
RF发射带宽 -20 dB	MHz	6	5	2.6 （短脉冲） 5.6 （长脉冲）			3 （价值类型）
3 dB			0.6	1.9			2
输出设备		速调管		固态晶体管，C类	电磁管	固态晶体管，C类	TWT
天线辐射图类型 （笔形、扇形、余割平方等）	度	余割平方+30		余割平方6至+30			余割平方增强至+40
天线类型（抛物面、相控阵、缝隙天线阵）		抛物反射器					
天线极化		垂直或左圆极化	垂直或右圆极化	圆极化或线性极化	垂直或左圆极化	垂直或右圆极化	左圆

表1 (续)

特性	单位	雷达A	雷达B	雷达C	雷达D	雷达E	雷达F
天线主波束增益	dBi	33.5		34	32.8	34.3低波束 33高波束	33.5
天线仰角波束宽度	度	4.8			4	4.8	5.0
天线方位波束宽度	度	1.35	1.3	1.45	1.6	1.4	1.5
天线水平扫描速率	度/秒	75			90	75	90 60(4)
天线水平扫描类型 (连续、随机、 360°、扇区等)		360°					
天线垂直扫描速率	度/秒	不适用					
天线垂直扫描类型 (连续、随机、 360°、扇区等)	度	不可用		+2.5 to - 2.5	不适用	不适用	不适用
天线旁瓣 (SL) 电平 (第 1 SL和远SL)	dBi		+7.3	+9.5 3.5			+7.5 0 to -3 dBi
天线高度	m	8					8-24
接收机IF 3 dB带宽	MHz	13	0.7	1.1		1.2	4
接收机噪声系数	dB	4.0最大		3.3	2.7	2.1	2.0
最小可识别信号	dBm	-110	-108	-110	-112		-110 典型
接收机前端1 dB增益 压缩点	dBm	-4	-6	-14			-10
接收机调谐饱和电平	dBm		-45				
接收机RF 3 dB带宽	MHz	13	12	345			400 ⁽¹⁾
接收机RF和IF饱和电 平及恢复时间							
多普勒滤波带宽	Hz		95 per bin				
干扰滤除性能		反馈增强 器	⁽⁶⁾				
地理分布		全世界					
使用时间比例		100					

表1 (续)

特性	单位	雷达F1	雷达F2
平台类型 (机载、船载、地面)		地面, ATC	地面, ATC
调谐范围	MHz	2 700-2 900 ⁽⁷⁾	2 700-2 900 ⁽⁷⁾
调制		P0N, Q3N	P0N, Q3N
进入天线的发射机功率 ⁽²⁾		40 kW	160 kW
脉冲宽度	μs	1.0 (SP) 60.0 (LP)	1.0 (SP) ≤ 250.0 (LP)
脉冲升/降时间	μs	0.2 (SP), 3 (LP)	0.2 (SP), 3 (LP)
脉冲重复率	pps	320-6 100 (SP) 320-1 300 (LP) (8)	320-4 300 (SP) 320-1 500 (LP) (8)
占空比	%	0.2 ⁽⁹⁾ -0.6 (SP) ≤ 12.0 ⁽¹⁰⁾ (LP)	0.2 ⁽⁹⁾ -0.4 (SP) ≤ 12.0 ⁽¹⁰⁾ (LP)
线性调频带宽	MHz	3	3
相位编码子脉冲宽度		不适用	不适用
压缩比		180	≤ 750
RF发射带宽 -20 dB -3 dB	MHz	3.2 (SP) / 5.0 (LP) 0.6 (SP) / 1.2 (LP) (11)	3.2 (SP) / 5.0 (LP) 0.6 (SP) / 1.2 (LP) (11)
输出设备		固态	固态
天线辐射图类型 (笔形、扇形、余割平方等)	度	笔形射束覆盖至70 000英尺	笔形射束覆盖至100 000英尺
天线类型 (抛物面、相控阵、缝隙天线阵)		相控阵, 4面 (相控阵, 每面4米直径)	相控阵, 4面 (相控阵, 每面8米直径)
天线极化		水平和垂直线性极化; 圆形	水平和垂直线性极化; 圆形
天线主波束增益	dBi	41	46
天线仰角波束宽度	度	1.6-2.7	0.9-1.5
天线方位波束宽度	度	1.6-2.7	0.9-1.4
天线水平扫描速率	度/秒	不适用	不适用
天线水平扫描类型 (连续、随机、360°、扇区等)		不规则, 以覆盖360°	不规则, 以覆盖360°
天线垂直扫描速率	度/秒	不可用	不可用
天线垂直扫描类型 (连续、随机、360°、扇区等)	度	不规则, 以覆盖所需容量	不规则, 以覆盖所需容量
天线旁瓣 (SL) 电平 (第1 SL和远SL)	dB	发射为17, 接收为25	发射为17, 接收为25

表1 (完)

特性	单位	雷达F1	雷达F2
天线高度	m	可变	可变
接收机IF 3 dB带宽	MHz	1.2, -6 dB (SP)时 1.8, -6 dB (LP)时	1.2, -6 dB (SP)时 1.6, -6 dB (LP)时
接收机噪声系数	dB	< 6	< 6
最小可识别信号	dBm/MHz	-110	-110
接收机前端1 dB增益压缩点	dBm	10	10
接收机调谐饱和电平	dBm	不适用	不适用
接收机RF 3 dB带宽	MHz	200	300
接收机RF和IF饱和电平和恢复时间		13 dBm, < 500 ns	13 dBm, < 500 ns
多普勒滤波带宽	Hz		
使用时间比例	%	100	100

- (1) 有些在2 700-3 100 MHz频段工作。许多这些系统要求在调谐范围内使用一个以上载频才可正常操作。
- (2) 固定系统的操作高达750 kW或1 MW。
- (3) 该雷达使用两个最低间隔为30 MHz的基本载频。
- (4) 取决于范围。
- (5) 以下是多数雷达系统正常功能组成部分的特性：敏感时间控制（STC）、恒虚警率（CFAR）、非对称脉冲滤除和饱和脉冲去除。
- (6) 以下为某些雷达系统提供的特性：可选脉冲重复频率（PRF）、多普勒滤波。
- (7) 当用多用途系统（既发挥航空无线电导航功能，也发挥气象功能）取代气象雷达时，调谐范围为2.7-3.0 GHz。此类雷达的特性和保护标准包含在ITU-R M.1849建议书中。
- (8) 仅在高仰角时使用极高PRF。
- (9) 最低仰角（水平）扫描时的短脉冲占空比为0.2%。
- (10) 脉冲宽度与PRF结合将得到匹配，以便将占空比保持在12%以下。
- (11) -6/-40 dB的RF发射带宽：短脉冲为1.3/ 10.4 MHz；长脉冲为2.0/ 6.2 MHz。

表2

2 700-3 400 MHz频段内无线电定位雷达的特性

特性	单位	雷达I	雷达J	雷达K	雷达L	雷达M
平台类型 (机载、船载、地面)		地面, ATC 海岸空隙填充	2D/3D海上监 控, 地面空中防 御	地面空中防御	多功能, 各种类 型	船载、地面
调谐范围	MHz	2 700-3 400	2 700-3 100	2 700 至 3 100 2 900 至 3 400	整个频段, 25% BW以下	2 700-3 400
操作频率 最小/最大		最小: 2个, 间隔 >10 MHz 最大: 完全 变频	最小: 2个, 间 隔>10 MHz 最大: 完全变频	最小: 固定 最大: 完全变频	最小: 2个, 间 隔>10 MHz 最大: 完全变频	最小: 2个, 间 隔>10 MHz 最大: 完全变频
调制		非线性FM P0N, Q3N	非线性FM P0N, Q3N	非线性FM Q3N	混合	P0N, Q3N

表2 (续)

特性	单位	雷达I	雷达J	雷达K	雷达L	雷达M
进入天线的发射机功率	kW	60典型	60至200	1 000典型	30至100	60至1 000
脉冲宽度	μs	0.4 ⁽¹⁾ 至40	0.1 ⁽¹⁾ 至200	> 100	2以下	0.1至1 000
脉冲升/降时间	μs	10至30典型	10至30典型	未知	未知	> 50 0.05-1.00 ⁽⁶⁾
脉冲重复率	pps	550至1 100 Hz	300 Hz至10 kHz	< 300 Hz	20 kHz以下	300 Hz至10 kHz
占空比	%	2.5最大	10最大	3以下	30最大	20最大
线性调频带宽	MHz	2.5	10以下	> 100	取决于调制	20以下
压缩比		100以下	300以下	不适用	未知	Up to 20 000
RF发射带宽 -20 dB -3 dB	MHz	3.5 2.5	15 10	> 100	未知	25
输出器件		TWT	TWT 或固态	速调管 CFA	有源元素	固态
天线辐射图类型 (笔形、扇形、余割平方等)		余割平方型	笔形射束3D或 余割平方2D	扫略笔形 射束	笔形射束	笔形射束3D 或 余割平方2D
天线类型(抛物面、相控阵、缝隙天线阵)		整形反射器	平面阵列或整形反射器	频率扫描平面阵列或反射器	有源阵列	有源阵列
天线方位射束宽度	度	1.5	1.1至2	通常为1.2	取决于元素数量	取决于元素数量, 通常为1.1至5
天线极化		线性或圆形或交换	线性或圆形或交换	固定线性或圆形	固定线性	混合
天线主射束增益	dBi	33.5典型	40以下	> 40	43以下	40以下
天线俯仰射束宽度	度	4.8	1.5至30	通常为1	取决于元素数量	取决于元素数量, 通常为1至30
天线水平扫描速度	度/秒	45至90	30至180	通常为36	扇形扫描, 瞬间 轮换扫描高达 360	30至360
天线水平扫描类型 (连续、随机、360°、扇区等)	度	连续360	连续360 + 扇形 扫描	连续360 + 扇形 扫描	随机扇形扫描 扇形扫描 + 轮换	连续360 + 扇形 扫描+随机扇形 扫描
天线垂直扫描速度	度/秒	不适用	瞬间	瞬间	瞬间	瞬间
天线垂直扫描类型 (连续、随机、360°、扇区等)	度	不适用	0至45	0至30	0至90	0至90
天线旁瓣(SL)电平 (第1个SL和远端SL)	dB dBi	26 35	> 32 典型 < -10	> 26 典型 < 0	未知	> 32 典型 < -10

表2 (完)

特性	单位	雷达I	雷达J	雷达K	雷达L	雷达M
天线高度	m	4至30	4至20	5	4至20	4至50
接收机IF 3 dB带宽	MHz	1.5长 3.5短	10	未知	未知	10-30
接收机噪声系数 ⁽²⁾	dB	2.0最大	1.5最大	未知	未知	1.5最大
最小可辨别信号	dBm	-123长脉冲 -104短脉冲	未知	未知	未知	未知
接收机前端1 dB增益压缩点. 天线功率密度	W/m ²	1.5×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-6}	1×10^{-3}	5×10^{-5}
接收机调谐饱和电平 天线功率密度	W/m ²	4.0×10^{-10}	1×10^{-10}	未知	未知	1×10^{-10}
接收机RF 3 dB带宽 (MHz)	MHz	400	400	150至 500	高至整个频段	400
接收机RF和IF饱和电平和恢复时间		未知	未知	未知	未知	未知
多普勒滤波带宽		未知	未知	未知	未知	未知
干扰抑制性能 ⁽³⁾		⁽⁴⁾	⁽⁴⁾ 和 ⁽⁵⁾	⁽⁴⁾ 和 ⁽⁵⁾	自适应波束成形 ⁽⁴⁾ 和 ⁽⁵⁾	未知
地理分布		世界范围的可搬运固定站址	世界范围的海军可搬运固定站址	世界范围的可搬运固定站址	世界范围的海军可搬运固定站址	海岸和离岸区域 世界范围的可搬运固定站址
使用时间比例	%	100	取决于任务	取决于任务	取决于任务	100

⁽¹⁾ 未压缩脉冲。

⁽²⁾ 包括馈线损耗。

⁽³⁾ 以下为多数雷达系统正常功能组成部分的特性：STC、CFAR、非对称脉冲滤除、饱和脉冲去除。

⁽⁴⁾ 以下为一些雷达系统具有的特性：可选择PRF、移动目标滤波、变频。

⁽⁵⁾ 旁瓣对消、旁瓣消除。

⁽⁶⁾ 该上升/下降时间对应脉冲宽度为0.1 μs至100 μs的短脉冲。

2.2 接收机

较新一代的雷达系统在对距离、方位和多普勒处理之后采用了数字信号处理。通常包括信号处理的技术是用以增强有用目标的检测以及在显示中产生目标符号。有用目标的增强和识别所采用的信号处理技术也对小于5%的低占空比干扰产生一些抑制，这种干扰异步于有用信号。

此外，采用了线性调频脉冲的和相位编码脉冲的较新一代的雷达中的信号处理对有用信号产生一个处理增益并且还对无用信号产生了抑制。

一些较新的低功率固态发射机使用高占空比的多个接收机信道信号处理，以增强有用信号的回波。有些雷达接收机具有识别低无用信号RF信道和命令发射机在那些RF信道上发射的能力。

总体而言，高峰值功率系统往往一个频率使用一个接收机，因此，具有窄带射频前端。低功率系统往往采用宽带射频前端，在不需要相干超外差接收机遵循调谐的情况下接收所有频率。使用脉冲压缩的系统拥有与扩充脉冲相匹配的IF（中频）带宽，并作为最小信/噪（S/N）劣化的匹配滤波工作。

2.3 天线

抛物反射天线用于2 700-2 900 MHz频段的雷达。ATC雷达具有余割平方仰角方向图和/或笔形射束天线方向图。由于2 700-2 900 MHz频段内的雷达执行搜索、跟踪以及长距离监视功能，因此其天线在水平方向上扫描360°。采用水平极化、垂直极化和圆极化。采用反射型天线的较新一代的雷达具有多个天线阵喇叭。双喇叭被用于发射和接收，以改善表面杂乱情况时的探测。同样，多喇叭、多层波束、反射器天线也用于三维雷达。多喇叭天线可降低干扰程度。通常航空无线电导航和气象雷达天线的高度分别为地面以上8米和30米。

在地面和水上应用方面，通常使用两种相控阵列天线系统的基本架构形式。这两种技术为无源电子扫描阵列（PESA）和有源电子扫描阵列（AESA）。PESA阵列使用高功率发射技术来生成发射信号且这些信号或通过PESA阵列，或由其反射。在该发射或反射过程中，多数可得到调控和成形，以满足逐个不同发射的操作需求。

典型的波束停留时间为数十至数百毫秒。AESA技术是在每一阵列的辐射单元包括大量低峰值功率发射机。该技术依赖其单个功率电平为几瓦到几百瓦的固态设备，其总体结果为很高的辐射功率电平 – 每一单个元素都为波束的形成做出统一一致的贡献。多数移动ESA阵列的孔径范围为小于1平方米到20平方米。固定站址阵列天线往往较大。多数ESA天线在方位角和仰角方面都使用电子调控。一种ESA阵列天线的衍生设备在方位平面使用机械扫描，在仰角平面使用电子调控。这些系统被广泛用于水上和地面应用中。

3 保护标准

来自其他业务的CW、BPSK、QPSK或类噪声型调制在航空无线电导航和气象雷达上的去敏感效应，可断定与它的强度有关。这些干扰到达的任何方位角扇区、其功率谱密度，在一个合理的近似值内，可简单地加到雷达接收机热噪声的功率频谱密度上。如果在没有干扰时雷达接收机噪声的功率频谱密度用 N_0 来表示，而类噪声的干扰用 I_0 表示，那么得出的有效噪声功率频谱密度就简单地变成 I_0+N_0 。

集合因子在某些部署大量台站的通信系统中可能非常重要。有关集合的分析必须考虑到通过雷达天线主和/或旁瓣收到的各方向的累积贡献信号，以便得出总体干扰/噪声（I/N）比。

对脉冲型干扰的影响量化更困难，而它更多地取决于接收机/处理器的设计和工作模式。特别是对有效目标返回差分处理增益，它是同步脉冲型，而干扰脉冲通常是异步的，经常会对已知的脉冲型干扰产生重大的影响。这种去敏作用可造成几种不同形式的性能恶化。在规定的雷达类型之间相互作用的分析将成为对此进行评估的一个目标。通常无线电测定雷达的许多特性都被认为有助于抑制低占空比脉冲型的干扰，特别是来自几个孤立源的干扰。抑制低占空比脉冲型干扰的技术在ITU-R M.1372建议书 -- 无线电导航业务中雷达站对无线电频谱的有效使用 – 中给出。

使用脉冲压缩的系统拥有与压缩脉冲匹配的自身IF带宽，并作为最小S/N劣化匹配滤波工作。可以实现脉冲压缩滤波的部分匹配，因此，提高噪声类干扰效应。在此情况下，可能需要开展进一步研究或采取兼容性措施才能够评估对雷达性能具有操作影响的干扰。

4 操作特性

4.1 航空无线电导航雷达

在世界范围内，空港监控雷达均采用2 700-2 900 MHz频段。表1描述八种类型ATC雷达，即，包括F1和F2在内的雷达A至雷达F。这些雷达进行终端进场的空港监控，通常需要全天24小时进行完整360度的扇形监控。雷达A、C、E和F通常置于空港，且每一主要空港通常都配备有一个或多个类似雷达系统。包括F1和F2在内的雷达A至F是当前得到部署的一代雷达。雷达C和E分别为下一代雷达系统，尽管其中诸多已得到部署而且代表当前采用的技术，在2010年之后，这些应能够提高和/或取代雷达A、B，并最终取代雷达F。雷达D是机场用于ATC的可搬运系统（这些机场没有现有设施）。然而，在世界范围内仍然存在在固定站址上的诸多这类非相干磁电管雷达，其峰值功率通常约为1 MW。雷达D一旦被使用，则一天24小时操作。其中一些这样的雷达采用频率分级模式，因此每个雷达需要两个频率指配，有些情况下需要四个频率指配。雷达F1和F2是空港监控和天气雷达，这些雷达旨在满足航空监控要求，以减缓风力发电机的杂乱回波、监控无人航空器系统并提供增强型航空天气产品。

附件 2

航空无线电导航雷达的测试结果

1 引言

本附件介绍两个主管部门进行的航空无线电导航雷达的测试结果，并得出结论，-10 dB I/N的保护标准可充分保护2 700-2 900 MHz频段中的雷达。一个主管部门的测试结果基于对脉冲多普勒航空无线电导航雷达的测量（其技术特性与附件1表1雷达B的特性类似）。另一个主管部门的测试结果以这样的雷达测量结果为基础，即，其操作特性与附件1表1中雷达D和E的特性类似。

2 雷达B的测试

旨在通过这些测试确定数字通信系统对2 700-2 900 MHz频段内得到主要业务划分的航空无线电导航业务的航空研究无线电导航雷达（附件1表1所示的雷达B）产生的影响。已用这些测试结果确定2 700-2 900 MHz频段内无线电导航雷达与移动业务或现场广播/电子新闻采集系统兼容性评估研究应采用的 I/N 保护标准。该雷达采用ITU-R M.1372建议书确定的干扰缓解技术/处理方法，从而有助于其在存在其他无线电导航、无线电定位和气象雷达时也能操作。如ITU-R M.2032号报告所述，这类技术对于减少或消除雷达之间的脉冲干扰非常有效。

通过这些测试调查了雷达干扰抑制电路/软件的有效性，后者旨在消除采用数字调制方案的通信系统发射所产生的干扰。

2.1 雷达B测试的目的

进行雷达B测试的目的为：

- 量化雷达B的干扰滤除处理能力，以减缓作为其功率电平函数的数字通信系统的无用发射。
- 确立无线电导航雷达收到的无用数字通信系统发射的 I/N 保护标准。
- 观察并量化无线电导航雷达的干扰滤除技术的有效性，以减少虚假目标的数量、径向条纹（选通脉象）和背景噪声。
- 观察并量化无线电导航雷达干扰滤除技术在减少有用目标丢失方面的有效性。

2.2 雷达B的技术和操作特性

主管部门用雷达B监测60 NM（约111 公里）范围内的空港内和空港附近空中交通情况。这一雷达主要参数的标称值源自获得监管机构批准的文件、销售说明书和技术手册。具体见附件1表1。

雷达将其60 NM的操作范围分为1/16个NM间隔（约116 米），方位分为256个约1.4°的间隔，范围 - 方位小区总数为249 088个。在每一1.4°方位间隔内，发射机以恒定PRF发送十个脉冲，然后在另一个更低的PRF上发射八个脉冲。接收机对每套18个脉冲进行处理，以形成18个多普勒滤波。每一个1.4°内PRF的交替有助于消除盲速、由天气隐藏的非眼膜移动目标、消除二次杂乱回波返回并将雷达输出分为约4 483 584个范围 - 方位 - 多普勒小区。

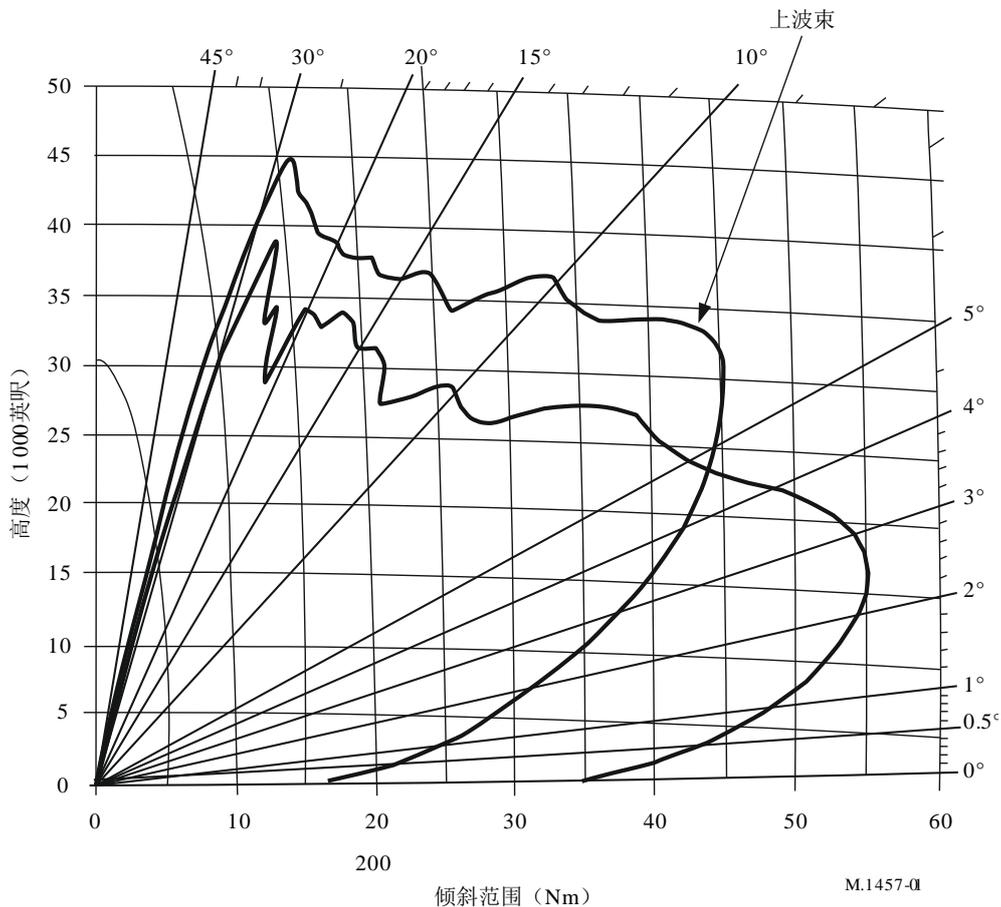
2.3 雷达B的信号处理特性

2.3.1 天线

雷达B采用高波束和低波束喇叭形馈送天线阵列。反射脉冲由天线阵列中的高和低波束喇叭接收，通过微波器件交换、衰减和放大，然而发送至各自的接收机。高波束喇叭接收靠近天线的高目标的返回，低波束喇叭接收距离更远、高度更低的目标返回。高波束路径在短距离上减少杂乱回波强度，以提高次杂乱回波的可见度。在这些测试中，选用了低波束接收机，因为雷达极有可能通过这一路径收到本地地面发射机的干扰。低波束用于在超出15-20 NM（约28-37 公里）的范围内观察目标。这些波束并不同时使用，雷达接收机在它们之间来回切换。图1所示为1 m²目标横截面的高和低波束的覆盖方向图，发现概率等于0.80。

图1

高和低波束覆盖方向图



2.3.2 雷达B的目标接收机

雷达B的目标接收机/处理器使用STC和移动目标发现技术，其中包括多普勒滤波和CFAR处理，以便发现噪声、地面杂乱回波和天气的返回并将其进行分离。目标接收机/处理器按照范围对目标返回进行分类、发现其多普勒漂移并将其发送至雷达系统的后处理器。

2.3.2.1 雷达B的IF电路

中频（IF）接收机对射频（RF）接收机的输出进行放大并发现其相移。IF电路包含三级对数视频检测器/放大器，具有很宽的状态范围和一个I及Q相位检测器。IF放大接收机的输出在31.07 MHz上。经过频扫的CW信号作为输入激励用于雷达接收机，以获得接收机的3 dB带宽 – 在相位检测器输入端测得该带宽约为680 kHz。图2所示为接收机对频扫CW信号的响应。通过改变固定频率CW信号的功率电平并测量同一测试点上IF的电路输出，测量了雷达接收机的动态范围。图3所示为雷达接收机的增益特性。输入信号功率电平达到约-43 dBm时出现压缩点。

图2

雷达B IF选择性曲线

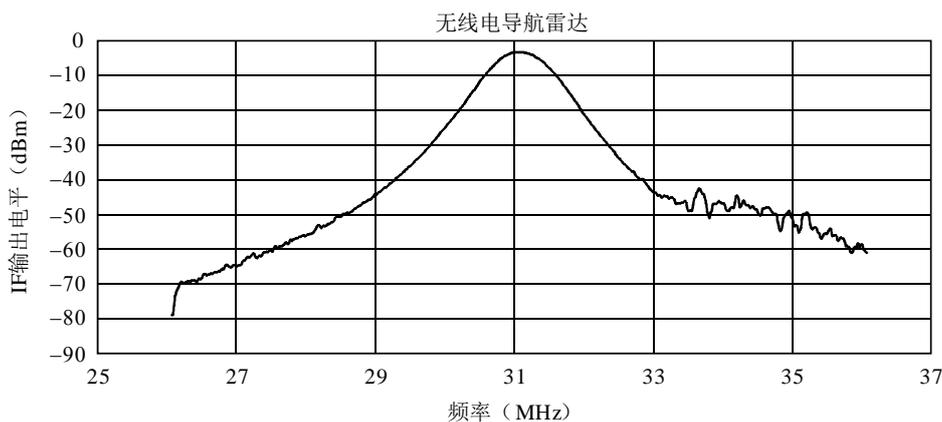
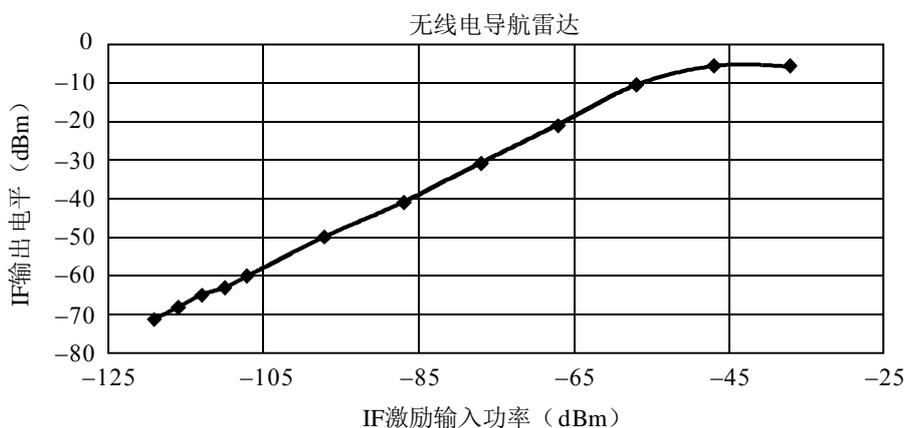


图3

雷达B输入/输出增益曲线



IF放大器输出端的检相器确定返回和发射脉冲产生的返回相位之间的变化（将频率发生器的相干振荡器（COHO）作为发射脉冲相位参考）。每个检相器生产正弦响应并产生相互间具有正弦 – 余弦（90°）相位关系的相内（I）和四相（Q）输出。由于I和Q检相器响应是正弦和余弦函数，因此，可以矢量方式将其输出予以相加，以确定目标返回的实际幅度。由软件实施的伺服环路设定DC偏置、增益平衡以及源自检相器的I和Q输出的相位平衡。它们还设定RF和IF放大器的自动增益控制电平，以限制噪声本身一个量子内的噪声电平（由模数（A/D）转换器的最低有效位输出代表的RF电平变化）。

在每 $0.77\ \mu\text{s}$ （相当于发射脉冲宽度的0.75%）的时间内，A/D转换器对IF电路的I和Q输出进行采样和数字化，涵盖的小区范围为 $1/16\ \text{NM}$ （大约116米），时钟率为2.6 MHz，之后将结果进行内插。A/D转换器输出12位的数字字词，代表到达滤波和幅度处理器I和Q信号的采样。

2.3.2.2 多普勒滤波

在每一 $1/16\ \text{NM}$ 小区范围内，形成相干处理间隔（CPI）（包含10和8个交替的连续脉冲重复间隔返回）。在10个脉冲情况下，与每一连续 $1/16\ \text{NM}$ 范围增量相关的批次被随后用于相同一套10个多普勒滤波。随机存储内存将若干脉冲重复序列上的数字返回重现予以存储，而多普勒滤波器则将其一并处理，以便计算出目标返回幅度（代表明显多普勒频率）的脉冲到脉冲的变化。对于10个脉冲的CPI，使用五个滤波用于检测向雷达天线移动的目标，其他五个滤波则用来检测正在退却的目标。8个脉冲的CPI的程序类似，唯一区别是使用8个滤波。多普勒滤波改善了接收机的 S/N ，因为多普勒滤波在其频率上补充或集成了一系列目标返回，这就使返回信号在滤波器输出端逐步累积，与此同时，滤波器输出端的随机频率噪声累积速度则慢很多。

2.3.2.3 恒虚警率程序

雷达B使用27小区滑动窗口平均（或范围平均）CFAR技术计算平均电平门限值（MLT）。CFAR基于返回信号以及恒定的多普勒滤波噪声输出，在处理过程中自动改变检测门限，以保持虚假目标宣称。每一多普勒滤波都在天线对目标进行扫描时将收到的、返回流所含的能量进行总和。该能量与在同一时间间隔内在滤波中累积的噪声能量相合并。如果滤波器输出端的集成信号加噪声高出MLT，则检测器得出目标存在的结论。

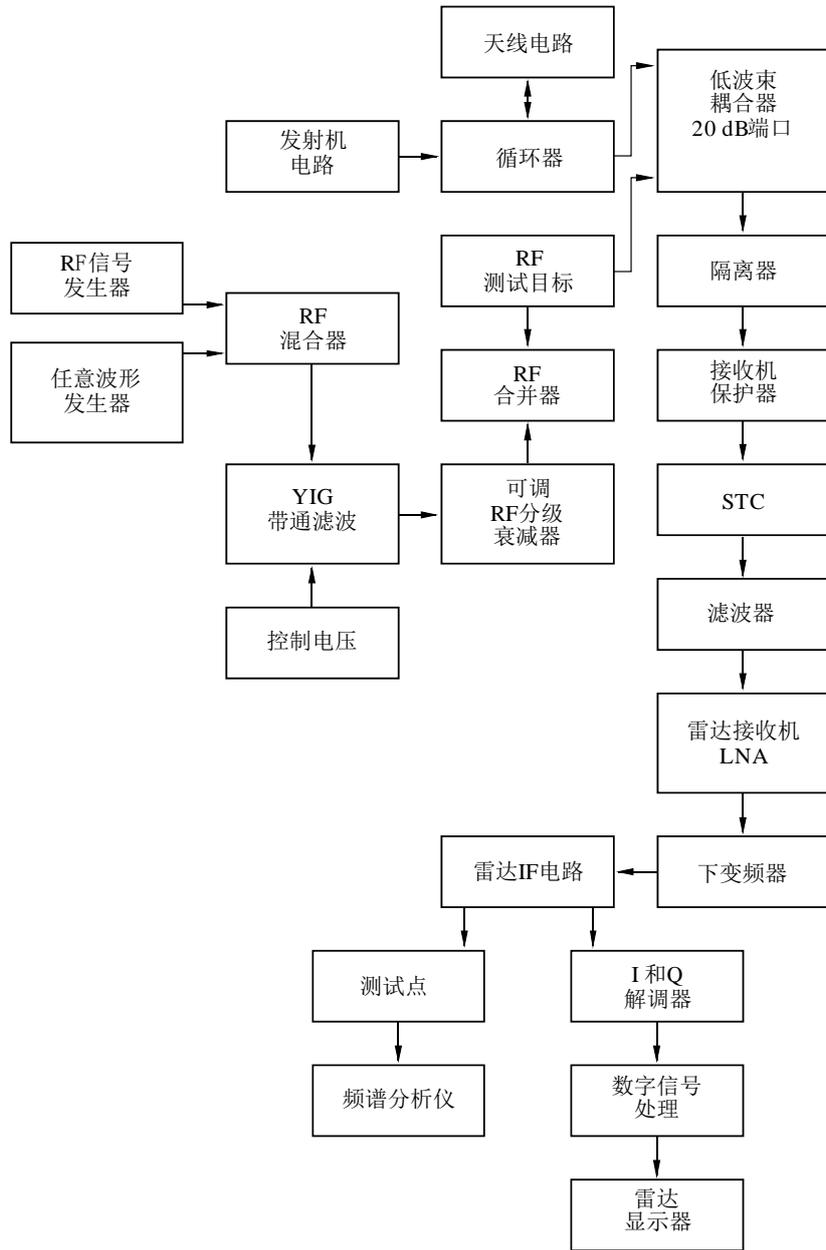
非零速度分辨率小区的门限是通过总和27小区窗口中同一速度滤波的、检测到的信号输出确立的（上述窗口在所涉小区中心），因此，对每一个滤波输出都进行平均，以确立非零速度杂波的平均电平。以适当常数乘以平均电平可确定滤波门限，以得到所需的虚警概率。

随机噪声偶尔会超出MLT，因此，检测器会虚假地表明有目标存在。噪声能量平均电平的检测门限越高，虚警概率就会越低，反之亦然。如果检测门限过高，则可能无法发现有效目标。多普勒滤波器的输出连续得到监测，以保持最佳门限设定。CFAR设定检测门限，以便将每一多普勒滤波的虚警率保持在最佳数值上。涵盖雷达接收机频段的四相移相键控（QPSK）类型波形将同时在所有多普勒滤波器中以噪声出现，迫使CFAR提高检测门限，从而导致所有目标都相应降低了被测到的概率。

2.4 无用信号

在雷达中通过接收机波导路径的20 dB耦合端口将三类信号做为无用发射予以注入（见图4）。信号是未经调制的CW、2 M比特/秒QPSK波形和带有 $1/8$ 时隙站空因素的2 M比/秒QPSK波形。所有三个信号都与雷达的操作频率调谐，并在天线完整 360° 的旋转内出现。

图4
QPSK信号发生器的测试设置



M.1464-04

连续和脉冲式QPSK波形代表预期数字通信系统将使用的信号类型。

采用图4所示的测试设置生成了QPSK信号并将其注入无线电导航雷达接收机中。

使用RF信号发生器对CW信号进行模拟。对于码分多址（CDMA）类型的QPSK波形，设定任意波形发生器的程序，以使其以2 M比/秒的数据速率输出QPSK波形。对于时分多址（TDMA）类型的QPSK波形，使用另一个AWG来实现1/8时隙站空因素的QPSK波形。脉冲的工作时间为577 μs，周期为4.6 ms。

AWG的输出被输入到混合器中，该混合器的另一输入端与RF信号发生器连接。RF信号发生器发挥着本地振荡器的作用，并对其频率进行调整，从而使QPSK波形的载频与雷达接收机实现共调谐。钇铁石榴石（YIG）带通滤波器用来抑制由混合处理造成的任何杂散发射。在YIG滤波器后立即采用RF分级衰减器，以控制QPSK发射的功率电平。

2.5 目标生成和计数

采用雷达内置的测试目标发生器硬件/软件，沿径向生成了十个得到模拟的间隔相等的目标。径向上的这些目标具有恒定封包功率。目标计数是通过雷达的20次旋转进行的。在20次旋转中，产生了200个目标。如果200个目标均被计入，则检测概率 P_d 为100%，如果180个目标被计入，则 P_d 为0.90等等。因此， P_d 的计算是由预期目标（或生成目标）除以被计数目标得出的。目标计数是通过观察雷达ppi上的关联视频输出手动进行的。

2.6 测试条件

测试是按照表3所示的、在航空无线电导航雷达上设定下列参数进行的。

表3
雷达控制设置

参数	设置
STC	关
干扰滤除（IR）	开
自动增益控制	开
选定图像	经处理的视频
范围	60 NM（约111公里）
所需基线目标 P_d	0.90（软件控制）

尽管激活了自动增益控制，但干扰信号功率电平未高到影响其操作的程度。

制造商给出的雷达B的性能规范为55 NM时 1 m^2 目标横截面的目标 P_d 是80%，虚警率 P_{fa} 的概率为 1×10^{-6} 。测试中选择的0.90的所需基线目标 P_d 代表在2 700-2 900 MHz频段内工作的雷达在不远的将来将实现的性能水平（因为更多的处理增益将方便其检测到噪声为雷达接收机噪声底或低于该噪声底的目标）。

2.7 测试程序

对目标生成系统的RF功率输出进行调整，以便使目标 P_d 尽可能（鉴于目标电平只能进行1 dB增量调整）接近90%的基线目标 P_d 、且不存在干扰（对于关联视频目标）。通过20次扫描对目标进行计数，以设定基线 P_d 。由于CFAR处理，因此，雷达在调整目标功率达到稳定状态前进行8-10次扫描。

将雷达设置为基线状态后，在雷达接收机中注入CW和QPSK干扰。将注入雷达接收机中的CW和QPSK信号功率设为不同功率电平，而目标功率电平则保持恒定。CW和QPSK信号的功率电平所设数值可以在雷达接收机IF电路上产生-12、-10、-9、-6、-3、0、+3和+6 dB的I/N电平。为考虑到雷达的CFAR处理，在干扰激活后的十次扫描之前未对目标进行

计数。在进行存在干扰情况下的20次扫描和目标计数后，并在进行下一次 I/N 电平测试前，允许再出现10次扫描。等待10次扫描的出现确保当前测量未受到此前一次测量的影响。

随着CW和QPSK功率电平被改变，观察到雷达显示器上的虚假目标数量、径向条纹（“选通脉冲”）和背景“斑点”增加。

2.8 测试结果

为CW、CDMA-QPSK和TDMA-QPSK无用发射生成了显示目标 P_d 与 I/N 电平的曲线。结果见图5。

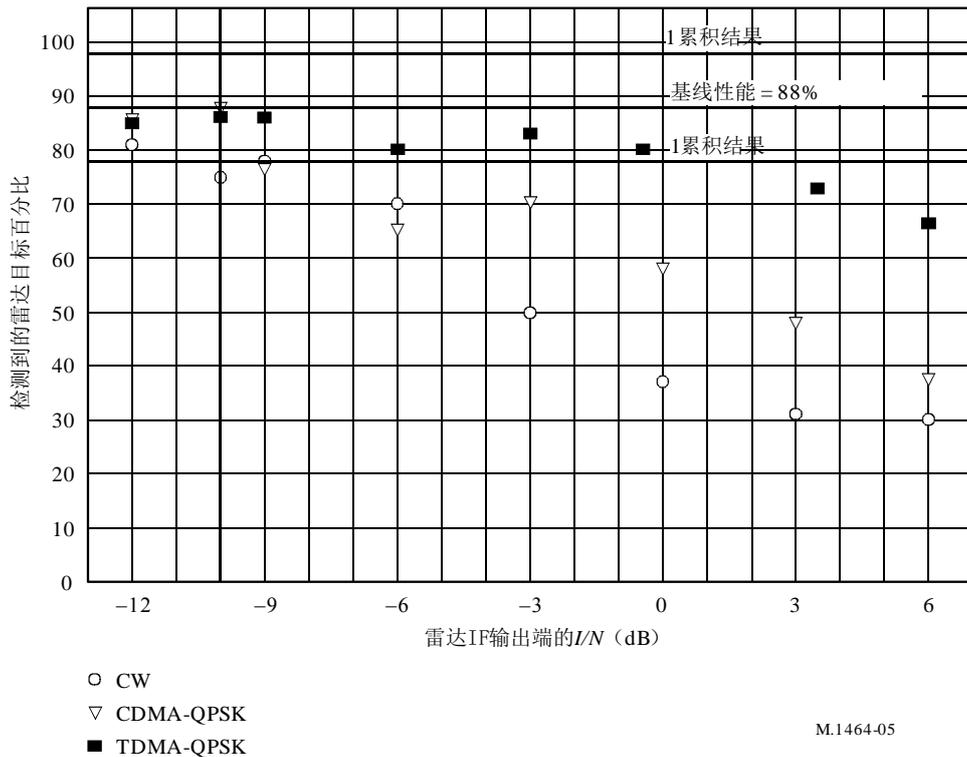
在基线测试（未在雷达中注入干扰）中，雷达每一旋转平均观测到8.8个目标（每次旋转共注入10个目标）。每次测试均观察20次旋转，实际基线目标 P_d 为175/200，或88%。尽管这些测试规定的所需基线目标 P_d 为每一旋转中的十分之九，但控制目标发生器RF输出功率的能力被限为1 dB分级，使得获得确切的0.90 P_d 极为困难。在测试中使用的目标功率设定中，目标功率增加1 dB 即会使 P_d 超过0.95，而减少目标功率1 dB，则 P_d 约等于0.75。

每一旋转中任何给定基线目标计数的差异为1.1个目标。1累积结果数值等于差异的平方，或1.05。基线 P_d 的这一可允许误差规模是平均目标值减去1累积结果值，再除以10。该值为 $(8.8 - 1.05)/10$ ，或 $\pm 10\%$ 。图5所示为88%的基线 P_d ，同时也显示出基于1累积结果数值的 P_d 中允许误差的上限和下限。上限为98%的 P_d ，下限为78%的 P_d 。雷达接收机中带有干扰的可接受 I/N 电平为 I/N 值，其中干扰不会使 P_d 降至低于78%的下限。对于更高的 P_d 而言，1累积结果数值更小，使 I/N 保护更加严格。

图5所示为每一干扰信号类型中目标 P_d 降至低于1累积结果门限值的 I/N 门限值。对于连续的CW和CDMA-QPSK干扰信号类别而言，在 I/N 数值大于-10 dB时，出现这一门限。对于TDMA-QPSK干扰信号而言， P_d 在 I/N 大于0 dB之前不会降低至低于1累积结果线。

图5

检测曲线的目标概率



3 雷达D和E的测试

一个主管部门进行了雷达D和E的测量，测量中将窄带白色噪声和正交频分多址信号做为干扰源来确定对雷达目标 P_d 的影响。航空器被作为机会目标使用。

除 P_d 外，虚警率 P_{fa} 以及精确性也是雷达性能的重要参数，可能受到更多干扰的影响，尽管虚警率在理论上应是恒定不变的，因为视频处理器使用CFAR算法调整检测门限。在这些测试中，只介绍 P_d 结果。

以下各图显示DVB-T信号干扰对空中所有航空器一个雷达的检测概率的影响：

- 40-60 NM（大约74-111公里）（60 NM是雷达的最大检测范围）；
- 高于250飞行高度（25 000英尺，或约为海平面上7 620米）。

必须指出，虽然在该情形中性能损耗当然比邻近雷达的情形更为严重，但还有其他一些影响更坏的情况：

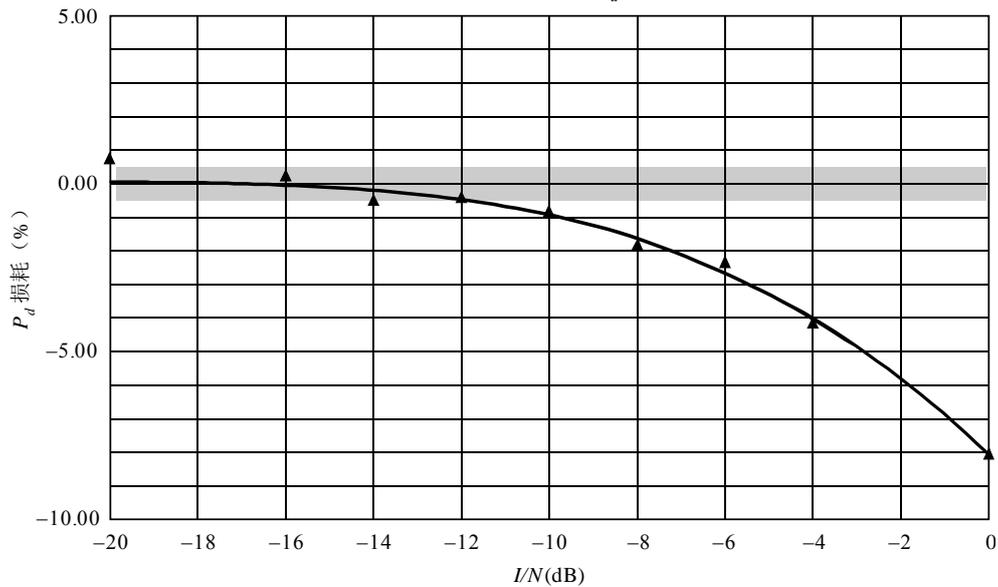
- 仅存在小型航空器（普通民用或军用喷气机）而非各种航空器；
- 飞行高度低（特别是远距离情况下）；
- 仅集中于最大范围（如50-60 NM，或约92-111公里）。

选择上述示例是因为它为稳定的统计分析提供了足够采样。参考数值 – 其 P_d 损耗为0% – 是无任何干扰信号的七次测量的平均 P_d 。这些数值的标准偏差为0.5%，包含测量误差和机会流量数据集浮动产生的影响（在下列各图中由阴影横条表示）。

图6

萨尔斯堡空港监控雷达检测的飞行高度超过250、
且距离超过40 nmi的航空器干扰电平 I/N 与 P_d 损耗

DVB-T信号干扰的 P_d 损耗



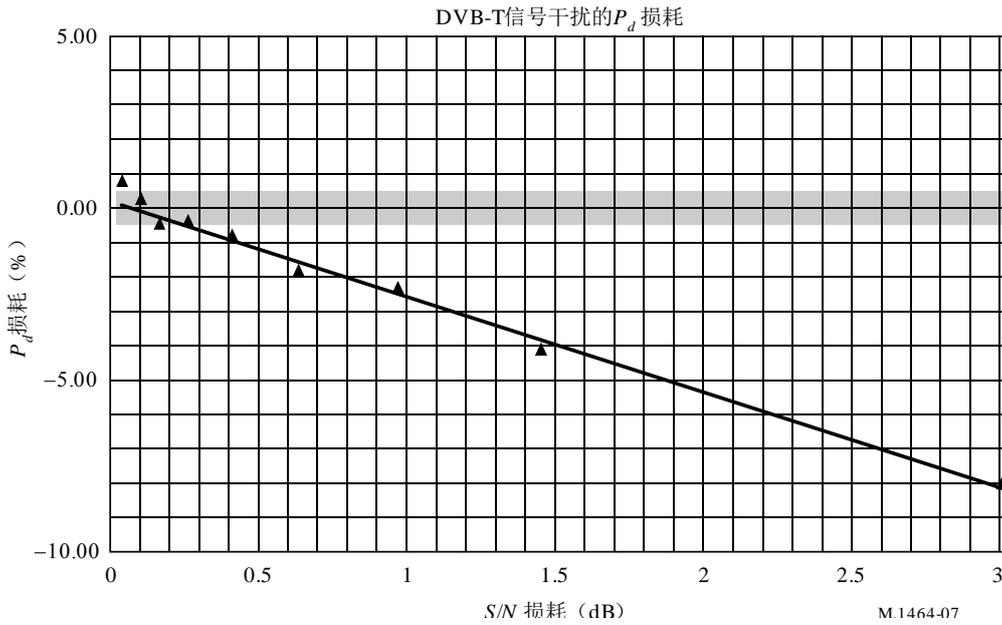
M.1464-06

当 $I/N = -6$ dB时，已出现约2.5%的检测概率损耗，在 -10 dB时，为0.8%，但依然在误差范围之外。内插曲线显示， P_d 降低在 -14 dB时开始出现，并在超过 -10 dB时变得十分严重。图7所示为同样数据，但作为 $\Delta S/N$ 而非 I/N 的函数。 S/N 损耗上 P_d 的敏感性在1%至7% P_d 损耗之间时约为3%/dB。

在另一雷达上进行的测量结果总体相同，唯一例外是，该较旧雷达系统的绝对 P_d （特别是仅使用一个频率信道时）总体低于采用不同数据处理的现代系统的该数值。

图 7

飞行高度在250以上且距离超过40 nm 的航空器的 $\Delta S/N$ 损耗与 P_d 损耗



4 结论

该附件所述的测试结果表明，雷达B、D和E的目标检测能力在 I/N 电平为 -6 dB时已受到影响。为充分保护2 700-2 900 MHz频段内B、D、E类别和其他航空无线电导航雷达免受使用测试数字调制方案通信系统发射的干扰，其 I/N 保护标准应设为 -10 dB。如果存在多重干扰源，则该数值代表集合干扰门限。在2 700-2 900 MHz频段内运行的、采用更小横断面检测和跟踪目标的雷达的未来要求可能会导致产生更严格的保护标准。