

ITU-R RS.2094 报告

**地球探测卫星业务（有源）与无线电测定业务在 9 300-9 500 MHz 和
9 800-10 000 MHz 频带兼容性以及地球探测卫星业务（有源）与固定
业务（定点通信业务）在 9 800-10 000 MHz 频带兼容性的研究**

(2007 年)

目 录

	页码
1 引言	3
2 EESS（有源）	3
2.1 应用	3
2.2 参数	3
3 无线电测定业务	5
3.1 应用	5
3.2 参数	5
4 固定业务	11
4.1 应用	11
4.2 参数	11
5 干扰分析	12
5.1 第 1 项分析研究：无线电测定业务对在 9 300-9 500 MHz 和 9 800-10 000 MHz 频带内 运行的有源航天传感器潜在干扰的评估	12
5.1.1 分析方法	12
5.1.2 分析结果	16
5.1.3 SAR 减扰技术	19
5.1.4 分析结论	20
5.2 第 2 项分析研究：地基气象雷达在 9 300-9 500 MHz 频带内对 EESS（有源） 潜在干扰的评估	21
5.2.1 EESS（有源）模拟参数	21
5.2.2 气象雷达模拟参数	21
5.2.3 结果	21
5.2.4 结论	23

5.3	第 3 项分析研究: EESS (有源) 在 9 300-9 500 MHz 和 9 800-10 000 MHz 频带内 对无线电定位业务最大干扰电平的评价	23
5.3.1	分析方法	23
5.3.2	分析结果	23
5.3.3	减扰讨论	25
5.3.4	分析结论	25
5.4	第 4 项分析研究: EESS (有源) 对在 9 300-9 500 MHz 频带内的无线电定位业务中 运行的地基气象雷达潜在干扰的分析	25
5.4.1	初步分析	26
5.4.2	气象雷达减扰的附加因素	30
5.4.3	结论 — 根据初步分析重新评价数据	34
5.5	第 5 项分析研究: EESS (有源) 在 9 800-10 000 MHz 频带内与固定业务 之间的兼容性研究	36
5.5.1	分析方法	36
5.5.2	分析结果	40
5.5.3	分析结论	44
6	航天 SAR 减扰技术实例	45
6.1	实例 1: 在 9.6 GHz 附近 500 MHz 带宽范围内用于有源航天传感器减扰的 EESS (有源) 发射特性的选择	45
6.1.1	用于减扰的 EESS (有源) 特性选择	45
6.1.2	分析结论	47
6.2	实例 2: 在 9.6 GHz 附近 500 MHz 带宽范围内使用有源航天传感器 SAR3 天线对 EESS (有源) 的减扰技术	47
6.2.1	宽频有源航天传感器 SAR3 天线的技术特性	47
6.2.2	地面雷达系统的技术特性	49
6.2.3	地面站的接收功率剖面	49
6.2.4	分析结论	51
7	总结和结论	51
8	支持文件	51

1 引言

本报告旨在总结地球探测卫星业务（有源）与无线电测定业务在 9 300-9 500 MHz 和 9 800-10 000 MHz 频带兼容性以及地球探测卫星业务（有源）与固定业务（定点通信业务）在 9 800-10 000 MHz 频带兼容性的研究结果。

2 EESS（有源）

2.1 应用

2007 年有五个合成孔径雷达(SAR)计划在 9.6 GHz 附近频带运行。这其中包括了在意大利空间局(ASI)委托制作但尚未发射的在四颗卫星构成的星座上的合成孔径雷达；美国宇航局(NASA)目前正在考虑中的一个标记为“SAR3”的合成孔径雷达。

在 9.6 GHz 附近频带运行的 SAR 可以通过地面的命令来控制开关，由于航天器的功率限制，要求只观察地球上指定的地区。这种运行模式将占到 SAR 发射时间的 10%到 20%。另一种运行模式是聚光灯模式。在聚光灯模式下，将在 20°和 44°之间选择视角，典型的情况下采集到的数据将由 49-65 个距离向上 20 km 方向上 0.35 km 的亚幅宽组成。这种数据可以被放入方位向上的亚幅宽制作成 20 km 乘以 20 km 的图像。

2.2 参数

表 1 给出了在 9 300-10 000 MHz 频带的航天有源传感器的技术特性，表 2 给出了 SAR1 天线增益模式，表 3 给出了 SAR2 天线增益模式，表 4 给出了 SAR3 天线增益模式。

表 1
提议的 SAR 技术特性

参 数	SAR1	SAR2	SAR3
轨道高度 (km)	400	619	506
轨道倾角 (度)	57	98	98
RF 中心频率 (GHz)	9.6	9.6	9.6
峰值辐射功率 (W)	1 500	5 000	25 000
脉冲调制	线性 FM 啁啾	线性 FM 啁啾	线性 FM 啁啾
线性调频带宽 (MHz)	10	400	450
脉冲持续时间 (μs)	33.8	10-80	1-10
脉冲重复速度 (pps)	1 736	2 000-4 500	410-515
占空比 (%)	5.9	2.0-28.0	0.04-0.5
距离向压缩比	338	< 12 000	450-4 500
天线类型	槽波导	平面阵列	平面相控阵列
天线峰值增益 (dBi)	44.0	44.0-46.0	39.5-42.5
e.i.r.p. (dBW)	75.8	83.0	83.5-88.5

表 1 (续)

参 数	SAR1	SAR2	SAR3
天线方向	偏离天底 20°到 55°	偏离天底 34°	偏离天底 20°到 44°
天线波束宽度	5.5° (仰角) 0.14° (方位角)	1.6-2.3° (仰角) 0.3° (方位角)	1.1-2.3° (仰角) 1.15° (方位角)
天线极化方式	线性垂直	线性 HH 或 VV	线性 水平/垂直
系统噪声温度 (K)	551	500	600

表 2

9.6 GHz 附近的 SAR1 天线增益模式

模 式	增益 $G(\theta)$ (dBi) 是离轴角 θ 的函数 (度)	角度范围 (度)
垂直 (仰角)	$G_v(\theta_v) = 44.0 - 0.397(\theta_v)^2$ $G_v(\theta_v) = 24.5$ $G_v(\theta_v) = 9.5$ $G_v(\theta_v) = 22.5$	$\theta_v < 7.1$ $7.1 \leq \theta_v \leq 30$ $30 < \theta_v \leq 60$ $\theta_v > 60$
水平 (方位角)	$G_h(\theta_h) = 0 - 612.2(\theta_h)^2$ $G_h(\theta_h) = -12$ $G_h(\theta_h) = 0 - 27.0(\theta_h)$ $G_h(\theta_h) = -35$	$\theta_h \leq 0.14$ $0.14 < \theta_h \leq 0.44$ $0.44 < \theta_h \leq 1.3$ $\theta_h > 1.3$
波束模式	$G(\theta) = \{G_v(\theta_v) + G_h(\theta_h), -3\}$ 最大	

表 3

9.6 GHz 附近的 SAR2 天线增益模式

模 式	增益 $G(\theta)$ (dBi) 是离轴角 θ 的函数 (度)	角度范围 (度)
垂直 (仰角)	$G_v(\theta_v) = 46.0 - 0.835(\theta_v)^2$ $G_v(\theta_v) = 31.0$ $G_v(\theta_v) = 26.0$ $G_v(\theta_v) = 10.0$	$\theta_v < 3.8$ $3.8 \leq \theta_v \leq 15$ $15 < \theta_v \leq 30$ $\theta_v > 30$
水平 (方位角)	$G_h(\theta_h) = 0 - 444.5(\theta_h)^2$ $G_h(\theta_h) = -16$ $G_h(\theta_h) = -20.0(\theta_h)$	$\theta_h \leq 0.3$ $0.3 < \theta_h \leq 0.7$ $\theta_h > 0.7$
波束模式	$G(\theta) = \{G_v(\theta_v) + G_h(\theta_h), -3\}$ 最大	

表 4
9.6 GHz 附近的 SAR3 天线增益模式

模式	增益 $G(\theta)$ (dBi) 是离轴角 θ 的函数 (度)	角度范围 (度)
垂直 (仰角)	$G_v(\theta_v) = 42.5 - 9.92(\theta_v)^2$ $G_v(\theta_v) = 31.4 - 0.83 \theta_v$ $G_v(\theta_v) = 10.5 - 0.133 \theta_v$	$0 < \theta_v < 1.1$ $1.1 \leq \theta_v < 30$ $\theta_v \geq 30$
水平 (方位角)	$G_h(\theta_h) = 0.0 - 9.07(\theta_h)^2$ $G_h(\theta_h) = +1.9 - 12.08 \theta_h$ $G_h(\theta_h) = -48$	$0 < \theta_h < 1.15$ $1.15 \leq \theta_h < 4.13$ $\theta_h \geq 4.13$
波束模式	$G(\theta) = G_v(\theta_v) + G_h(\theta_h)$	

3 无线电测定业务

3.1 应用

8 500-10 500 MHz 频带在地基、便携式、船载以及机载上由多种不同平台类型的雷达使用。在这个频率范围内开展的无线电测定功能包括机载和地面搜索、地面制图、地形跟随、机载和航海导航、(机载和地基) 气象。

3.2 参数

参考文献[1]给出了无线电测定雷达的特性。这些特性由 10 个机载雷达系统、9 个船载雷达系统和 8 个灯塔/地基雷达系统在 8 500-10 500 MHz 频带运行后提供。在 9 300-10 000 MHz 频带运行的一套有代表性的雷达系统被选择用于下面的研究，表 5、6 和 7 列出了它们的特性。

表 5
8 500-10 500 MHz 频带机载无线电测定雷达的特性

特性	系统 A1	系统 A2	系统 A3
功能	搜索和跟踪雷达 (多功能)	机载搜索雷达	地面制图与地形跟随雷达 (多功能)
微调范围 (MHz)	9 300-10 000	8 500-9 600	9 240, 9 360 和 9 480
调制类型	脉冲	脉冲	非相干频率—可调谐脉冲—位置调制
进入天线的峰值功率 (kW)	17	143 (最小) 220 (最大)	95
脉宽 (μ s) 和脉冲重复速度	0.285; 8 200 到 23 000 pps	2.5; 0.5 400 和 1 600 pps	分别为 0.3, 2.35 和 4 2 000, 425 和 250 pps
最大占空比	0.0132	0.001	0.001

表 5 (续)

特 性	系统 A1	系统 A2	系统 A3
脉冲升/降时间 (μs)	0.01/0.01	0.02/0.2	0.1/0.1
输出设备	大功率行波管	调谐磁控管	空腔谐振器
天线模式类型	笔式	扇式	笔式
天线类型	平面阵列	抛物线反射器	平板面阵列
天线极化方式	线性极化	线性极化	圆极化
天线主波束增益 (dBi)	32.5	34	28.3
天线仰角波束宽度 (度)	4.6	3.8	5.75
天线方位角波束宽度 (度)	3.3	2.5	5.75
天线水平扫描速度	118 次扫描/分钟	6 或 12 rpm	最高 53 次扫描/分钟
天线水平扫描类型 (连续、随机、扇区等)	扇区: $\pm 60^\circ$ (机械的)	360° (机械的)	扇区: $\pm 60^\circ$ (机械的)
天线垂直扫描速度	59 扫描/分钟	不适用	最高 137 扫描/分钟
天线垂直扫描类型	扇区: $\pm 60^\circ$ (机械的)	不适用	扇区: $+25/-40^\circ$ (机械的)
天线旁瓣 (SL) 电平 (第一个 SL 和远端 SL)	在 15° 7.5 dBi	非特定	在 10° 5.3 dBi
天线高度	飞机高度	飞机高度	飞机高度
接收机 IF 3 dB 带宽 (MHz)	3.1; 0.11	5	5.0, 1.8 和 0.8
接收机杂音数 (dB)	非特定	非特定	6
最小可识别信号 (dBm)	-103	-107; -101	-101
总线性调频宽度 (MHz)	不适用	不适用	不适用
RF 发射带宽 (MHz)			(频率和脉宽相关)
— 3 dB	3.1; 0.11	0.480; 2.7	100 到 118
— 20 dB	22.2; 0.79	1.5; 6.6	102 到 120

表 5 (续)

特 性	系统 A7d	系统 A8	系统 A10
功能	导航	搜索 (无线电定位) 气象	气象回避, 地面制图, 搜索
微调范围 (MHz)	灵活脉冲间频率 340 MHz 以上	9 250-9 440, 频率—可调谐 脉冲间, 20 MHz 步距	预热脉冲: 9 337 和 9 339 (在每次运行此脉冲前) 运行脉冲: 9 344
调制类型	线性 FM 脉冲	FM 脉冲	脉冲
进入天线的峰值功率	50 kW	10 kW	26 W (14 dBW)
脉宽 (μs) 和 脉冲重复速度	10 大约 380 pps	5 和 17 2 500, 1 500, 750 和 400 pps (所有脉宽)	9 337 和 9 339 MHz: 1-29 μs 2 200-220 pps (抖动) 对所有脉宽; 9 344 MHz: 1.7-2.4, 2.4-4.8, 4.8-9.6, 17, 19 和 29 μs 2 200-220 pps (抖动)
最大占空比	0.004	0.04	9 337 和 9 339 MHz: ≤0.064 9 344 MHz: ≤0.011 (17 μs 脉冲)
脉冲升/降时间 (μs)	0.1/0.1	0.1/0.1	9 337 和 9 339 MHz: 0.3/0.2 9 344 MHz: 0.5/0.5
输出设备	大功率行波管	大功率行波管	IMPATT 二极管
天线模式类型	笔/扇式	扇式	笔式
天线类型	抛物线反射器	槽阵列	平面阵列
天线极化方式	水平	垂直和水平	水平
天线主波束增益 (dBi)	34.5	32	29
天线仰角波束宽度 (度)	4.0	9.0	<10
天线方位角波束宽度 (度)	2.4	1.8	7
天线水平扫描速度	36, 360, 1800°/s	15 或 60 rpm	30°/s
天线水平扫描类型 (连续、 随机、扇区等)	10° 扇区	360°	60 或 120°扇区
天线垂直扫描速度	不适用	不适用	不适用
天线垂直扫描类型 (连续、 随机、扇区等)	可选倾斜 0°-90°	可选倾斜 +15°/-15°	选定操作器倾斜: ±30°
天线旁瓣 (SL) 电平 (第一 个 SL 和远端 SL)	14.5 dBi 在 12°	20 dBi	+13.9 dBi
天线高度	飞机高度	飞机高度	飞机高度
接收机 IF 3 dB 带宽 (MHz)	非特定	16	2.0
接收机杂音数 (dB)	5	非特定	2
最小可识别信号 (dBm)	与处理增益有关 (回波脉冲 17 dB)	-98	-128 (处理后探测灵敏度)
总线性调频宽度 (MHz)	5	10	不适用
RF 发射带宽 (MHz)			-3 dB: 9 337 和 9 339 MHz: 0.7 9 344 MHz: 0.4, 0.25, 0.150, 0.075, 0.08 和 0.05 -20 dB: 9 337 和 9 339 MHz: 3.6 9 344 MHz: 1.8, 1.5, 0.8, 0.375, 0.35 和 0.2
— 3 dB	4.5	9.3	
— 20 dB	7.3	12	

表 6

8 500-10 500 MHz 频带车载无线电测定雷达的特性

特 性	系统 S1	系统 S3	系统 S4	
功能	搜索和导航雷达	低空和地表搜索雷达 (多功能)	海上无线电导航雷达	
平台类型	船载, 海岸训练区	船载	船载	
微调范围 (MHz)	8 500-9 600	8 500-10 000	9 375 ± 30 和 9 445 ± 30	
调制类型	脉冲	频率—可调谐脉冲	脉冲	
进入天线的峰值功率 (kW)	35	10	5 (最小)	50 (最大)
脉宽 (μs) 和 脉冲重复速度	0.1; 0.5 1 500; 750 pps	0.56 到 1.0; 0.24 19 000 到 35 000 pps; 4 000 到 35 000 pps	0.03 (最小) 4 000 pps (最大)	1.2 (最大) 375 pps (最小)
最大占空比	0.00038	0.020	0.00045	
脉冲升/降时间 (μs)	0.08/0.08	0.028/0.03; 0.038/0.024	非特定	
输出设备	磁控管	大功率行波管	磁控管	
天线模式类型	扇式	笔式	扇式	
天线类型	喇叭阵列	槽阵列	槽阵列	
天线极化方式	线性	线性	非特定	
天线主波束增益 (dBi)	29	39	27 (最小)	32 (最大)
天线仰角波束宽度 (度)	13	1	20.0 (最小)	26.0 (最大)
天线方位角波束宽度 (度)	3	1.5	0.75 (最小)	2.3 (最大)
天线水平扫描速度	9.5 rpm	180°/s	20 (最小)	60 (最大)
天线水平扫描类型 (连续、随机、 扇区等)	360° (机械的)	360°或扇区搜索/跟踪(机械 的)	360°	
天线垂直扫描速度	不适用	不适用	不适用	
天线垂直扫描类型	不适用	不适用	不适用	
天线旁瓣 (SL) 电平 (第一个 SL 和远端 SL)	非特定	23 dBi (第一个 SL)	-4 dBi ≤ 10° (最小) -13 dBi ≥ 10° (最小)	9 dBi ≤ 10° (最大) 2 dBi ≥ 10° (最大)
天线高度	杆/座架设置	杆/座架设置	杆/座架设置	
接收机 IF (MHz)	非特定	非特定	45 (最小)	60 (最大)
接收机 IF 3 dB 带宽 (MHz)	12	2.5; 4; 12	6; 2.5 (最小) (分别为短脉 冲和长脉冲。)	28; 6 (最大) (分别为短脉 冲和长脉冲。)
接收机杂音数 (dB)	非特定	9	3.5 (最小)	8.5 (最大)
最小可识别信号 (dBm)	-96	-102; -100; -95	-106 (最小)	-91 (最大)
线性调频带宽 (MHz)	不适用	不适用	不适用	
RF 发射带宽 (MHz)				
— 3 dB	10; 5	1.6; 4.2	非特定	
— 20 dB	80; 16	10; 24	非特定	

表 6 (续)

特 性	系统 S6	系统 S7	系统 S9	
功能	海上无线电导航雷达	导航和搜索	海上无线电导航雷达	
平台类型	船载	船载	船载	
微调范围 (MHz)	9 380-9 440	9 300-9 500	9 410± 30	9 445 ± 30
调制	脉冲	脉冲	脉冲	
进入天线的峰值功率 (kW)	25	1.5	1.5-10	
脉宽 (μs) 和 脉冲重复速度	0.08, 0.2, 0.4, 0.7 和 1.2 2 200 pps (0.08 μs); 1 800, 1 000 和 600 pps (1.2 μs)	0.08, 0.25 和 0.5 2 250, 1 500 和 750 pps	0.08 (最小) 3 600 pps	1.2 (最大) 375 pps
最大占空比	0.00072	0.000375	0.00045	
脉冲升降时间 (μs)	0.010/0.010	0.01/0.05	非特定	
输出设备	磁控管	磁控管	磁控管	
天线模式类型	扇式	扇式	扇式	
天线类型	端点馈电槽阵列	中点馈电槽波导	槽/片状阵列或喇叭	
天线极化方式	水平	水平	水平	
天线主波束增益 (dBi)	31	23.9	22-30	
天线仰角波束宽度 (度)	20	25	24-28	
天线方位角波束宽度 (度)	0.95	6	1.9-7	
天线水平扫描速度	24 rpm	24 rpm	24 rpm	
天线水平扫描类型 (连续、随机、扇区等)	360°	360°	360°	
天线垂直扫描速度	不适用	不适用	不适用	
天线垂直扫描类型	不适用	不适用	不适用	
天线旁瓣 (SL) 电平 (第一个 SL 和远端 SL)	非特定	+2.9 dBi	22 dBi 主波束: 3 到 4 dBi, 10°之内; 0 到 3 dBi, 10°以外 30 dBi 主波束: 7 到 10 dBi, 10°之内; -2 到+7 dBi, 10°以外	
天线高度	杆	杆	杆	
接收机 IF (MHz)	非特定	非特定	45-60	
接收机 IF 3 dB 带宽 (MHz)	15	10 和 3	2.5-25	
接收机杂音数 (dB)	6	6	4 到 8	
最小可识别信号 (dBm)	-97 (噪声水平)	-102 (噪声水平)	非特定	
总线性调频宽度 (MHz)	不适用	不适用	不适用	
RF 发射带宽 (MHz)			非特定	
— 3 dB	14	20		
— 20 dB	43	55		

表 7

8 500-10 500 MHz 频带灯塔与地基无线电测定雷达的特性

特 性	系统 G2	系统 G3	系统 G9
功能	聚集灯塔发射机应答器	跟踪雷达	气象（无线电定位）
平台类型	地面（手提式）	地面（拖车）	地面
微调范围（MHz）	9 375 和 9 535 (Rx); 9 310 (Tx)	9 370-9 990	9 300-9 375 MHz
调制类型	脉冲	频率—可调谐脉冲	脉冲
进入天线的峰值功率	20 到 40 W	31 kW	50 kW
脉宽（ μ s）和 脉冲重复速度	0.3 到 0.4 不到 20 000 pps	1 7 690 到 14 700 pps	0.1, 0.25 和 1.0 1 000 到 2 000 pps
最大占空比	0.008	0.015	0.002
脉冲升/降时间（ μ s）	0.10/0.15	0.05/0.05	0.05
输出设备	固态	大功率行波管	Klystron 或磁控管
天线模式类型	正方形	笔式	笔式波束
天线类型	印制电路阵列	相控阵列 （线性槽波导）	馈源卡氏抛物面反射器
天线极化方式	圆	线性	线性（双极化）
天线主波束增益（dBi）	13	42.2	46
天线仰角波束宽度（度）	20; 3	0.81	0.9
天线方位角波束宽度（度）	65; 10	1.74	0.9
天线水平扫描速度	不适用	非特定	0 到 20°/s
天线水平扫描类型（连续、随机、 扇区等）	不适用	扇区： $\pm 45^\circ$ （相位扫描）	体，扇体，静态和跟踪
天线垂直扫描速度	不适用	非特定	0 到 20°
天线垂直扫描类型	不适用	扇区： $90^\circ \pm$ 阵列倾斜（频 率—扫描）	水平旋转后到下个海拔的 或者方位固定不变海拔的 变化
天线旁瓣（SL）电平（第一个 SL 和远端 SL）	0 dBi（第一个 SL）	非特定	26 dBi
天线高度	地面电平	地面电平	4 m
接收机 IF 3 dB 带宽（MHz）	40	1	10, 4 或 1
接收机杂音数（dB）	13	非特定	-110
最小可识别信号（dBm）	-65	-107	非特定
线性调频带宽（MHz）	不适用	不适用	不适用
RF 发射带宽（MHz） — 3 dB — 20 dB	4.7 11.2	0.85 5.50	非特定 6 到 60 MHz — 与脉宽相 关

4 固定业务

4.1 应用

ITU-R F.758-3 建议书里只列出了固定业务（FS）系统配置在波谱常规部分的不同参数，但是没有特别给出 9 800 到 10 000 MHz 频带固定业务系统的说明。假设在这个频带固定业务可能以微波点对点中继运行。

4.2 参数

ITU-R F.758-3 建议书里只列出了固定业务（FS）系统配置在波谱常规部分的不同参数，但是没有特别给出 9 800 到 10 000 MHz 频带固定业务系统的说明。本报告的研究中假设列出的在 10.6-10.68 GHz 频带的点对点固定业务（P-P FS）系统参数适用于 9 800 到 10 000 MHz 频带。这样的系统在城市和郊区配置中占主导地位，但是在假设的共用研究中没有系统数量或者信道计划方面的具体信息。由于缺乏更多的确定信息，因此假设每个信道只用一次。然而，应当注意对于在此频带内实现的固定业务系统，主要城市地区的信道可以多次使用。

表 8 给出了点对点固定业务参数。

表 8
点对点固定业务系统参数

参 数	值
调制类型	FSK, QPSK
容量	16 Mbit/s
信道间隔 (MHz)	14
天线增益 (最大) (dBi)	49
天线模式	ITU-R F.1245-1 建议书
损耗/多路复用损耗 (最小) (dB)	0
天线类型	碟形
最大发射输出功率 (dBW)	-2
e.i.r.p. (最大) (dBW)	47
接收机 IF 带宽 (MHz)	14
接收机杂音数 (dB)	3
接收机热噪声 (dBW)	-129.5
接收机名义输入电平 (dBW)	-60
对于 1×10^{-3} BER (dBW)的接收机输入电平	-114

5 干扰分析

5.1 第 1 项分析研究：无线电测定业务对在 9 300-9 500 MHz 和 9 800-10 000 MHz 频带内运行的有源航天传感器潜在干扰的评估

5.1.1 分析方法

通过计算机建模来计算到达航天 SAR 有源传感器接收机的无线电测定系统与时间相关的干扰功率。这样建模可以统计干扰超出某个干扰功率电平的概率以及 SAR 接收机上最大干扰功率电平。

ITU-R RS.1166 建议书规定了航天有源传感器的性能和干扰标准。在 9 500-9 800 MHz 频带进行的干涉 SAR 地形测绘中不能接受的性能退化标准是峰值功率电平 -104 dB(W/20 MHz) ，对 SAR3 雷达是峰值功率电平 $-89.9\text{ dB(W/512 MHz)}$ 。这个标准适用于脉冲持续时间不超过 $2\ \mu\text{s}$ 的非 FM 脉冲干涉源。对于脉冲长度不超过 $2\ \mu\text{s}$ ，衍生的干涉门限值是 -102 dB(W/20 MHz) ；然而，对于这种分析目的，最坏情形下使用的干扰标准是 -104 dB(W/20 MHz) 。

ITU-R RS.1166 建议书中也给出了如下所列的可用性标准：“在共用频带，SAR 数据可用于 99% 以上的所有地理位置目标或者覆盖全球的地形测绘。”

进行了两项模拟。第一项模拟假设与中心频率为 9 600 MHz 的 SAR 同极化同信道频率运行，SAR 接收机 IF 带宽 512 MHz。第二项模拟采用频率限制 (FDR)。模拟中的干扰电平通过一个单一干扰源计算，并且对 1 000 个随机分布雷达系统合并干扰电平。

为了确定多雷达系统对 SAR3 运行的影响，假设 10 个有代表性的雷达系统在全世界范围内各有 100 套配置，共计配置有 1000 套雷达系统。

在从南纬 60° 到北纬 70° ，从西经 180° 到东经 180° 的范围内统一进行雷达系统的随机配置。雷达系统的随机配置有一个轻微的改动，以使所有固定雷达置于地面，船载雷达置于海洋、湖泊或者河流。机载雷达随机置于全球海拔在 1 km 到 10 km 范围内的任何高度。

雷达发射天线仰角如下设初值，模拟期间保持静止状态。

- 雷达 A1 — 在 $\pm 60^\circ$ 之间随机选择仰角
- 雷达 A2 — 所有雷达 A2 仰角为 0°
- 雷达 A3 — 在 -40° 到 $+25^\circ$ 之间随机选择仰角
- 雷达 A7d — 在 -90° 到 0° 之间随机选择仰角
- 雷达 A8 — 在 $\pm 15^\circ$ 之间随机选择仰角
- 雷达 G3 — 在 0° 到 90° 之间随机选择仰角
- 雷达 S1 — 所有雷达 S1 仰角为 3°
- 雷达 S3 — 所有雷达 S3 仰角为 0°

- 雷达 S6 — 所有雷达 S6 仰角为 5°
- 雷达 S7 — 所有雷达 S7 仰角为 8°

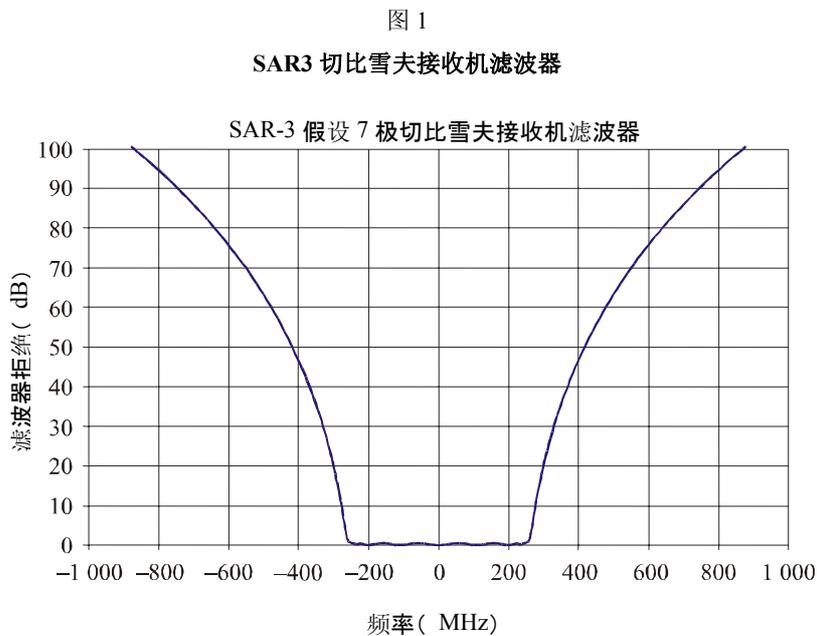
表 5、6 和 7 列出了每个雷达发射天线的方位向扫描速度，初始方位在 $\pm 180^\circ$ 之间随机选择。每部机载或者船载雷达朝向也在 $\pm 180^\circ$ 之间随机选择。

在采用 FDR 的模拟中，SAR 接收频率设置为 9 600 MHz，发射雷达频率每次采样时在雷达调谐范围内随机变化，如表 5、6 和 7 所列。FDR 值用分贝表示，用下文所述的方法获得，并用于干扰计算。

所有模拟都运行 10 天，时间增量步距为 3 秒。每次增加，每个雷达天线的方位角和仰角由天线扫描速度确定。通过 SAR 轨道参数和雷达站位置计算接收机和雷达发射机之间的距离。用 ITU-R M.1461-1 建议书中附件 1 中的公式 (15) 和 (16) 计算雷达站对受害 SAR 的干扰功率。

本分析中使用的 FDR 是雷达发射信号被 SAR3 接收机衰减的量。衰减由两部分组成：微调拒绝 (OTR) 与偏频拒绝 (OFR)。FDR 根据 ITU-R SM.337-4 建议书频率与距离分别计算。

如图 1 所示，假设 SAR3 接收机是一个频带中心位于 9.6 GHz、中频 (IF) 3 dB、带宽 512 MHz 的 7 极切比雪夫滤波器。



Rap 2094-01

为了确定每个雷达发射机的功率波谱密度，采用了 ITU-R SM.1541 建议书中附件 8 (主要雷达系统 OoB 域发射极限) 计算 40 dB 带宽的雷达发射脉冲。表 9 列出了计算雷达发射谱掩模的雷达参数。从图 2 单侧雷达谱图可见每次退化带宽从 40 dB 转变为 20 dB。

表 9

ITU-R SM.1541-1 RF 波谱所需的雷达参数

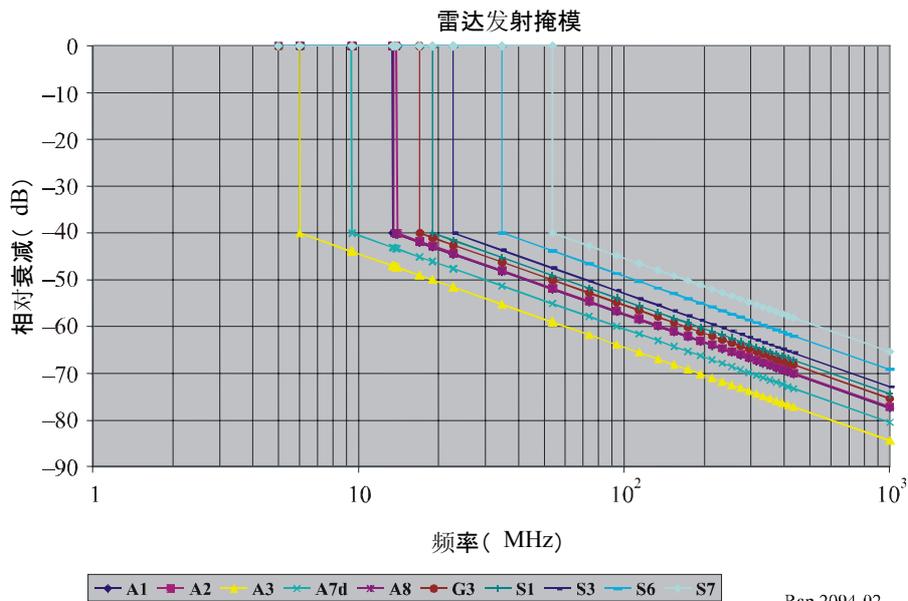
	雷 达 系 统									
	A1	A2	A3	A7d	A8	G3	S1	S3	S6	S7
峰值发射功率 (kW)	17	143	95	50	10	31	35	10	25	1.5
调制类型	脉冲	脉冲	脉冲	LFM	LFM	脉冲	脉冲	脉冲	脉冲	脉冲
脉冲长度 (μs)	8.00	2.50	4.0	10.0	17.0	1.0	0.5	1.0	1.2	0.5
脉冲上升时间 (μs)	0.010	0.020	0.100	0.100	0.100	0.050	0.080	0.028	0.010	0.010
脉冲下降时间 (μs)	0.010	0.020	0.100	0.100	0.100	0.050	0.080	0.030	0.010	0.050
线性调频宽度 (MHz)	N/A	N/A	N/A	5	10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

LFM: 线性频率调制

N/A: 不适用

图 2

雷达发射谱图



Rap 2094-02

图 3 给出了 ITU-R SM.337-4 建议书中用于产生 FDR 结果图的公式。有相似 FDR 结果的雷达组合到一张图中。组合图中包括雷达 A1、A2 和 A8；雷达 A3 和 A7d；雷达 G3 和 S1。而雷达 S3、S6 和 S7 单一绘图。

从图 3 中部可见，对于频率区间在±250 MHz 之间的 FDR 值可以忽略。因为 SAR3 IF 带宽比雷达发射机带宽要大，FDR 公式中的微调拒绝成分可以忽略。FDR 计算的主要贡献来自 SAR3 接收中心频率与雷达发射中心频率之间漂移产生的偏频拒绝。根据图 3 中 FDR 结果产生的查找表列出了 FDR 对漂移频率用于在每个模拟时间步距随机变化雷达发射频率的模拟。

图 3
SAR3 频率相关拒绝 (FDR)

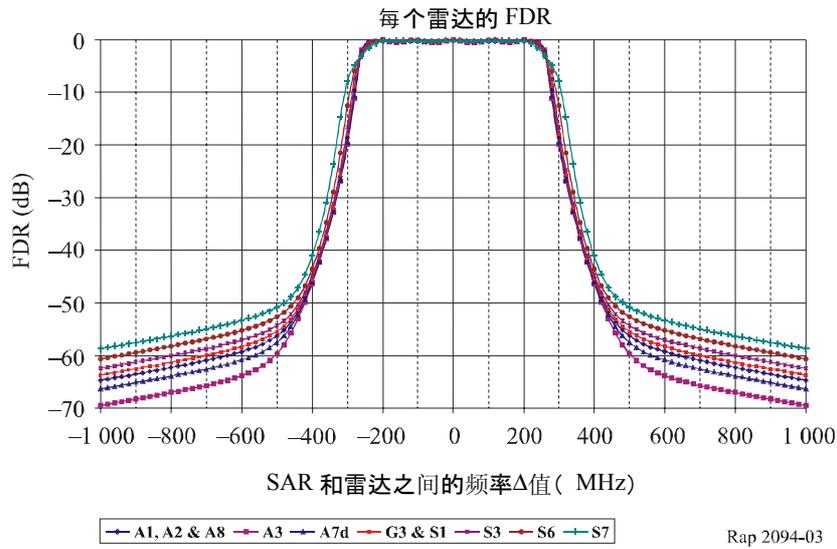
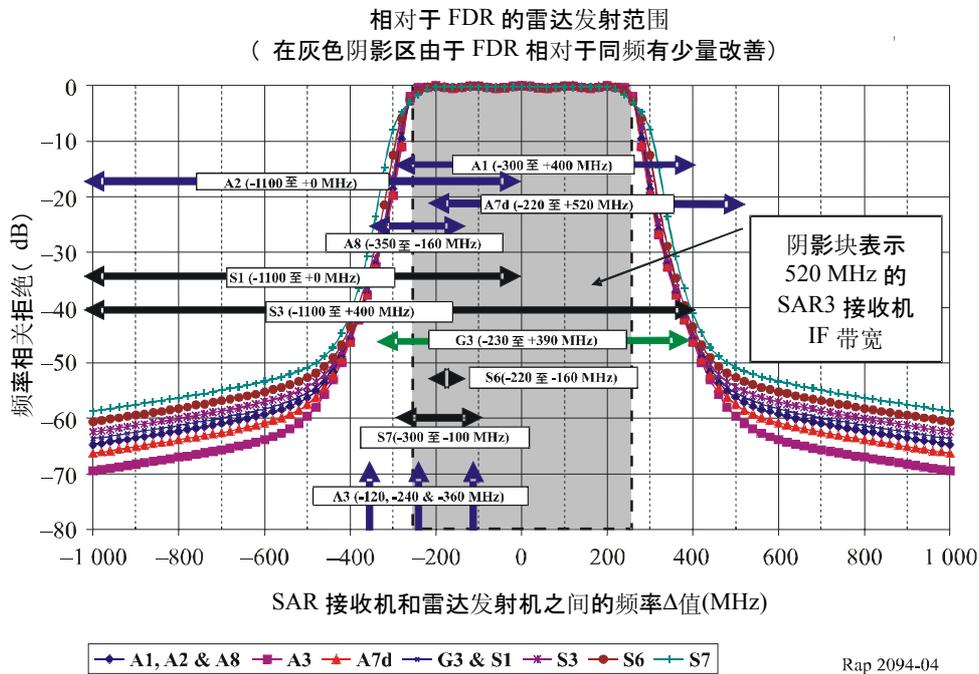


图 4 给出了雷达中心频率跳跃的变动范围。如果选择的雷达频率在阴影区，那么在同频和 FDR 分析情形之间将没有明显差别。在灰色区域以外，FDR 增加导致在 SAR 接收机的干扰功率电平降低。

图 4
SAR3 FDR 和雷达发射调谐范围的比较



5.1.2 分析结果

这部分给出下面的分析结果：

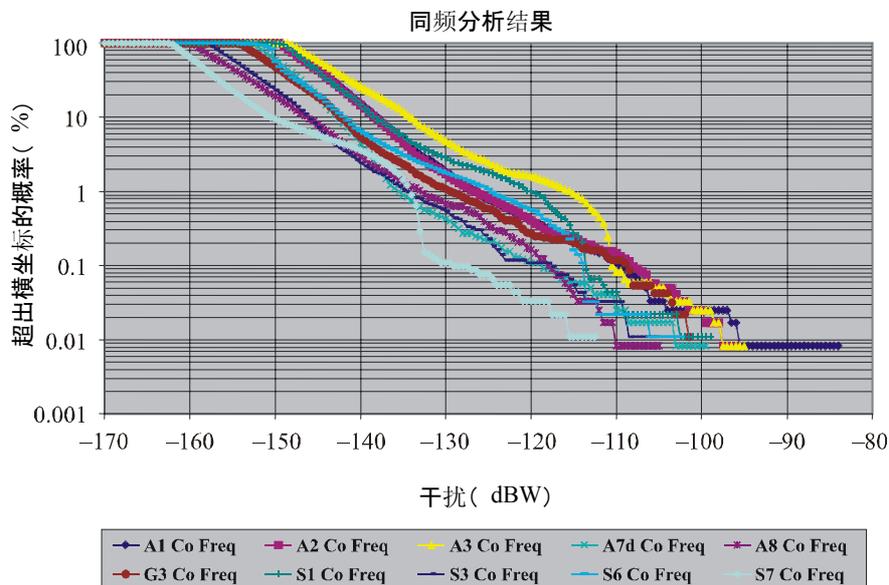
- a) 同频分析确定：
 - 每部雷达系统对 SAR3 的单一干扰的电平
 - 1 000 部随机分布的雷达系统对 SAR3 的总干扰的电平
- b) 频率相关拒绝 (FDR) 分析确定：
 - 每部雷达系统对 SAR3 的单一干扰的电平
 - 1 000 部随机分布的雷达系统对 SAR3 的总干扰的电平

5.1.2.1 同频分析 — 单一干扰的情形

图 5 给出了机载、船载和地基 SAR 发射机对航天 SAR 干扰的累积分布函数图。表 10 提供了用 1%溢出电平和最大干扰电平表示的干扰统计的总结。模拟雷达的最大干扰电平远低于航天 SAR 干扰标准 $-89.9 \text{ dB(W/512 MHz)}$ ，除了 A1 雷达系统在不足 0.01%的时间里超过了这一标准。统计数据中包含了在这些模拟中所有超过 -300 dBW 的干扰值。假设在所有低于 -300 dBW 的干扰值出现时，SAR3 和雷达之间互不可见。

每次模拟运行，雷达从北纬 40° 西经 97° 的固定位置连续发射。

图 5
雷达单次干扰结果



Rap 2094-05

表 10
对 SAR3 的单次雷达干扰同频分析的总结

雷 达	1.0%门限干扰值 (dBW)	最大干扰值 (dBW)
机载雷达		
A1	-126.5	-84.0
A2	-127.0	-96.0
A3	-115.5	-95.5
A7d	-135.5	-99.5
A8	-133.0	-105.0
船载雷达		
S1	-120.0	-99.5
S3	-135.0	-106.0
S6	-125.0	-102.5
S7	-133.5	-113.0
地基雷达		
G3	-129.5	-102.0

5.1.2.2 同频分析 — 多次干扰的情形

图 6 给出了总共 1 000 部机载、船载和地基雷达发射机对航天 SAR 总干扰的累积分布函数图。表 11 提供了用 1%溢出电平和最大干扰电平表示的干扰统计的总结。从图 6 中可见，0.018%的时间里超出航天 SAR 干扰标准。

图 6
1 000 部雷达的总干扰结果的同频分析

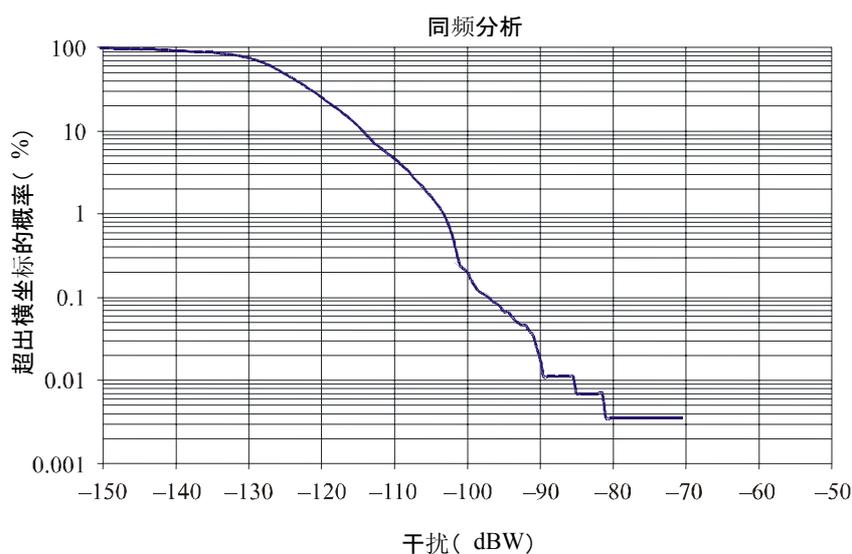


表 11
对 SAR3 的总雷达干扰总结

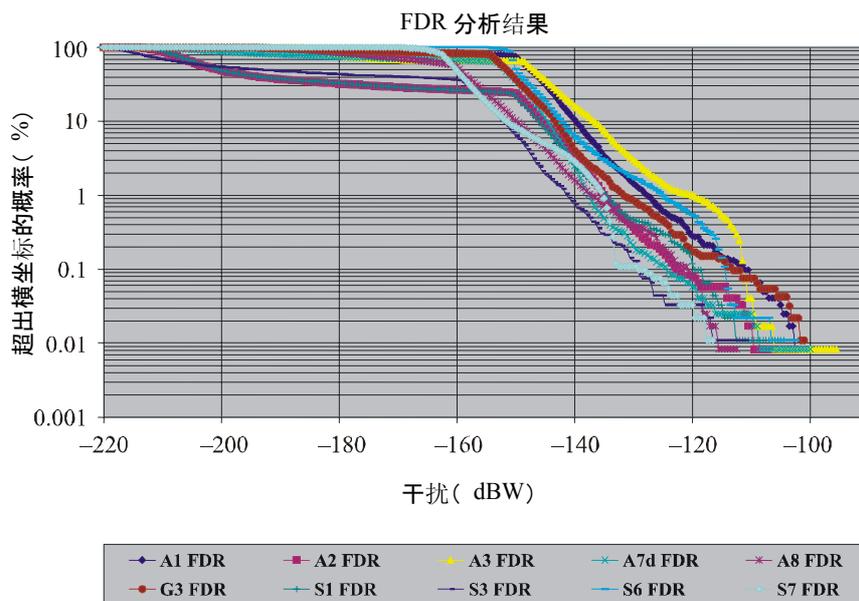
在 1.0%门限干扰值 (dBW)	最大干扰值 (dBW)	接收到最大电平的时间百分比
-103.5	-70.5	0.0035%

5.1.2.3 FDR 分析 — 单一干扰分析

在 FDR 分析中使用与同频分析相同的雷达配置及假设。图 7 给出了机载、船载和地基雷达发射机对航天 SAR 干扰的累积分布函数图。表 12 提供了用 1%溢出电平和最大干扰电平表示的干扰统计的总结。所有模拟雷达的最大干扰电平远低于航天 SAR 干扰标准-9.9 dB(W/512 MHz)。

当比较图 7 与同信道在 1%概率点的模拟结果，FDR 对 SAR 干扰功率电平在多数情况下小于同信道模拟。若考虑 FDR 范围，干扰功率可以从 S6 雷达系统时的 0 dB 减少到 S1 雷达系统时的 15 dB。FDR 的量是雷达发射机调谐范围以及它相对 SAR 接收机中心频率漂移的函数，如图 4 所示。

图 7
单一干扰雷达的干扰结果



Rap 2094-07

表 12
对 SAR3 的单一雷达干扰的 FDR 总结

雷达	1.0%门限干扰值 (dBW)	最大干扰值 (dBW)
机载雷达		
A1	-128.0	-100.5
A2	-135.0	-102.5
A3	-120.0	-95.5
A7d	-137.5	-100.0
A8	-137.5	-112.5
船载雷达		
S1	-135.0	-104.5
S3	-141.5	-111.0
S6	-125.0	-103.0
S7	-135.0	-116.5
地基雷达		
G3	-132.0	-101.0

5.1.2.4 FDR 分析 — 多次干扰分析

在 FDR 分析中使用与同频分析中同样的雷达配置和假设。图 8 给出了总共 1 000 部机载、船载和地基雷达发射机对航天 SAR 总干扰的累积分布函数图。表 13 提供了用最大干扰电平和 1%溢出电平表示的干扰统计的总结。从图 8 中可见，有 0.0035%的时间超过了航天 SAR 干扰标准。通过随机跳动雷达发射机的频率研究 FDR，发现对 SAR3 的总干扰电平大约比同频假设下 1%溢出点低 4.5 dB。

5.1.3 SAR 减扰技术

尽管本研究的结果表明 SAR 减扰技术不是无线电测定业务必需的，SAR 处理技术提供了对一定波形类型可评估的减扰。从 SAR 接收机得到的原始数据按距离和方位处理产生雷达图像。点目标返回的信号是距离和方位向的线状展开。SAR 处理器将两个方向上的数据关联，典型的回波增益通常在 20 到 40 dB 之间。在确定航天 SAR 干扰标准的时候要考虑这些处理过程中的增益，见 ITU-R RS.1166 建议书。

图 8
频率相关拒绝 (FDR) 分析

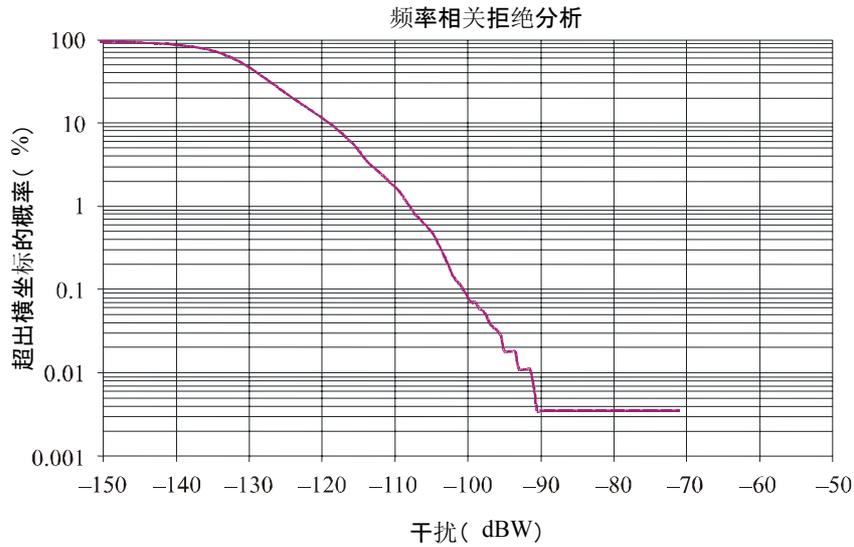


表 13
对 SAR3 的总雷达干扰的 FDR 总结

1.0%门限干扰值 (dBW)	最大干扰值 (dBW)	接收到最大电平的时间百分比
-108.0	-71.0	0.0035%

5.1.4 分析结论

本研究评估了在 9 300 到 10 000 MHz 频带, 从机载、船载和地基雷达无线电测定发射机对航天 SAR 的干扰功率电平。模拟结果表明如下:

- 本研究中同信道模拟考虑的单一雷达干扰, 除雷达 A1 有少于 0.01% 的时间超出, 其他所有雷达的最大干扰电平远低于航天 SAR 干扰标准的 -89.9 dB(W/512 MHz)。
- 本研究中频率相关拒绝模拟考虑的单一雷达干扰, 所有雷达的最大干扰电平远低于航天 SAR 干扰标准的 -89.9 dB(W/512 MHz)。
- 世界范围内随机配置的 1 000 部雷达系统在同信道的模拟情形下, 有 0.018% 的运行时间里对 SAR3 的干扰超过航天 SAR 干扰标准。
- 世界范围内随机配置的 1 000 部雷达系统在频率随机跳动的模拟情形下, 有 0.0035% 的运行时间里超过航天 SAR 干扰标准。

5.2 第 2 项分析研究：地基气象雷达在 9 300-9 500 MHz 频带内对 EESS（有源）潜在干扰的评估

使用动态模拟来分析地基气象雷达的干扰潜力。EESS（有源）系统的运行参数如气象雷达的特性是规定好的。然而在 9 300-9 500 MHz 运行的地基气象雷达的配置（系统数量、密度、位置）资料缺乏。需要对配置位置、密度和全世界运行系统总数进行假设。分别对 30、60 和 120 部全世界范围内随机放置运行的地基气象雷达进行为期 20 天的模拟。假设雷达在 9 300-9 500 MHz 运行，都完全落在 SAR 的运行带宽内。

5.2.1 EESS（有源）模拟参数

用按照表 1 中列出的 SAR3 轨道参数运行的一颗 SAR 来进行这项分析。确定兼容性采用 -95.9 dB(W/512 MHz)的标准不超过 1%的时间。统计了地基气象雷达对 SAR 接收机的总干扰。

5.2.2 气象雷达模拟参数

用报表产生气象雷达所处的随机的位置。每部雷达的天线旋转速度和起始仰角都是随机选择。如果不能确认在 9 300-9 500 MHz 运行的地基气象雷达的实际数量，那么全世界地基气象雷达的数量将在 30-60 部之间。为了考虑在 9 300-9 500 MHz 运行的地基气象雷达的可能增加，也模拟包含 120 部雷达的情况。

尽管气象雷达可以用多种雷达扫描方式，模拟的所有雷达都配置为执行体扫描运行。执行体扫描时，雷达在低仰角（典型地，大约 0.5° ）开始，引起仰角的全程旋转，仰角增加了几度，执行另一次方位向的扫描。重复这个过程直到达到 20° 到 30° 的仰角。然后天线返回到最小仰角然后再次重复开始这个过程。图 9 是模拟中使用体扫描的天线仰角图。

5.2.3 结果

模拟结果表明，气象卫星的当前配置（全世界 30-60 部雷达）将在 0.015% - 0.025%的时间里在超过 512 MHz 带宽的 SAR 干扰标准 -95.9 dBW，如图 10 所示，显著低于 1%的可用性要求。120 部雷达模拟的结果导致对 SAR 干扰只有轻微增加，0.04%的时间超过标准。

图 9
体扫描策略模拟的天线仰角的运动

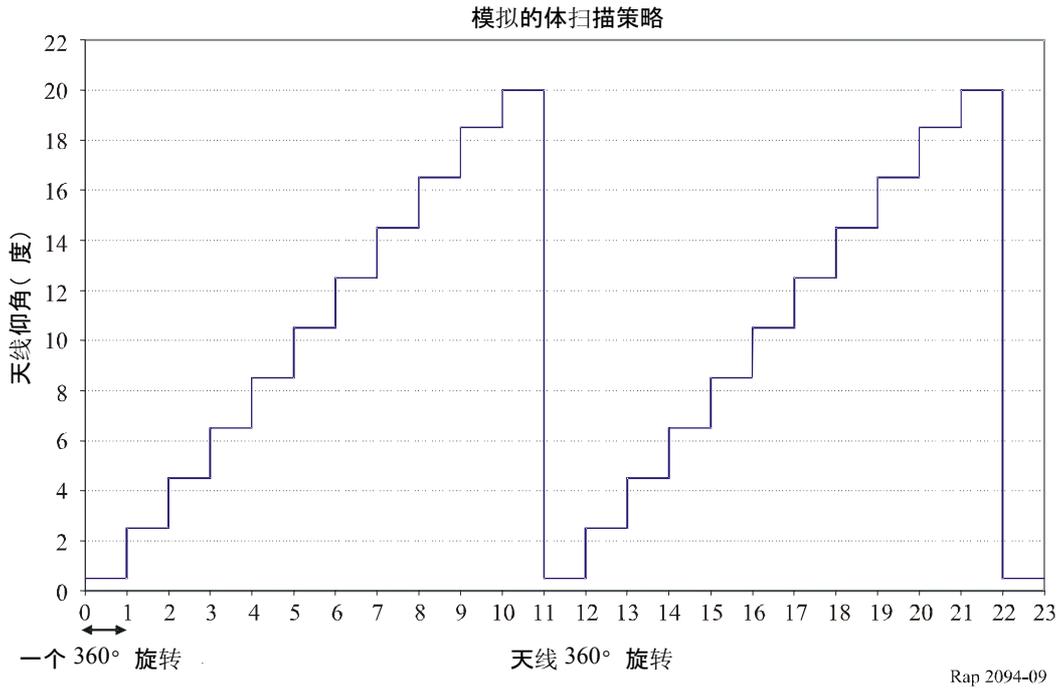
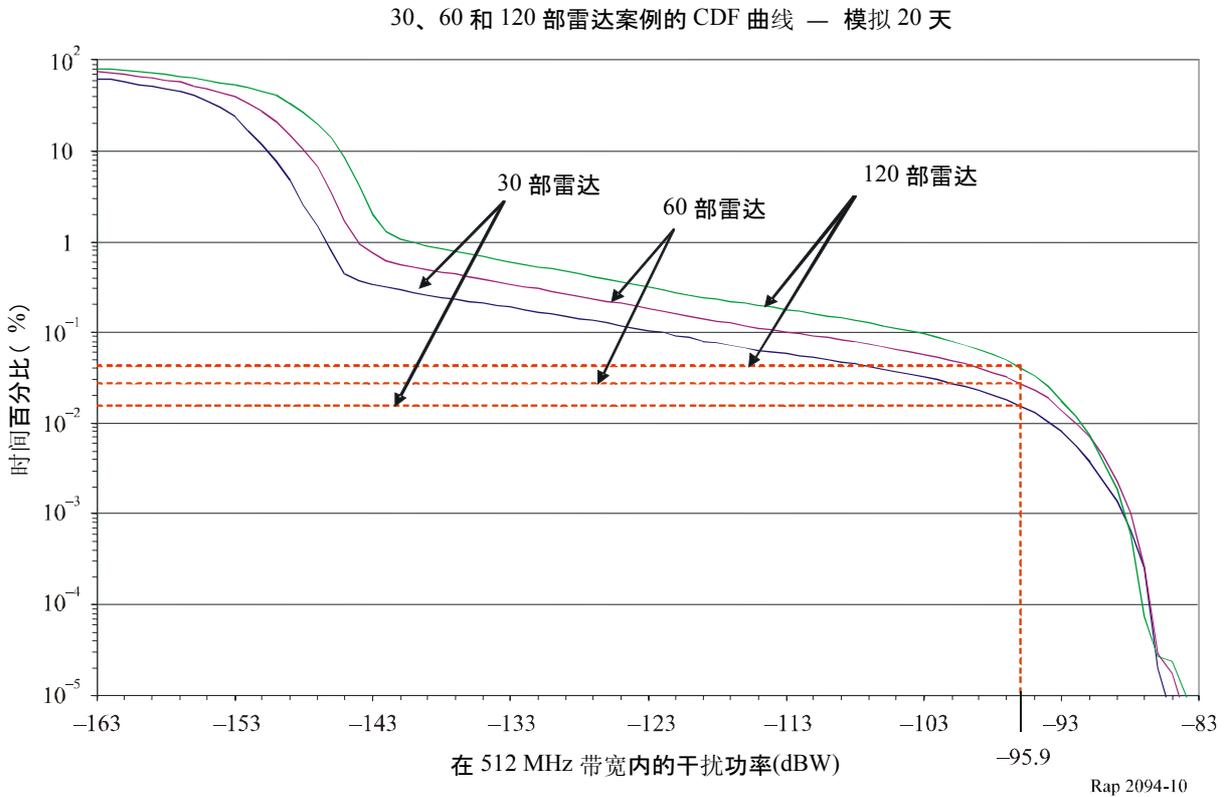


图 10
30、60 和 120 部雷达的累积分布函数 (CDF) 图



5.2.4 结论

模拟表明全世界运行 30 和 60 部雷达时，对 EESS（有源）的干扰电平超过 -95.9 dBW 的时间分别是 0.015%和 0.025%。120 部雷达在全世界随机配置的模拟为未来雷达增加会怎样影响 EESS（有源）的运行提供了指导。120 部雷达随机配置产生的总干扰电平在 0.04%的时间里超过 -95.9 dBW。基于这些结果，目前以及未来地基气象雷达卫星引起的总干扰远低于 EESS（有源）的干扰标准。关于地基气象雷达卫星对 EESS（有源）的干扰路径，是可以兼容运行的。

5.3 第 3 项分析研究：EESS（有源）在 9 300-9 500 MHz 和 9 800-10 000 MHz 频带内对无线电定位业务最大干扰电平的评估

5.3.1 分析方法

通过计算机建模来计算地球上或者地球之上航天有源 SAR 传感器在 9 300-9 500 MHz 频带工作对无线电测定系统接收机的最大干扰/噪声电平。当对 9 300-9 500 MHz 范围内的频率进行分析时，也对在 9 800 -10 000 MHz 范围内的很多无线电定位系统进行分析。因此考虑了在 9 800 -10 000 MHz 范围内运行的雷达特性，本研究的结果可以用于 9 800-10 000 MHz 范围。

模拟将机载雷达（A1、A2、A8 和 A10 系统）置于 9.1 km 高度上的一架飞机上，飞机在边长约 500 km 的方形范围内飞行。模拟中飞机飞行的经纬度范围是 30° N 到 35° N, 90° W 到 95° W。同样，船载雷达（S1、S3、S4 和 S9 系统）模拟将 4 部雷达放在一艘船上，船的游弋范围是一个边长约 500 km 的方形范围。模拟中船的游弋的经纬度范围是 30° N 到 35° N, 30° W 到 35° W。地基雷达（G2 和 G39 系统）放在地球上的固定点（ 30° N, 115° W）。所有雷达的天线扫描模拟使用表 5、6 和 7 中的参数。可选择天线垂直倾斜（仰角）角的雷达系统，天线设置为最高倾斜角。

模拟假设同极化同信道频率运行。为了确定雷达接收机上的最大 I/N 电平，模拟了 10 天，步距为 10 ms。每次增加都根据雷达天线扫描速度确定它的方位角和仰角。通过 SAR 轨道参数和雷达站位置确定每部 SAR 发射机和接收机之间的距离。用 ITU-R M.1461-1 建议书附件 1 中公式（15）和（16）计算受害雷达站的干扰功率，包括峰值 OTR。

5.3.2 分析结果

在无线电定位接收机处的峰值 SAR 发射机功率电平通过最大 I/N 功率比电平的形式确定。用接收机 IF 带宽和雷达特性表中给出的噪声数字值计算雷达接收机系统噪声电平。如果没有指定噪声值，计算雷达接收机系统噪声功率时假设为 5 dB。

为了计算 SAR 发射机和雷达站的带宽差异, 计算微调拒绝 (OTR)。表 14 列出计算出来的 OTR 值被用来计算模拟中的 I/N 值。为了提供最坏情形下 OTR 值, 在计算中用到了 $1 \mu\text{s}$ SAR 脉冲长度。

表 14
微调拒绝计算 (dB)

	机载雷达系统				船载雷达系统				地基雷达系统	
	A1	A2	A8	A10	S1	S3	S4	S9	G2	G3
SAR3	6.7	2.6	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.5

表 15、16 和 17 分别列出了机载、船载、地基的最大 I/N 电平。

表 15
SAR 对机载雷达干扰的总结

雷达系统	最大 I/N 电平 (dB)
A1	32
A2	38
A8	42
A10	45

表 16
SAR 对船载雷达干扰的总结

雷达系统	最大 I/N 电平 (dB)
S1	32
S3	37
S4	52
S9	28

表 17
SAR 对地基雷达干扰的总结

雷达系统	最大 I/N 电平 (dB)
G2	11
G3	23

5.3.3 减扰讨论

当从脉冲类型波形评价无线电测定雷达系统退化时，应该考虑其他因素如无线电测定系统减扰电路和处理增益，以确定 I/N 电平的影响。例如根据 ITU-R M.1372 建议书，用脉冲幅度鉴别器抑制雷达接收机的异步脉冲干扰，在特定情况下，在雷达接收机进一步的处理可以消除 14 dB 或者更大的峰值 I/N 。恒定误警率(CFAR)处理也能用在雷达接收机以减轻低占空比异步脉冲干扰。执行 CFAR 处理随混杂和干扰电平提供检测门限值，如 ITU-R M.1372 建议书中所述，脉冲干扰不会影响门限值直到 I/N 比率达到大约 30 dB 或者更高。

另外，雷达对接收信号进行多普勒处理时会在很多多普勒槽中把并不相似的脉冲信号弄模糊，产生平均干扰信号电平。这项研究中使用 SAR 平均功率而不是峰值功率会减少大约 23 dB 的干扰电平。

减扰抑制电平会随每部雷达系统变化，实际的抑制电平能够通过测试计划中的 SAR 波形来确定。计划用来测试 EESS 波形的几个类型的雷达系统包括海洋无线电导航、机场地表探测装备 (ASDE)、机载以及地基天气雷达。测试用 EESS 波形产生的 I/N 电平见表 15、16 和 17。

此前对机载侦测雷达研究和测试 CFAR 处理和具体 SAR 波形确定雷达性能显著退化需要大约+35 dB I/N 。雷达接收机的处理增益和减扰技术是它能够经受 SAR 波形产生的 35 dB 的 I/N 的主要原因。

5.3.4 分析结论

这项研究评估在 9 300 到 9 500 MHz 频带，由于航天 SAR 同频道运行，引起在雷达接收机输入的 I/N 电平。由于本研究中很多无线电定位系统也在 9 800-10 000 MHz 范围运行，因此研究结果在 9 800-10 000 MHz 频带也能够适用。ITU-R M.1461 建议书提到脉冲干扰的影响量化更困难，并且与接收机/处理器的设计和运行模式关系很大。尤其是有效目标回波的微分处理增益，属于同步干扰脉冲，经常对给定电平的脉冲干扰效果产生重要影响。

几种不同形式的性能衰减能够通过脱敏现象抵消。通过分析具体雷达类型之间的相互作用可以做出评估。一般地，无线电测定雷达的大量特性能够有助于抑制低占空比脉冲干扰，尤其是少数隔离的源。ITU-R M.1372 建议书中包含了抑制低占空比脉冲干扰的技术。

5.4 第 4 项分析研究：EESS（有源）对在 9 300-9 500 MHz 频带内的无线电定位业务中运行的地基气象雷达潜在干扰的分析

在地基气象雷达和 EESS 之间兼容性分析结果用商业软件包进行动态模拟。这项研究中只考虑了从 EESS 到地基气象雷达的干扰。每个场景的模拟运行大概要 23 天。这项分析包括两部分。首先，为了快速确定是否存在兼容性问题，用假设-6 dB 和+10 dB 的 I/N 防护值做初步分析。结果显示用-6 dB 和+10 dB 的 I/N 门限值会在显著的时间里发生溢出，基于这个结果，在第二部分进行了额外分析，以确定气象雷达抗更高干扰电平的能力。

5.4.1 初步分析

这部分分析做出一些基本假设，受害雷达不能减轻高电平脉冲干扰。

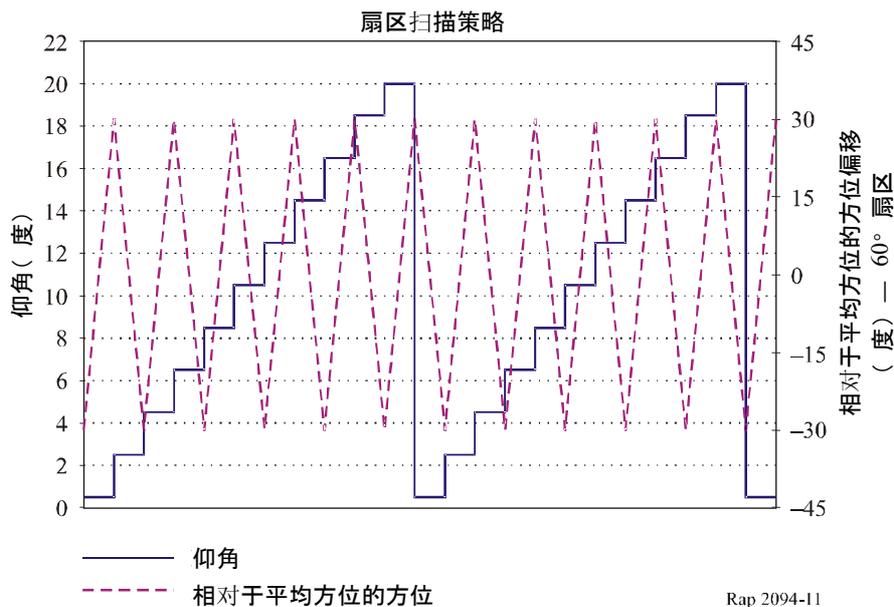
5.4.1.1 地基气象雷达参数

因为天线旋转速度和运动策略不同产生的不同模式下，地基气象雷达都可以运行。最常见的扫描策略是体扫描，其中在仰角从 0° 附近增加到最大 20° 到 30° 之间，雷达执行一系列天线全旋转。第 5.2.2 节中图 9 是包括体扫描在内的模拟中用到的天线体扫描策略图。

地基气象雷达也能够运行其他扫描策略以满足具体运行要求。为了靠近具体大气监测区域，雷达能够执行扇区扫描或者在聚光灯模式下运行。在扇区体扫描模式下，当处于一系列仰角步距下前进时，天线集中在某个方位扇区。在聚光灯模式下，为了说明处于延长期的小范围大气，天线方位角和仰角保持不变。这项研究中扇区体扫描通过扫描平均值附近 $\pm 30^\circ$ 之间的 60° 方位来模拟。在方位值的中数 0° 、 90° 和 135° 运行模拟。图 11 给出模拟中使用的扇体扫描策略图。

图 11

模拟中使用的扇区扫描天线运动（ 60° 宽的扇区）



从表 7 可见, 雷达系统 G9 用到天线旋转速度的范围。模拟了 5°/s 和 20°/s 天线旋转速度下的体扫描和扇区扫描策略。假设地基气象雷达保持固定位置。由于雷达纬度能够影响雷达观察到 SAR 的时间, 模拟中用了三个雷达位置。雷达放在低、中和高纬度位置 (0°, 45° N 和 60° N) 分别进行模拟。因为 IF 带宽可调, 为了覆盖所有可能组合需要大量模拟。为了得到反映干扰可能的最坏情形的结果, 用了 10 MHz 的雷达 IF 带宽。

5.4.1.2 SAR 参数

SAR 轨道的特性也进行了模拟。模拟采用四部 SAR 由经度 90° 分隔开。SAR 用线性 FM 啁啾, 其中脉冲持续时间从 1 到 10 μs 变化。为了限制模拟次数, 对最低 FDR 和最坏共用情况使用了 10 μs 的脉宽。假设与气象雷达同频率运行。测试运行结果表明线性调频波形的有效脉宽会比接收机的接收带宽更宽, 后者因为 IF 环路响应而大量减少。因此, 气象雷达接收机内线性调频 10 μs 脉宽的 SAR3 会大量减少。这将有利于系统之间的兼容性。

5.4.1.3 频率相关拒绝

在干扰源和受扰接收机之间的频率相关拒绝 (FDR) 是两个系数的组合, 偏频拒绝 (OFR) 和微调拒绝 (OTR):

$$FDR = OFR + OTR$$

这时 SAR 和雷达同频率运行, OFR 值为 0。

线性调频信号 OTR 通过下面方式计算:

$$OTR = 10 \log (B_c / (B_R^2 T)) \quad \text{对 } B_c / (B_R^2 T) > 1$$

其中:

T : 线性调频脉宽 (s)

B_c : 脉宽 T (Hz) 期间发射机线性调频带宽

B_R : 接收机 3 dB 带宽。

对选择的 10 MHz 带宽气象雷达和选择的 10 μs 线性调频脉宽 SAR, OTR 值为 0。模拟中使用的 FDR 值为 0 dB。

5.4.1.4 分析结果

由于地基气象雷达抗 SAR 干扰能力未知, 在取得最初结果的时候, 以常规的 -6 dB I/N 做参照。常规的 -6 dB I/N 与连续的 (CW) 或类噪声干扰信号有关, 而且由于它线性调频脉冲的本质, 还不能用于航天 SAR 信号。需要指出本分析中用的雷达和在此频带运行的其他类型的地基气象雷达, 可能未包含在 ITU-R M.1372 建议书中描述的用于消除影响脉冲干扰的减扰技术。给出的最初结果不能用来确定基于信号处理的兼容性。

5.4.1.5 雷达体扫描结果

表 18 给出体扫描模拟结果。持续时间与最大 I/N 值无关。在任何增益处理或衰减技术应用到分析结果以前，持续时间有助于了解雷达运行时能经受来自 SAR 多长时间的干扰。表 18 也给出 I/N 门限值 = +10 dB 的数据，以便了解雷达在超过 I/N -6 dB 电平时，减扰影响的潜在能力会怎样影响结果。在 I/N = -6 dB 电平，+10 dB 电平失效，只用来解释雷达能够经得起更高的干扰电平，干扰发生的时间和干扰持续时间的变化。

美国境内，在这个频带运行地基气象雷达一般用于大气研究和其他能够经得起一段时间脉冲干扰的应用。对在 9 300-9 500 MHz 运行的雷达，其他主管部门可能有更严格的防护要求。

表 18
体扫描模拟结果

5°/s 旋转							
雷达位置	最大 I/N (dB)	超过 I/N = -6 dB 的最大持续时间 (s)	超过 I/N = -6 dB 的平均持续时间 (s)	23 天里发生 $I/N > -6$ dB 的次数	超过 I/N = +10 dB 的最大持续时间 (s)	超过 I/N = +10 dB 的平均持续时间 (s)	23 天里发生 $I/N > +10$ dB 的次数
低纬度	23.8	0.55	0.34	225	0.40	0.22	139
中纬度	27.3	2.50	0.38	366	0.35	0.22	231
高纬度	24.6	0.55	0.34	488	0.40	0.22	371
20°/s 旋转							
低纬度	23.9	0.15	0.09	853	0.10	0.06	523
中纬度	24.2	2.5	0.10	1321	0.10	0.06	836
高纬度	24.2	0.15	0.09	2205	0.01	0.06	1330

表 18 给出的结果表明典型体扫描运行模式下，地基气象雷达能经受的最大 I/N 值大约为 24 到 27 dB。还运行了少量的模拟来确认干扰发生的次数与 SAR 数量成正比。结果表明当使用单一 SAR，干扰发生次数会大量减少至 1/4，但峰值电平和持续时间大致相同。

5.4.1.6 雷达扇体扫描结果

表 19 给出雷达扇体扫描运行模式下模拟的结果。在扇区扫描模式下，所有雷达接收机特性都不变化。天线变化为如图 11 所示的模式。模拟只在 45° 纬度进行。

表 19
扇区扫描模拟结果（纬度 45°）

60° 扇区开始/ 结束方位	5°/s 旋转			20°/s 旋转		
	最大 I/N (dB)	超过 $I/N = -6$ dB (s)的最长持续 时间	超过 $I/N = -6$ dB (s)平均持续 时间	最大 I/N (dB)	超过 $I/N = -6$ dB (s)的最长持续 时间	超过 $I/N = -6$ dB (s)的平均持续 时间
北扇区 (330° 到 60°)	24.0	2.50	0.36	28.3	2.50	0.10
东扇区 (60° 到 120°)	23.6	2.50	0.37	24.3	2.50	0.10
东南扇区 (105° 到 165°)	24.1	2.50	0.38	23.0	2.50	0.10

5.4.1.7 雷达聚光灯模式结果

表 20 给出雷达运行聚光灯模式下模拟的结果。在频段 9 300-9 500 MHz 运行的用于大气研究的地基气象雷达有时会用聚光灯模式，其中大气中的某点会被长时间照亮。这种运行模式下，天线仰角和方位不会变化。模拟雷达放置在 45 度纬度的位置运行，天线放置在在固定方位和仰角。用到的方位有 0° N 和 90° E，天线仰角有 0.5、20 和 45°。

表 20
聚光灯模式模拟结果（只在纬度 45°）

	0°方位 (N)			90°方位 (E)		
	最大 I/N (dB)	超过 $I/N = -6$ dB 的 最长持续时间 (s)	超过 $I/N = -6$ dB 的 平均持续时间 (s)	最大 I/N (dB)	超过 $I/N = -6$ dB 的 最长持续时间 (s)	超过 $I/N = -6$ dB 的平 均持续时间 (s)
0.5°天线仰角	17.0	23.0	14.0	18.0	13.55	7.14
20°天线仰角	24.6	11.75	6.98	15.6	5.65	2.83
45°天线仰角	24.5	4.75	3.36	3.3	2.5	1.86

5.4.1.8 初步分析结论

如果不能进一步理解气象雷抗 SAR 干扰能力，要得到 EESS 和地基气象雷达是否存在兼容性的结论是困难的。为此使用一般门限值 $I/N = -6$ dB 和 +10 dB 来产生 SAR 可能影响雷达运行的持续时间的数据。这不是最合适的门限值，门限值可能会落在 $I/N = 0$ dB 到 +40 dB 范围内的某个值。这项研究模拟产生的最大 I/N 为 $I/N = +28.3$ dB，多数峰值电平落在 $I/N = +24$ dB 附近。这些结果是对脉冲干扰的，而气象雷达使用 -6 dB 和 -10 dB 的典型 I/N 门限值，由于只用于类似噪声和 CW 干扰，因此不适用。使用 -6 dB 和 +10 dB 防护标准产生的干扰持续时间的差别是显著的。使用 +10 dB 标准减少大约 30-36 % 的干扰持续时间。更高防护标准的对干扰发生次数的效果更显著。为了显著减少干扰发生的数量和持续时间，气象雷达需要能够经得起超过 +10 dB 的 I/N 电平。

5.4.2 气象雷达减扰的附加因素

初步分析结果表明，由于气象雷达缺乏抗脉冲干扰能力，EESS 和地基气象雷达之间的兼容性可能会有问题。在这部分进一步评估气象雷达在有脉冲 EESS（有源）干扰信号时的运行能力。在最初的减扰分析中不考虑因为正常气象雷达数据处理产生的脉冲干扰以及 EESS 运行特性。这部分详细讲解这些系数。有意的减扰技术虽然有可能实现，但是由于会出现性能衰减，气象雷达通常不考虑使用。

5.4.2.1 EESS（有源）运行期

由于 SAR 运行要求的功率量，EESS 只打算最多运行 20%的时间。运行的占空比与脉冲占空比不同；它是 SAR 运行采集数据的时间百分比。在一年时间内（8 766 h）SAR 最多会运行 1 753 小时，从而大量减少干扰发生数量。当它运行时，最大干扰电平发生的持续时间如表 18、19 和 20 所示。初步模拟假设模拟期间内 SAR 连续运行，因此干扰发生数量能够显著减少到 1/5。

5.4.2.2 微调拒绝问题

为了快速得到初步分析，先前只考虑了最坏情形共用情况。选择 10 MHz 的气象雷达 IF 带宽产生 0 dB 的微调拒绝值。（进一步研究表明 10 MHz 的 IF 带宽比大多数气象雷达中采用的典型带宽要宽。）大多数气象雷达 IF 带宽在 1 到 4 MHz 范围，在共用情况下会改善。假设 SAR 脉宽从 1 变化到 10 μ s，4 MHz 的 IF 带宽会产生 14.5 到 4.5 dB 的微调拒绝。然而，更窄 IF 带宽会降低 4dB 的雷达噪声底限从而提高雷达灵敏度。相比此前分析的共用情况，由 OTR 产生 10.5 到 0.5 dB 改善是可能的。对 1 MHz 气象雷达 IF 带宽，考虑 OTR 和雷达噪声底限的降低，共用改善可以从 6.5 到 15.5 dB。表 21 给出 IF 带宽，接收机噪声电平以及相关 OTR 值的总结。

表 21
微调拒绝值

SAR 线性调频带宽 (MHz)	SAR 脉宽 (μ s)	气象雷达 IF 带宽 (MHz)	OTR (dB)	雷达噪声底限 (dBm)
450 MHz	1.0	1 MHz	25.5	-110
	5.0		19.5	
	10.0		16.5	
	1.0	4 MHz	14.5	-104
	5.0		7.5	
	10.0		4.5	
	1.0	10 MHz	6.5	-100
	5.0		0.0	
	10.0		0.0	

5.4.2.3 脉冲干扰衍生的 I/N 电平

气象雷达处理返回信号测量降水和风的模式。处理包括收集和处理基础产品、反射率、平均径向速度和波谱宽。简单来说，雷达对返回信号平均采样来提取气象产品需要的估测值。平均功能可提供气象雷达能力到处理更高脉冲干扰电平有关 CW 或者类噪声干扰信号。

气象雷达处理多脉冲回波落在距离箱里，建立一个用户规定大小的样本。平均最小距离箱的多脉冲回波采样提取距离箱估测值。提议中的 EESS 系统和气象雷达运行在显著不同的脉冲重复频率，因此相似性比不止一个干扰脉冲落在单个气象雷达距离箱的采样集要小，假设已知最小采样大小。这个方法用来确定单一脉冲最大电平，不会损坏雷达基础数据产品之上采样大小平均的性能目标。

防护标准的测定要求对雷达接收机噪声电平的理解，处理的最小信噪比和雷达基础产品（反射率、平均径向速度和波谱宽）精度要求。由于在频带有各种气象雷达运行，必须做出一些假设。分析的雷达接收机在最窄 IF 带宽有 -110 dBm 的噪声底限。该频带雷达运行基础产品没有现成的精度要求，但可以假设 ITU-R M.1464 建议书附件 3 规定的精度适用。在没有具体雷达参照时最小信噪比很可能是最难建立的值。在频带 2 700-2 900 MHz 运行的雷达信噪比更低，所以采用 0 到 -3 dB。

探测雷达运行一般有很长的频率范围。在频带 9 300-9 500 MHz 运行的气象雷达探测一般采用的范围更短，分辨率更高，也可以在最大信噪比更高时运行。在本分析中，假设信噪比为 +3 dB。

如 ITU-R M.1464 建议书附件 3 所述, 气象雷达最大反射率偏差限制假设为 1dB, 转换成干扰最大信噪比 (I/S) 为 0.26, 或者功率比为 1.26。假设反射率采样大小 25。超过 25 的采样大小是可能的, 进一步降低单次脉冲的影响, 但是采样大小增加也增加了在相同采样中发生二次干扰脉冲的概率:

$$\frac{25 * S_{min} + P_i}{25 * S_{min}} = 1.26 \quad \text{或} \quad P_i = 6.5 S_{min} \quad (1)$$

其中:

S_{min} : 最大接收信号电平

P_i : 脉冲干扰信号峰值功率。

因此:

$$P_i = S_{min} + 8.2 \text{ dB} \quad (2)$$

如上所述, 假设在 9 300-9 500 MHz 频段运行的雷达最大信噪比为 3 dB, 对 EESS 脉冲信号产生最大干扰/噪声比为 11.2 dB。

5.4.2.4 线性调频 EESS 导致受害雷达 IF 滤波器脉冲任务循环减少

测试结果表明受害接收机的 IF 滤波级具备有效降低脉冲线性调频信号宽的能力。初步测试结果表明, 取决于干扰信号线性调频率, 干扰信号脉宽能够大量减少如下:

对低线性调频率 ($\sim < 5 \text{ MHz}/\mu\text{s}$), 脉宽降低系数为:

$$C \approx \frac{B_{IF}}{B_c} \quad (3)$$

其中:

B_{IF} : 受害接收机 IF 带宽

B_c : 干扰信号线性调频的带宽。

对高线性调频率 ($\sim > 40 \text{ MHz}/\mu\text{s}$), 脉宽降低系数:

$$C \approx \frac{2 * B_{IF}}{B_c} \quad (4)$$

因此, 根据此前的模拟使用的 SAR 3 ($B_c = 450 \text{ MHz}$), 可以预测最小占空比降低。占空比对高低两种线性调频率的降低系数见表 22。

表 22
占空比降低系数 (for $B_c = 450$ MHz)

B_{IF} (MHz)	低线性调频率	高线性调频率
1.0	0.0022	0.0044
4.0	0.0089	0.018
10.0	0.022	0.044

第 5.4.2.3 节讨论了气象雷达对一套距离箱内脉冲采样取平均，以得到相关产品的估测。还不清楚当距离箱采样集取平均对占空比降低的影响。干扰占空比降低直接使得由于距离箱发现功率更低从而导致干扰可察觉性降低。此时占空比降低系数在 0.0022 到 0.044 之间，会分别引起 26.6 到 13.6 dB 的减扰处理增益。然而，这些值很可能是过分乐观的，还需要进一步的研究。

5.4.2.5 总结 — EESS 和气象卫星之间的共用

在第 5.4.2.1 到 5.4.2.4 节包含的分析的第二部分给出如此前研究的几个在 EESS（有源）发射脉冲信号和气象雷达之间改善共用结果的机理。共用改善结果源自从 EESS 到气象雷达的脉冲干扰应用更高的 I/N 防护标准，更有代表性的气象雷达 IF 带宽微调拒绝以及由于气象雷达更窄 IF 带宽引起的 EESS 占空比降低。表 23 给出对改善的总结。

表 23
额外减扰值的总结

描 述	此前研究中采用的值	更 新 值	注 释
I/N 防护标准 (dB)	-6 和+10	最小+11.2	与每次距离箱采样取平均的脉冲数量有关
微调拒绝 (dB)	0	0.5 到 15.5	取决于雷达 IF 带宽和 SAR 脉宽
由于 IF 滤波器比线性调频带宽窄，占空比降低	不考虑	实际值未知 — 在 13.6 到 26.6 dB 范围的可能改善	实际值能够适用到结果之前需要进一步的研究

用表 23 给出的信息，此前给出的模拟结果能够再次处理以确定气象雷达可能发生的更有代表性的干扰持续时间。不幸的是，由于表 23 中，由不同 SAR 和气象雷达参数引起一些数值的变化，不能确定单一干扰的门限值。当有 EESS（有源）脉冲干扰存在，气象雷达起码应该能够在 $I/N = 11.2$ dB 电平下运行。通过引入更新的 OTR 值，增加减扰能够使雷达经得起 11.2 dB 电平之上 0.5 到 15.5 dB 的 I/N 电平。那将使最大可接受 I/N 电平范围变为从 11.7 到 26.7 dB。由于占空比降低对气象雷达减扰能力的不确定性影响（在第 5.4.2.5 节中讨论），在本文件中结果的具体值可能不适用。只应该视为共用情况占空比降低会进一步改善。

5.4.3 结论 — 根据初步分析重新评价数据

初步分析产生的干扰超过 $I/N = -6$ dB 和 +10 dB 门限值的持续时间。当考虑对信号处理与运行特性信息附加分析，气象雷达运行 9 300-9 500 MHz 能够经得起 EESS（有源）的最大 I/N 电平落在 11.7 到 26.7 dB 范围的脉冲信号，并且潜在的经受能力更高。模拟结果能够用 +19.2 dB 和 +26.7 dB 的门限值，分别给出在 11.7 和 26.7 dB 之间的中值门限值以及一个更高的门限值。对 11.7 dB 电平的结果接近此前给出的 $I/N = +10$ dB 的结果。读者应该认识到这些结果将不包含第 3.5 节中讨论的占空比降低的影响，或者雷达中实现的其他减扰技术。

在表 24 中总结，结果表明即使典型地基气象雷达经受 EESS（有源）脉冲干扰电平大约 24 到 28 dB 有关的雷达噪声底限，性能也会显著衰减。初步分析中不考虑微调拒绝系数和雷达数据处理。这些额外系数使地基气象雷达运行的无线电测定业务和 EESS（有源）之间的共用可行。这些结果只能用到 EESS（有源）和地基气象雷达在 9 300-9 500 MHz 共用，不能延伸到包括其他干扰系统或者其他频带的情况。在本文件中也讨论其他系数，但只考虑可能进一步改善共用情况。

表 24
考虑减扰的模拟结果

5°/s 旋转									
雷达位置	最大 I/N (dB)	I/N 门限值 = +19.2 dB				I/N 门限值 = +26.7 dB			
		超过门限值的 最长持续时间 (s)	超过门限值的 平均持续时间 (s)	23 天里门限值 溢出次数 ⁽¹⁾	平均损坏方位 扇区 (度)	超过门限值的 最长持续时间 (s)	超过门限值的 平均持续时间 (s)	23 天里门限值 溢出次数 ⁽¹⁾	平均损坏方位 扇区 ⁽³⁾ (度)
低纬度	23.8	0.20	0.12	8	0.6	0	0	0	0
中纬度	27.3	0.25	0.13	13	0.65	0.05	0.05	1	0.25
高纬度	24.6	0.25	0.12	19	0.6	0	0	0	0
20°/s 旋转									
雷达位置	最大 I/N (dB)	I/N 门限值 = +19.2 dB				I/N 门限值 = +26.7 dB			
		超过门限值的 最长持续时间 (s)	超过门限值的 平均持续时间 (s)	23 天里门限值 溢出次数 ⁽¹⁾	平均损坏方位 扇区 (度)	超过门限值的 最长持续时间 (s)	超过门限值的 平均持续时间 (s)	23 天里门限值 溢出次数 ⁽¹⁾	平均损坏方位 扇区 ⁽³⁾ (度)
低纬度	23.9	0.10	0.05 ⁽²⁾	97	1	0	0	0	0
中纬度	24.2	0.05	0.05 ⁽²⁾	31	1	0	0	0	0
高纬度	24.2	0.05	0.05 ⁽²⁾	42	1	0	0	0	0

⁽¹⁾ 考虑到 SAR 有最大 20% 的运行占空比的事实。

⁽²⁾ 模拟步距大小为 0.05 s。因此，持续时间如表 24 所示，为 0.05 s，而实际持续时间可能更短。

⁽³⁾ 典型气象雷达采用径向分辨率大约 1°。不超过 1° 的方位损坏最少会导致一个径向完全损坏，如果干扰在两个径上边界，则都会损坏。少量气象雷达采用的径向分辨率为 0.1°。

5.5 第 5 项分析研究：EESS（有源）在 9 800-10 000 MHz 频带内与固定业务之间的兼容性研究

5.5.1 分析方法

通过计算机建模来统计拟议中的航天 SAR 发射机在固定业务接收机上的干扰。

5.5.1.1 P-P FS 对 SAR3 接收机的干扰

通过计算机建模来计算在航天 SAR 有源传感器接收机上来自固定业务发射机的与时间有关的干扰功率电平。这样建模来统计干扰超过某一干扰电平的概率以及 SAR 接收机最大干扰功率电平。

所有模拟运行 10 天，时间增量步距 1 秒。每次时间增加，根据 SAR 轨道参数和固定业务站位置，来计算 SAR 接收机和固定业务发射机之间的距离。对于这项研究，SAR 天线指向交叉轨道距离天底 44° 方向。根据发射机功率计算在 SAR 接收机的干扰功率、路程损耗以及天线分辨能力。这项研究中假设相同天线极化方式和相同频道频率运行，不考虑插入损耗。假设 P-P FS 电台用平均功率连续地发射。

在这项研究使用的 EESS（有源）参数和 P-P FS 电台分别见本报告的 2 和第 4 节，对两个固定业务站配置模型进行模拟：

- 1 536 个 P-P FS 电台在全世界随机分布
- 1 536 个 P-P FS 电台分布在《无线电规则》第 5.477 款列出的国家中。

本分析中使用的 SAR 防护标准为 $I/N = -6$ dB。SAR 接收机平均噪声功率为：

$$P_N = k T_0 B \quad (\text{W})$$

其中：

k ：玻耳兹曼常数 ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Joule/°K)

T_0 ：SAR3 接收机噪声温度 (600 K)

B ：SAR3 接收机 IF 带宽 ($512 \cdot 10^6$ Hz)

因此：

$$P_N: -113.73 \text{ dBW}$$

为满足 SAR 防护标准，输入到 SAR 接收机的干扰功率在 99% 的时间里必须低于 -119.73 dB (W/512 MHz)。

5.5.1.1.1 全球随机配置模拟

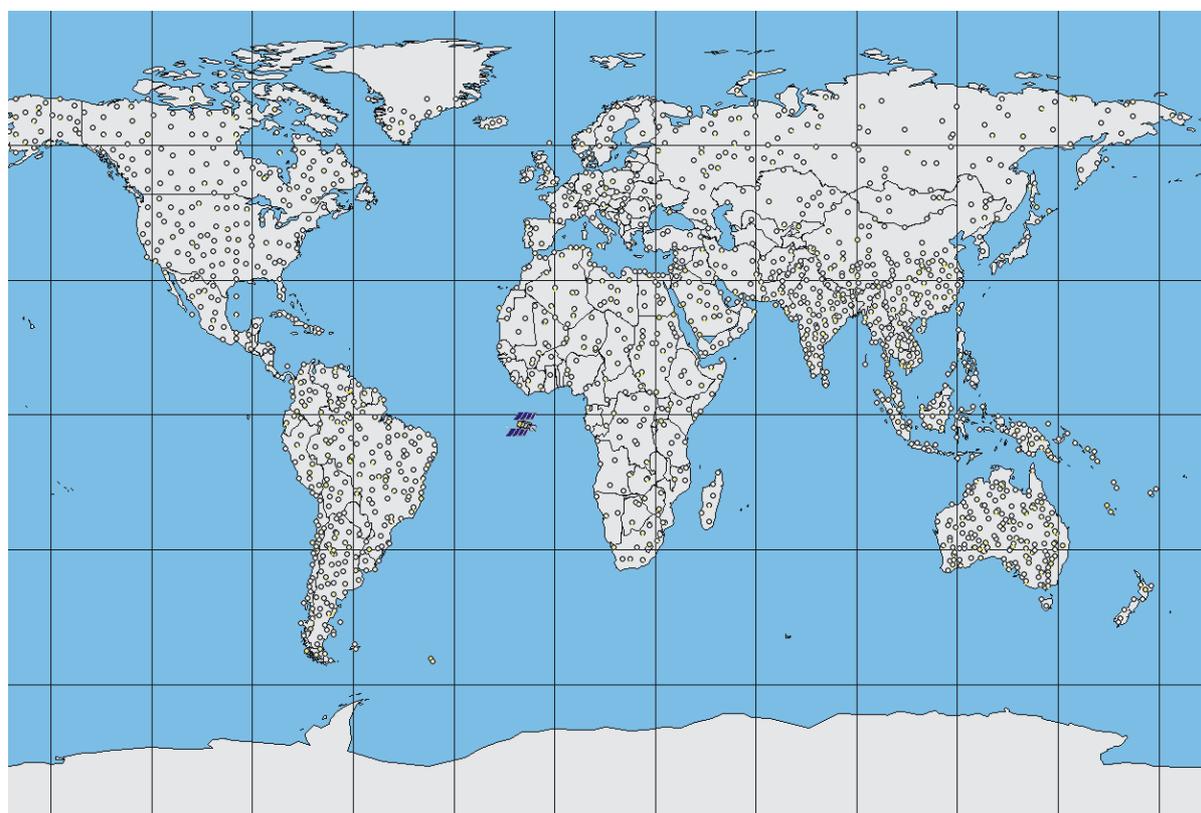
共计 1 536 个 P-P FS 电台随机分布在纬度 -55° 到 $+70^{\circ}$ 与经度 $\pm 180^{\circ}$ 之间。改动了部分随机位置以保证所有电台位于地面上。下面是最初选择的 FS 电台参数以及保持稳定的模拟持续时间：

- 每个电台的纬度从 -55° 到 70° 之间随机选值
- 每个电台的经度在 $\pm 180^{\circ}$ 之间随机选值
- 电台天线高度从 10 到 100 m 之间随机选值
- 电台天线发射光束仰角在 $\pm 5^{\circ}$ 之间随机选值
- 电台天线方位在 $\pm 180^{\circ}$ 之间随机选值

图 12 示出模拟中采用的 P-P FS 电台的位置分布。

图 12

模拟采用的固定业务电台位置



Rap 2094-12

5.5.1.1.2 基于《无线电规则》第 5.477 款的配置模拟

P-P FS 电台位于《无线电规则》第 5.477 款中规定的主管部门。脚注表示：

5.477 不同业务种类：在阿尔及利亚、沙特阿拉伯、巴林、孟加拉、文莱达鲁萨兰国、喀麦隆、埃及、阿拉伯联合酋长国、埃塞俄比亚、圭亚那、印度、印度尼西亚、伊朗伊斯兰共和国、伊拉克、牙买加、日本、约旦、科威特、黎巴嫩、利比里亚、马来西亚、尼日利亚、阿曼、巴基斯坦、卡塔尔、朝鲜民主主义人民共和国、新加坡、索马里、苏丹、特立尼达和多巴哥以及也门，9 800-10 000 MHz 频带以主要使用条件划分给固定业务（见第 5.33 款）。(WRC-03)

图 13 用黑色表明这些国家的领土。

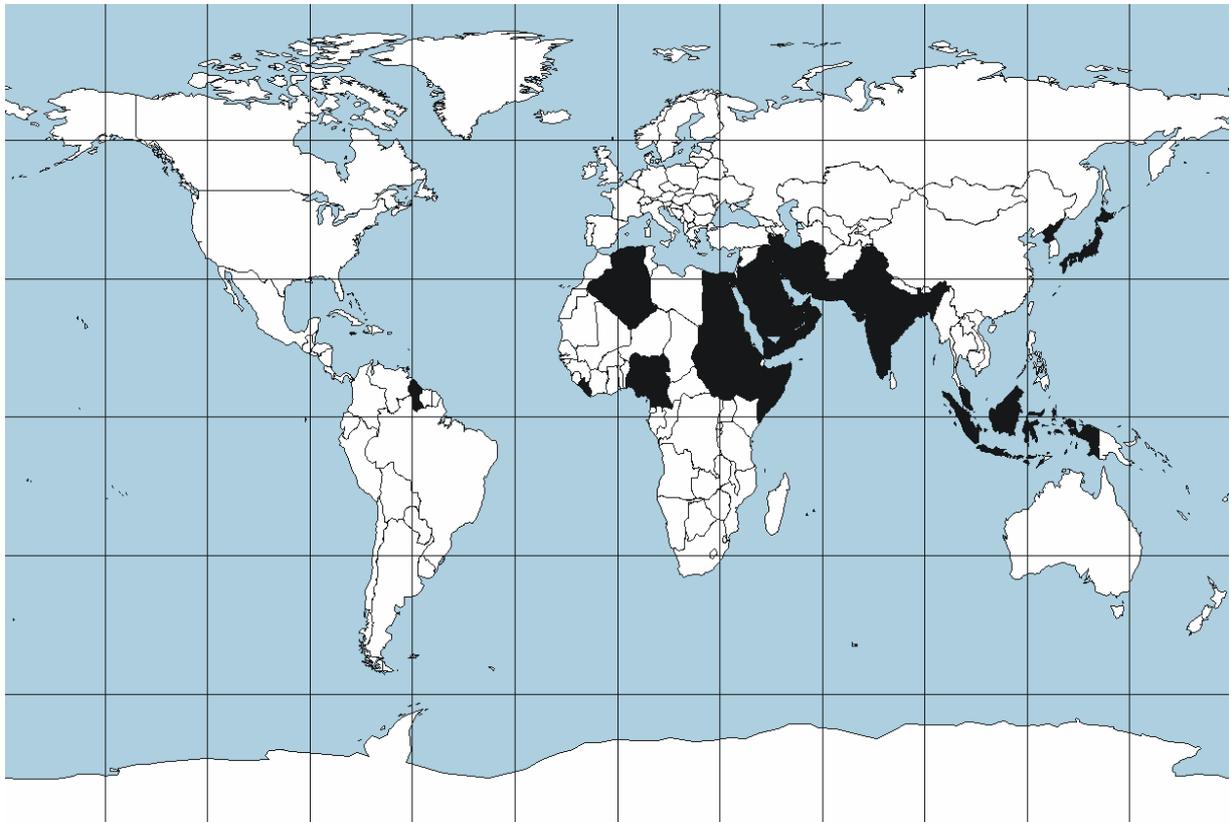
FS 系统主要配置在城市和郊区，FS 系统在农村即使有也很少。在《无线电规则》第 5.477 款所列的主管部门每个主要城市地区内，随机分布 12 个 P-P FS 电台。P-P FS 电台对之间指向对方以模拟实际情况。总共涉及 128 座城市的 1 536 个 P-P FS 电台。

下面的 FS 电台参数初始值如下选择，模拟期间保持不变：

- 电台天线高度在 10 到 100 m 之间随机选值
- 电台天线发射光束的仰角在 $\pm 5^\circ$ 之间随机选值。

图 13

《无线电规则》第 5.477 款列出的国家和地区



Rap 2094-13

5.5.1.2 SAR3 对 P-P FS 接收机的干扰

通过计算机建模来计算在固定业务接收机上接收的 SAR3 航天有源传感器有时间相关的干扰功率电平。用该模拟模型可以统计干扰超出某个干扰功率电平的概率以及在固定业务接收机上最大干扰功率电平。

所有模拟运行 60 天，时间增量步距为 0.5 s。每次时间增加，都要根据 SAR 轨道参数和固定业务电台位置，计算 SAR 发射机和固定业务接收机之间的距离。根据发射机功率、路程损耗和天线分辨力计算在固定业务接收机的干扰功率。这项研究中假设天线同极化同频道频率运行，不考虑插入损耗。假设 SAR3 用

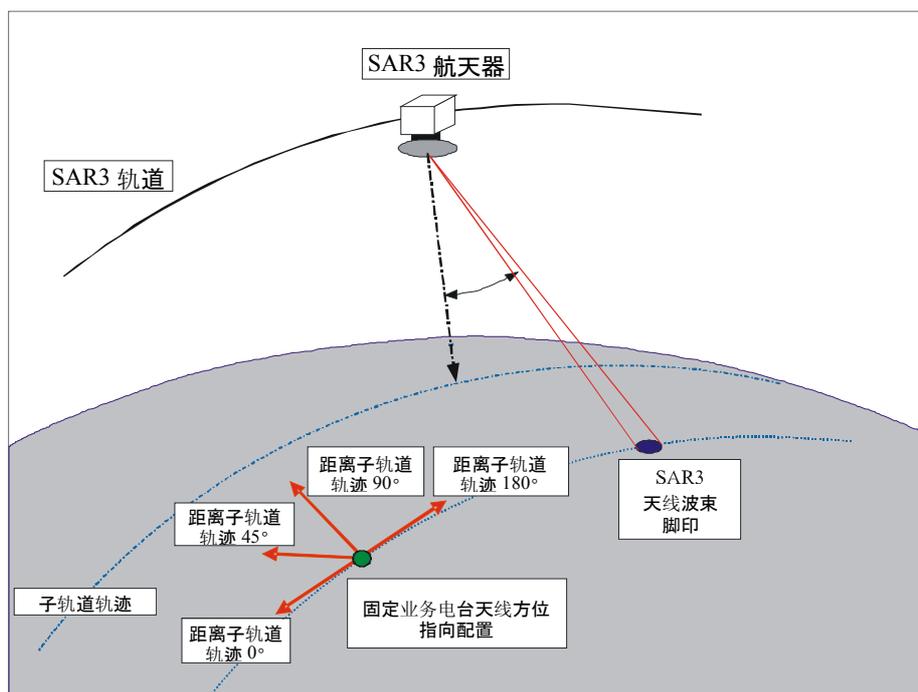
峰值功率和脉冲占空比得到的平均功率连续发射。下面给出的结果不考虑 SAR 只在典型轨道的 10%到 20% 运行的系数。

《无线电规则》第 5.477 款包括的主管部门大约落在南纬 15°和北纬 45°N 范围。这项研究，考虑的配置场景和天线指向配置在表 25 列出，图 14 说明了 FS 电台天线方位角相对 SAR3 倾角的关系。电台天线高度设置为 20 m。

统计了在不同天线仰角和方位角的 5 个 P-P FS 电台的干扰，共产生 60 种情况。

图 14

P-P FS 天线方位指向配置



Rap 2094-14

表 25

P-P FS 电台安装参数 (共 60 种情况)

电台 纬度 (度)	电台 经度 (度)	天线相对 SAR3 倾角的方位方向 (度)	天线 仰角 (度)
45	0	0, 45, 90, 180	-5, 0, 5
30	0	0, 45, 90, 180	-5, 0, 5
15	0	0, 45, 90, 180	-5, 0, 5
0	0	0, 45, 90, 180	-5, 0, 5
-15	0	0, 45, 90, 180	-5, 0, 5

5.5.2 分析结果

5.5.2.1 P-PFS 对 SAR3 接收机的干扰

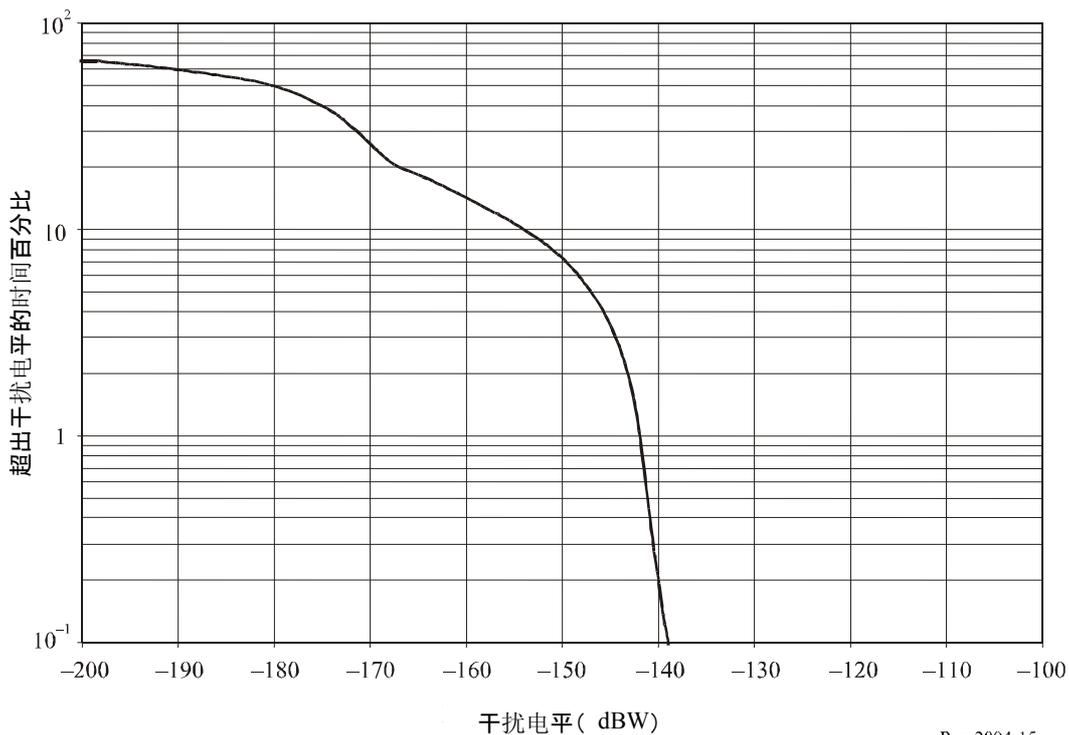
分析了两种固定业务站配置模型结果：

- 1 536 个 P-PFS 电台在全世界随机分布
- 1 536 个 P-PFS 电台分布在《无线电规则》第 5.477 款列出的主管部门中

5.5.2.1.1 全世界随机配置

图 15 是 1 536 个 P-PFS 电台对 SAR3 接收机的干扰的累积分布函数 (CDF) 图。结果表示为在航天传感器接收机 IF 512 MHz 带宽接收到的干扰信号功率的时间百分比。从图中可以看出，对 99% 的数据可用的标准 (1% 水平上)，干扰信号功率大约 -142 dBW。在 SAR3 接收机接收到的最大干扰电平为 -125.0 dBW，比 SAR 防护标准低 5.3 dB。

图 15
1 536 个 P-PFS 电台在全世界随机分布的 CDF



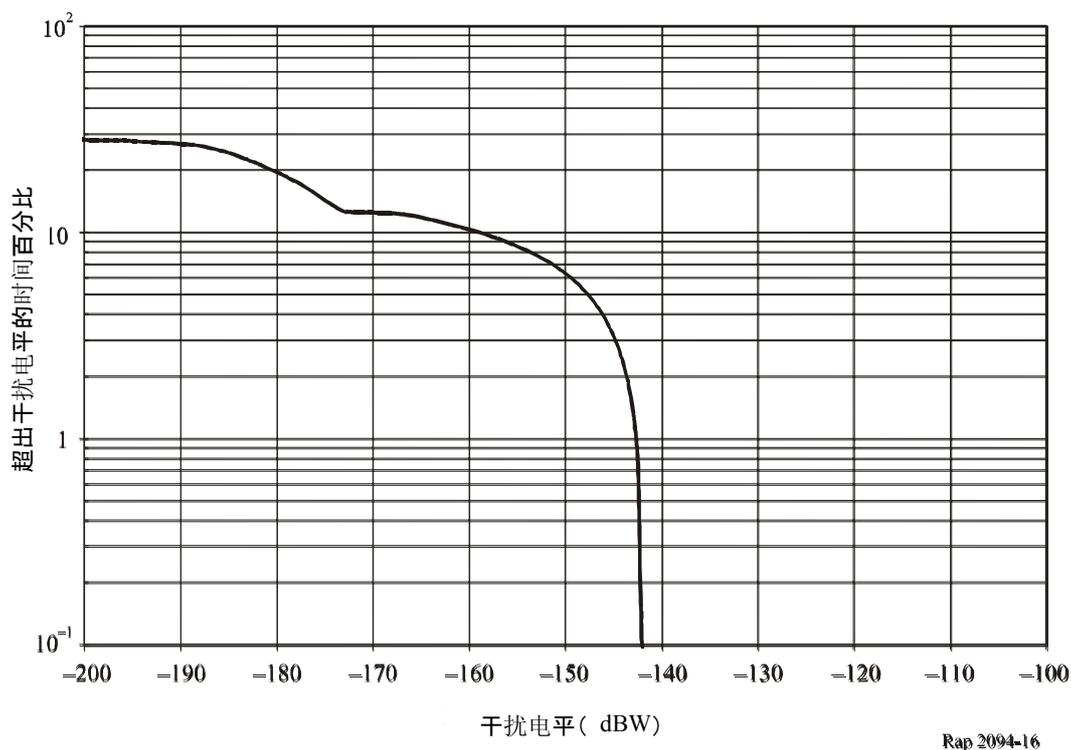
Rap 2094-15

5.5.2.1.2 基于《无线电规则》第 5.477 款的配置

图 16 是 1 536 座 P-PFS 电台在《无线电规则》第 5.477 款所包括的主管部门的 128 城市中心分布时，对 SAR3 接收机的干扰 CDF 图。结果表示为在航天传感器接收机 IF 512 MHz 带宽接收到的干扰信号功率的百分比时间。从图中可以看出，对 99% 的数据可用的标准 (1% 水平上)，干扰信号功率大约为 -143 dBW。SAR3 接收机的最大干扰电平为 -125.17 dBW，比 SAR 防护标准低 5.4 dB。

图 16

1 536 个 P-P FS 电台在《无线电规则》第 5.477 款所包括的主管部门随机分布的 CDF



5.5.2.2 SAR3 对 P-P FS 的干扰

5.5.2.2.1 分析结果 — FS 电台天线仰角的影响

对方位角和纬度不同的每个 FS 电台，分别采用 -5° 、 0° 和 5° FS 天线仰角进行模拟。为确定仰角对 FS 电台 I/N 电平的影响，比较了模拟结果，见图 16。

图 17 给出了在 0° 纬度 FS 接收机 I/N 值的累积分布函数 (CDF) 的分析结果。从图中可以看出，在 0.1% 水平上， -5° 仰角的 I/N 电平比 5° 仰角大约低 5 dB。相似的，在 0.1% 水平上， 0° 仰角的 I/N 电平比 5° 仰角大约低 3 dB。在 1% 水平上，三种 FS 天线仰角 CDF 曲线会聚。在本研究中，其他纬度 FS 电台也得到了相似结果。

5.5.2.2.2 分析结果 — FS 电台天线方位角的影响

对不同纬度的每个 FS 电台，采用相对于 SAR3 倾斜角 0° 、 45° 、 90° 和 180° FS 天线方位角分别进行模拟。为了确定方位角对 FS 电台 I/N 电平的影响，比较了两条有代表性的纬度的模拟结果，见图 18 和图 19。

图 18 给出了在 0° 纬度 FS 接收机 I/N 值 CDF 的结果，相似的还有 30° 纬度的结果，见图 18。从图 18 (0° 纬度) 可见，度量 FS 天线方位角变化影响的 I/N 电平很小，在 0.1% 水平上所有值之间相差大约 0.5 dB 以内。

图 17

0°纬度 FS 接收机的 I/N 电平 CDF

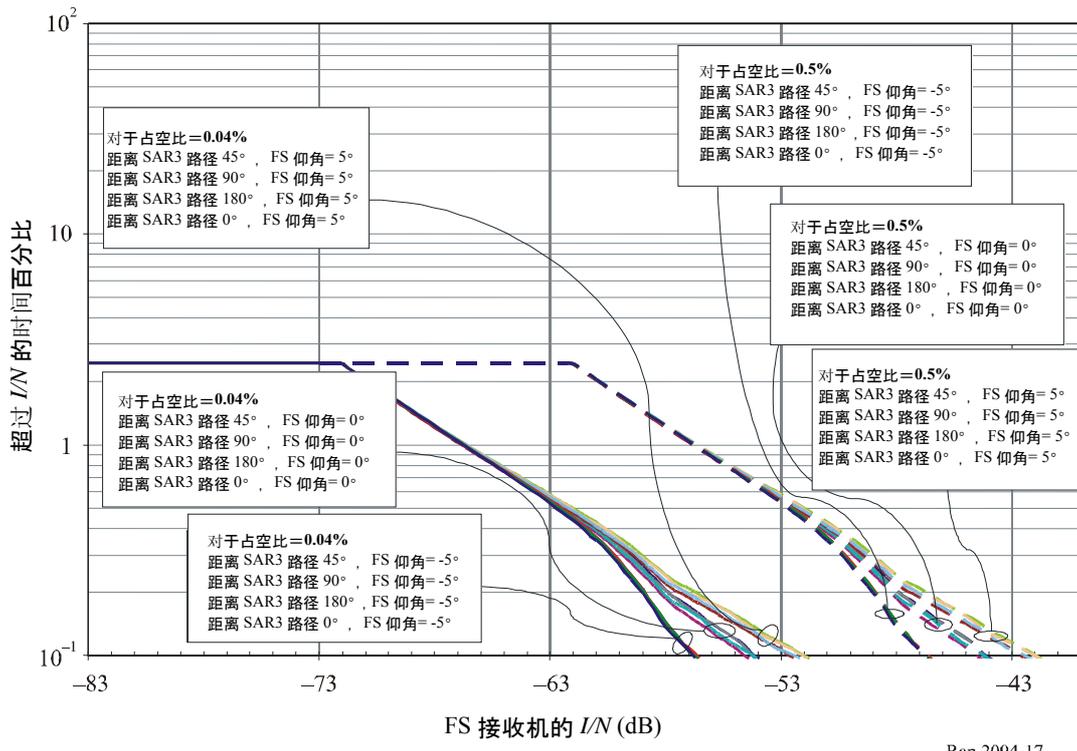


图 18

0°纬度 5°天线仰角 FS 接收机的 I/N 电平 CDF

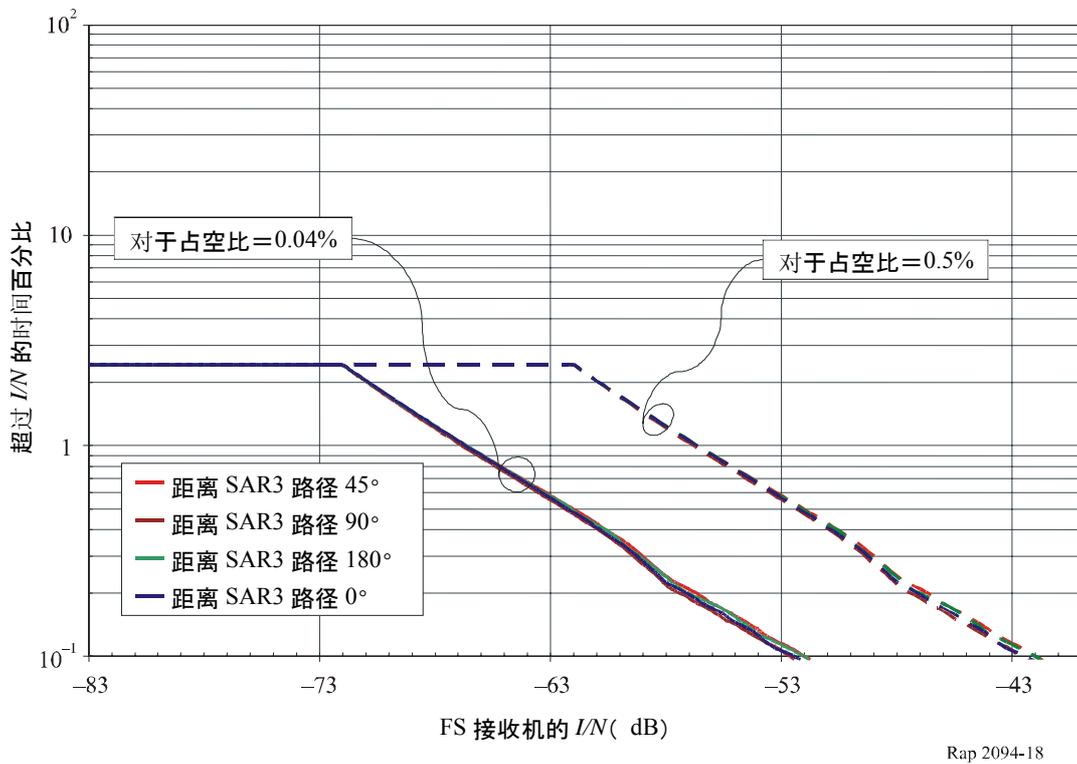
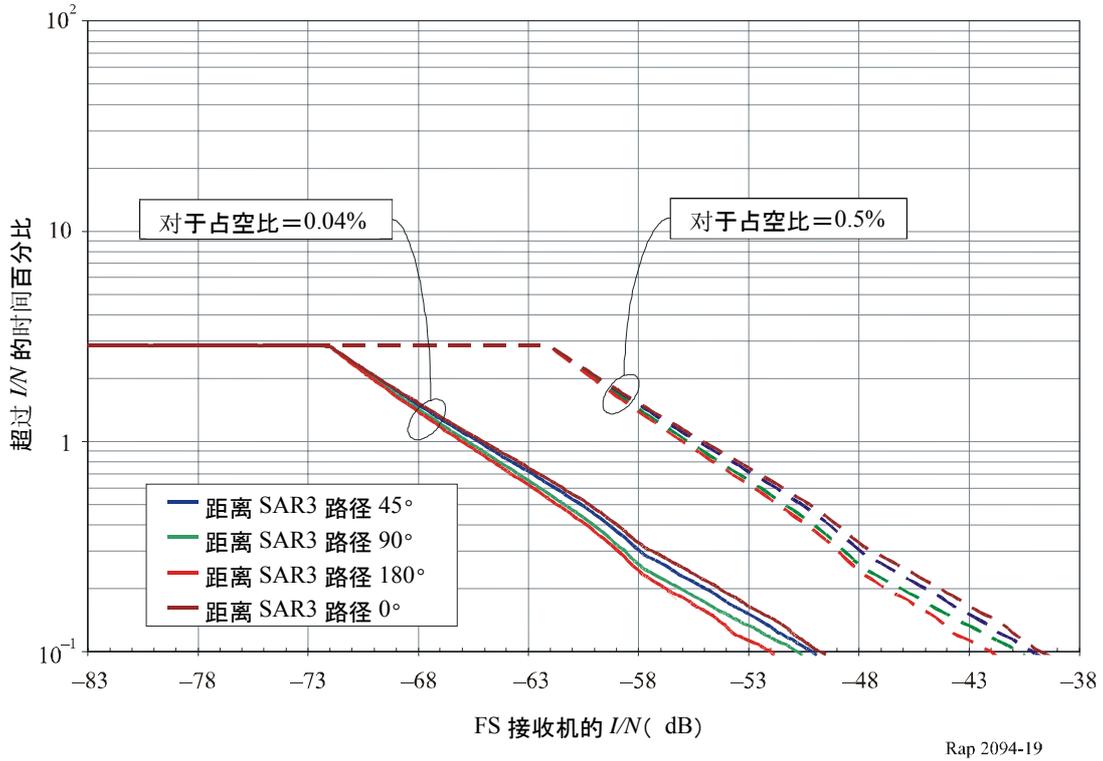


图 19

30°纬度 5°天线仰角 FS 接收机的 I/N 电平 CDF



相似的，见图 19（30°纬度），在 0.1%水平上相互之间的 I/N 电平大约在 2 dB 以内。在 1%水平上，四个 FS 天线方位角 CDF 曲线开始会聚。

本研究在其他纬度 FS 电台也得到相似结果。

5.5.2.2.3 分析结果 — FS 电台纬度的影响

在本文件此前的部分给出结果表明最坏情形 FS 天线仰角为 5°、最坏情形 FS 电台相对航天 SAR 的倾角的天线方位角为 0°或者 180°。这部分给出 FS 电台纬度对 FS 接收机 I/N 电平的影响。模拟中采用的 FS 电台纬度为-15°、0°、15°、30°和 45°。最坏情形结果说明见图 20，表 26 总结了结果。

图 20

不同纬度 FS 接收机在 EL = 5°最坏情形 I/N 电平 CDF

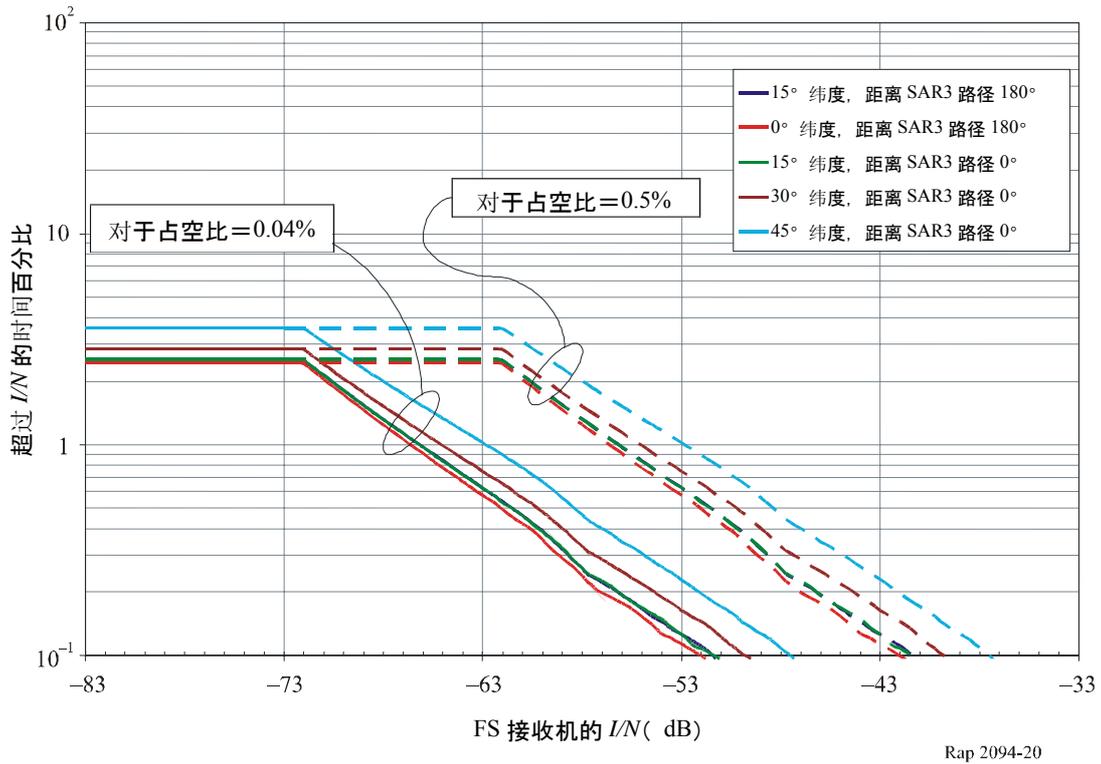


表 26

最坏情形干扰结果的总结

FS 电台 纬度 (度)	相对 SAR3 倾角 的 FS 天线方位 方向 (度)	FS 天线 仰角 (度)	FS 接收机 I/N 电平 (dB)		FS 接收机最大 I/N 电平 (dB) (0.04% 占空比/ 0.5% 占空比)	接收到最大 I/N 电平的 时间百分比 (%)
			1% 时间内 超过的 I/N (0.04% 占空比/ 0.5% 占空比)	0.1% 时间内 超过的 I/N (0.04% 占空比/ 0.5% 占空比)		
-15	180	5	-66.0/-56.0	-51.5/-41.5	-11.5/-1.5	0.04
0	180	5	-66.5/-56.5	-52.0/-42.0	-12.0/-2.0	0.04
15	0	5	-66.0/-56.0	-51.5/-41.5	-12.0/-2.0	0.06
30	0	5	-65.0/-55.0	-49.8/-39.8	-11.2/-1.2	0.07
45	0	5	-63.0/-53.0	-47.5/-37.5	-11.2/-1.2	0.03

5.5.3 分析结论

这项研究评估在 9 800 到 10 000 MHz 频带运行的 EESS(有源)航天 SAR 与 P-P FS 电台之间的兼容性。模拟结果如下：

- 无论 1 536 座 P-P FS 电台在全世界随机分布还是 1 536 座 P-P FS 电台在《无线电规则》第 5.477 款包括的主管部门中分布，航天 SAR 最大干扰电平都要比 SAR 干扰标准低大约 5.3 dB。

- 当 FS 天线相对 SAR3 倾角指向 5°仰角、0°或 180°方位角，航天 SAR 对 P-P 固定业务接收机的 I/N 电平是最坏情形。 I/N 电平随 FS 电台纬度变化，对位于 45°纬度 FS 电台最坏情形值为-53.0 dB、1%的时间超出脉冲占空比 0.5%。

6 航天 SAR 减扰技术实例

6.1 实例 1：在 9.6 GHz 附近 500 MHz 带宽范围内用于有源航天传感器减扰的 EESS（有源）发射特性的选择

6.1.1 用于减扰的 EESS（有源）特性选择

用 ITU-R RS.1280 建议书的程序，计算平均干扰信号功率电平。

表 1 比较了 SAR 干扰计算的关键参数。

SAR1、SAR2 和 SAR3 之间最显著的差异是脉宽和重复频率范围。SAR2 和 SAR3 最大和最小脉宽之差分别为 8 和 10。SAR2 最大脉冲重复频率值大约是最小值的 250%。

最后，认为分别计算 SAR2 的两个范围极值是合适的。表 27 和表 28 中，SAR2 分为：

- SAR2a 脉宽 10 μs ，PRF 2 000 Hz，天线增益 44.0 dBi。
- SAR2b 脉宽 80 μs ，PRF 4 500 Hz，天线增益 46.0 dBi。

通过这样做，给出了最大和最小干扰范围。

表 27

通过 SAR2a 传感器脉宽和线性调频带宽变化
降低接收到的无效传感器功率实例

	SAR2a 的新参数值			ΔOTR (dB)	ΔP_{avg} (dB)	ΔI (dB)
	τ (μs)	PRF (Hz)	B_c (MHz)			
雷达 1 (跟踪)	10	2 000	400	-16.0	1.4 ⁽¹⁾	-14.6
雷达 2 (搜索)	10	2 000	400	-19.0	-3.2	-22.3

⁽¹⁾ 用平均干扰信号功率表示机载雷达，用峰值干扰信号功率表示跟踪雷达被认为是合适的。

表 28

通过 SAR2b 传感器脉宽和线性调频带宽变化
降低接收到的无效传感器功率实例

	SAR2b 的新参数值			ΔOTR (dB)	ΔP_{avg} (dB)	ΔI (dB)
	τ (μs)	PRF (Hz)	B_c (MHz)			
雷达 1 (跟踪)	80	4 500	400	-7.0	3.4 ⁽¹⁾	-3.6
雷达 2 (搜索)	80	4 500	400	-19.0	11.3	-7.7

⁽¹⁾ 用平均干扰信号功率表示机载雷达，用峰值干扰信号功率表示跟踪雷达被认为是合适的。

SAR3 脉宽为 1-10 μs , PRF 410-515 Hz, 天线增益 39.5-42.5 dB, 接收到的无效传感器功率降低为 PRF 410 Hz, 天线增益 39.5 dB, 如表 29 和表 30 所示。分别计算 SAR3 两个范围脉宽和 PRF 的极值。表 29 和表 30 中, SAR3 分为:

- SAR3a 脉宽 1 μs , PRF 410 Hz, 天线增益 39.5 dBi。
- SAR3b 脉宽 10 μs , PRF 515 Hz, 天线增益 42.5 dBi。

如果表 1 中的航天传感器能够在如表 27 和表 28 中的不同脉宽和线性调频带宽运行, 那么可以显著降低无效信号的功率电平。例如, ITU-R RS.1280 建议书中假设有两部雷达在 9 500-9 800 MHz 运行:

- 跟踪雷达 IF 带宽 1 MHz (雷达 1);
- 搜索雷达 IF 带宽 5 MHz (雷达 2)。

表 29

通过 SAR3a 传感器脉宽和线性调频带宽变化
降低接收到的无效传感器功率实例

	SAR3a 的新参数值			ΔOTR (dB)	ΔP_{avg} (dB)	ΔI (dB)
	τ (μs)	PRF (Hz)	B_c (MHz)			
雷达 1 (跟踪)	1	410	450	-26.5	5.7 ⁽¹⁾	-20.9
雷达 2 (搜索)	1	410	450	-19.5	-15.9	-35.4

⁽¹⁾ 用平均干扰信号功率表示机载雷达，用峰值干扰信号功率表示跟踪雷达被认为是合适的。

表 30
通过 SAR3b 传感器脉宽和线性调频带宽变化
降低接收到的无效传感器功率实例

	SAR3b 的新参数值			ΔOTR (dB)	ΔP_{avg} (dB)	ΔI (dB)
	τ (μs)	PRF (Hz)	B_c (MHz)			
雷达 1 (跟踪)	10	515	450	-16.5	8.7 ⁽¹⁾	-7.9
雷达 2 (搜索)	10	515	450	-19.5	-1.9	-21.4

⁽¹⁾ 用平均干扰信号功率表示机载雷达，用峰值干扰信号功率表示跟踪雷达被认为是合适的。

6.1.2 分析结论

附件中给出了几个宽频带 SAR 技术和运行的特性。也计算并说明了选择哪种特性以及何种程度来减轻对地面和机载雷达潜在干扰影响。所有雷达 1 和雷达 2 带宽分别为 1 MHz 和 5 MHz 的情况表明确实会降低 SAR1 产生的干扰。

6.2 实例 2: 在 9.6 GHz 附近 500 MHz 带宽范围内使用有源航天传感器 SAR3 天线对 EESS (有源) 的减扰技术

这部分给出 SAR3 天线减扰技术用于兼容性和共用研究。

6.2.1 宽频有源航天传感器 SAR3 天线的技术特性

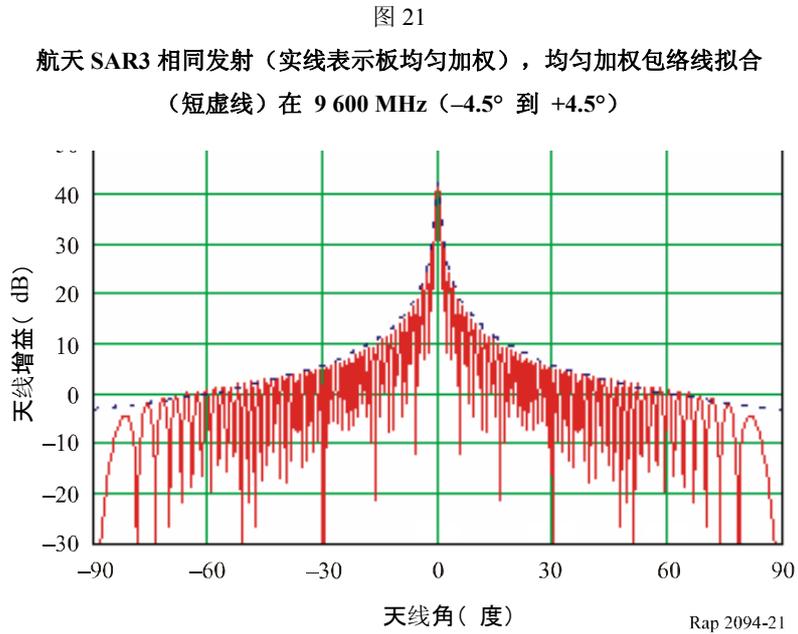
表 1 给出有源航天传感器 SAR3 的技术特性。SAR3 天线发射同接收相比，有一个不同的方位向天线增益模式。子阵列处理的方位分辨率能够提高到 1 米。子阵列处理中，阵列方位向长度分成子阵列，每个子阵列同时接收返回信号。方位向有效的接收阵列长度是子阵列长度，如方位向天线波束宽度比短的子阵列长度要大。发射天线模式使用所有子阵列并对阵列应用扰相，这样 3 dB 宽的方位增益模式大致与子阵列接收方位增益模式相同。对整个阵列相位加权的两个好处是 25 kW 的峰值发射功率能够适用，对应一个子阵列功率的 1/32。另一个好处是由于发射相扰，方位向天线增益模式随距离瞄准点的角度下降更快，因此旁瓣电平距离瞄准点的角度下降能够减扰。

6.2.1.1 设计参数

SAR3 发射线性 FM 脉冲，中心在 9.6 GHz 附近，脉冲重复率在 410 到 515 Hz 之间，如表 1 所示。为了得到 HH 或 VV 中的一种极化方式，发射和接收信号是垂直极化或水平极化。脉宽为 1-10 μs ，范围带宽为 450 MHz。

6.2.1.2 天线增益模式

对每块板均匀加权的天线增益模式以及对-90°到+90°之间的方位角拟合包络线如图 21 所示。



对均匀加权和相位加权，因为天线增益显著偏离主轴，线性相控阵列天线模式的刀缘效应也都引起减扰。

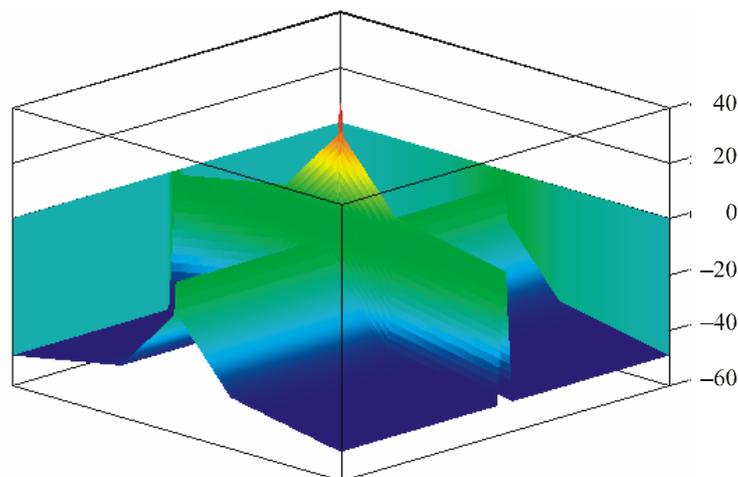
表 31 示出修改的天线增益公式。修改的公式沿方位向主轴保留-48 dBi 底限但消除不在轴上的全部 -5 dBi 底限。图 22 表示在 $-90^\circ < \theta_v < 90^\circ$ 和 $-90^\circ < \theta_h < 90^\circ$ 的仰角和方位角范围的天线增益模式。从这些公式显见沿主轴仰角和方位角的刀缘效应，在图中偏离坐标轴的区域，天线增益降到 -40 dB 以下。

表 31
在 9 600 MHz 修改的航天 SAR3 天线增益公式

方 式	增益 $G(\theta)$ (dBi) 作为 θ (度)离轴角的函数	角度范围 (度)
垂直 (仰角)	$G_v(\theta_v) = 42.5 - 9.92(\theta_v)^2$	$0 < \theta_v < 1.1$
	$G_v(\theta_v) = 31.4 - 0.83 \theta_v$	$1.1 \leq \theta_v < 30$
	$G_v(\theta_v) = 10.5 - 0.133 \theta_v$	$\theta_v \geq 30$
水平 (方位角)	$G_h(\theta_h) = 0.0 - 9.07(\theta_h)^2$	$0 < \theta_h < 1.15$
	$G_h(\theta_h) = +1.9 - 12.08 \theta_h$	$1.15 \leq \theta_h < 4.13$
	$G_h(\theta_h) = -48$	$\theta_h \geq 4.13$
波束方式	$G(\theta) = G_v(\theta_v) + G_h(\theta_h)$	

图 22

航天 SAR3 3D 天线模式在 9 600 MHz
 $(-90^\circ < \theta_h < +90^\circ$ 和 $-90^\circ < \theta_v < +90^\circ)$ 采用表 32 的公式



Rap 2094-22

6.2.2 地面雷达系统的技术特性

表 7 中 G3 系统被固定在 0° 仰角，波束宽仰角 0.81° ，因此当 SAR3 以 50° 倾角俯视，G3 系统在仰角旁瓣 40° 大约能看到 SAR3， 0.81° 波束宽大约在第 48 个旁瓣，旁瓣天线增益 -4 dBi，对相同照射，而实际照射很可能对仰角幅度加权以使旁瓣更快降低。

6.2.3 地面站的接收功率剖面

当卫星飞过已知地面站 G3，将计算 SAR3 到达 G3 的干扰功率剖面。通过对整个 50 m 天线长度相位加权得到第一个剖面，从有相同峰值 e.i.r.p 的子阵列发射得到第二个剖面。

用 ITU-R M.1461 建议书附件 1 中公式 (15) 和 (16) 计算在地面雷达站的 SAR 干扰功率。

SAR3 特性如表 1 所示。本例中 SAR3 到达 G3 的干扰脉宽 $10\mu\text{s}$ ，峰值天线增益 42.5 dBi。

从 44° 视角 SAR3 轨道在 G3 系统固定位置之上，在 2 分钟的轨道时间内 SAR3 到达 G3 的干扰电平如图 23 所示。

假设干扰门限值 $I/N - 10$ dB。对单一的板用均匀加权，SAR 超过门限值大约 118 s；而对阵列用相位加权，SAR 超过门限值大约 14 s。本例中相位加权技术实现了减扰，将 SAR 干扰超过地面雷达门限值的时间减少到八分之一。

如果采用表 31 中修改的天线增益公式，SAR3 天线增益就没有 -5 dBi 底限。假设航天器经过时，地面雷达在 SAR3 旁瓣内 23° 。因为 SAR3 轨道在 G3 系统固定位置之上，如果 23° 位于 SAR3 旁瓣内，在 2 分钟的轨道时间内 SAR3 对 G3 的干扰电平如图 4 所示。高接收功率剖面用 5 dBi 底限表示 SAR3 增益公式，表示 SAR3 主瓣经过地面雷达时接收到的干扰功率。低接收机功率剖面表示表 31 中修改的 SAR3 增益公式，表示 SAR3 主瓣偏离旁瓣 23° 接收到的干扰功率。

图 23

在 506 km 轨道高度 SAR3 对地面雷达 G3 的干扰电平
(对阵列采用相位加权或对板采用均匀加权)

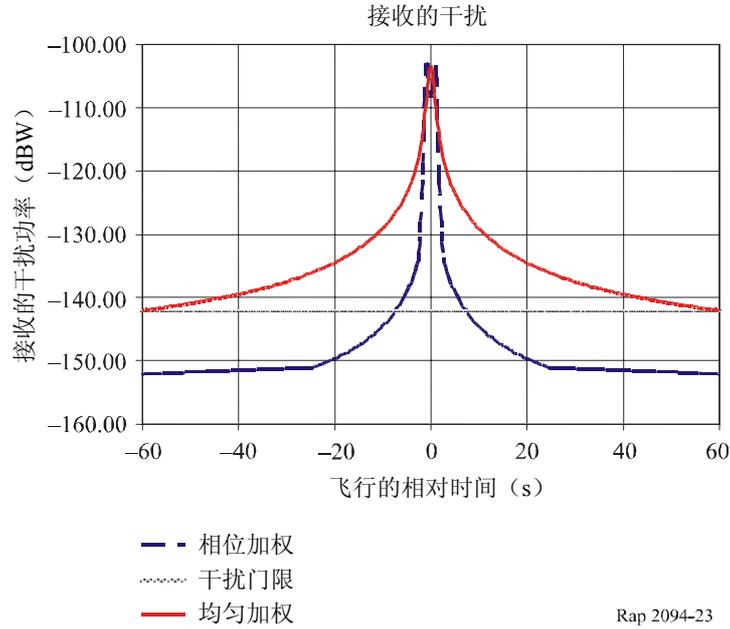
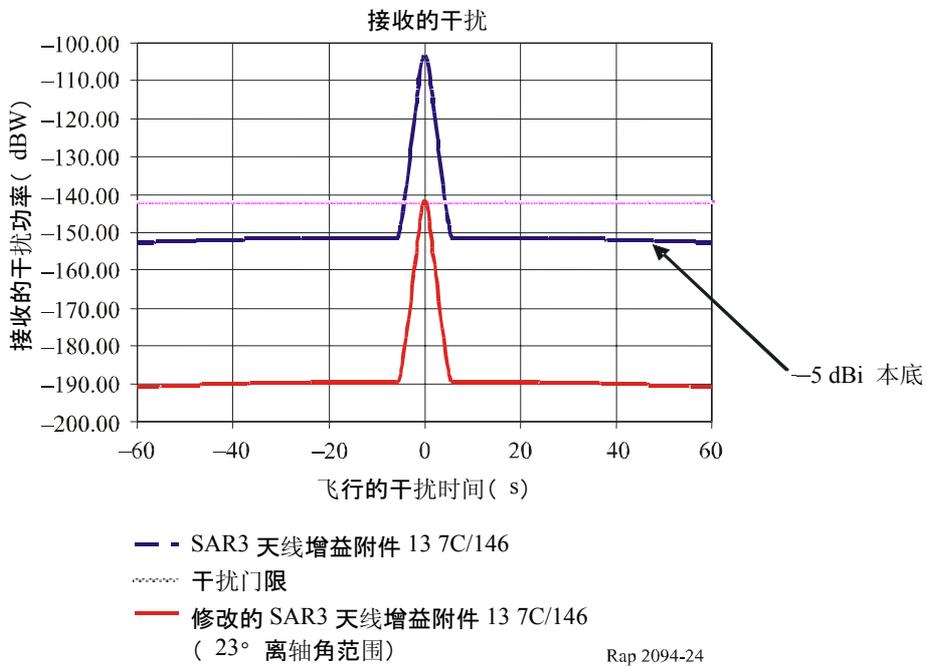


图 24

在 506 km 轨道高度 SAR3 对地面雷达 G3 的干扰电平
(采用表 31 中 SAR3 原始天线增益公式和修改公式)



6.2.4 分析结论

本文件给出对频段 SAR3 天线阵列采用相位加权的减扰技术。结果表明相位加权方法能够显著减少从 SAR 天线旁瓣到达地面雷达的干扰。减扰技术能改善 SAR 与地面雷达的共用状况。

7 总结和结论

本报告详细介绍了 EESS（有源）与无线电测定业务之间在 9 300-9 500 MHz 和 9 800-10 000 MHz EESS 频段以及 EESS（有源）与固定业务在 9 800-10 000 MHz 频段兼容性的研究详情。除了这些兼容性和干扰的研究，报告也给出了 EESS（有源）减扰技术的信息。

8 支持文件

ITU-R 文本

Recommendation ITU-R M.1796 – Characteristics of and protection criteria for terrestrial radars operating in the radiodetermination service in the frequency band 8 500-10 500 MHz.

Report ITU-R M.2081 – Test results illustrating compatibility between representative radionavigation systems and radiolocation and EESS systems in the band 8.5-10 GHz.

Recommendation ITU-R F.758-4 – Considerations in the development of criteria for sharing between the terrestrial fixed service and other services (January 2005).

Recommendation ITU-R SM.337-4 – Frequency and distance separation (October 1997).

Recommendation ITU-R SM.1541-1 – Unwanted emissions in the out-of-band domain (November 2002).

Recommendation ITU-R RS.1166-2 – Performance and interference criteria for spaceborne active sensors (October 1999) (Replaces ITU-R SA.1166-2).

Recommendation ITU-R M.1461-1 – Procedures for determining the potential for interference between radars operating in the radiodetermination service and systems in other services (June 2003).

Recommendation ITU-R M.1372-1 – Efficient use of the radio spectrum by radar stations in the radiodetermination service (June 2003).

Recommendation ITU-R RS.1280 – Selection of active spaceborne sensor emission characteristics to mitigate the potential for interference to terrestrial radars operating in frequency bands 1-10 GHz (October 1997).
