

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R M.2059-0 建议书
(02/2014)

使用4 200-4 400 MHz频段的
无线电高度仪的操作和
技术特性及保护标准

M 系列
移动、无线电测定、业余
和相关卫星业务

150
1869-2015



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
2015年，日内瓦

© 国际电联 2015

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.2059-0 建议书

使用4 200-4 400 MHz频段的无线电高度仪的
操作和技术特性及保护标准

(2014年)

范围

此建议书介绍了航空导航业务使用的无线电高度仪的技术和操作特性及保护标准。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 无线电高度仪是航空生命安全系统不可或缺的一个组成部分，包括精确进场、降落、近地和防碰撞系统。
- b) 无线电高度仪系统工作在航空无线电导航业务中；
- c) 无线电高度仪已经适用于所有类型的飞机几十年；
- d) 无线电高度仪在整个飞行期间运行而且工作时必须没有有害干扰；
- e) 在单独一架飞机上的一个无线电高度仪系统包括最多三个相同的无线电高度仪；
- f) 有必要在全世界范围记录无线电高度仪系统的频谱使用特性和部署；
- g) 位于同一架飞机上的无线电高度仪之间的共存是通过技术和操作上的缓解方法来实现的，

认识到

- a) 航空无线电导航业务是一项安全业务；
- b) 无线电高度仪系统在全世界范围工作在4 200-4 400 MHz频段中；
- c) 频谱管理和部署规划需要无线电高度仪系统的代表性技术和操作特性及保护标准，
- d) 对无线电高度仪适航性的验证是一个漫长和高代价的过程；
- e) 无线电高度仪要求一个196 MHz的带宽，

注意

- a) 根据RR No. 4.10，无线电导航及其他安全业务的安全问题要求特别的措施来保证其免受有害的干扰；
- b) 对无线电高度仪的管理要求是由国际民用航空组织（ICAO）制定的；
- c) ITU-R M.1461建议书被用作对工作在无线电测定业务中的雷达与其他业务中的系统之间兼容性进行分析的指导原则；

建议

- 1 在附件1和附件2中描述的无线电高度仪的工作和技术特性应该被视为工作在4 200-4 400 MHz频段中那些系统的代表，并且应该被用于进行兼容性研究；
- 2 在附件3中所提供的保护标准应该被用于对无线电高度仪运行的保护。

附件1

工作特性

1 引言

4 200-4 400 MHz频段当前被划分给航空无线电导航业务（ARNS），并且被无线电规则脚注No. 5.438专门保留用于安装在飞机上的无线电高度仪和在地面上的相关收发器。

一个无线电高度仪的基本功能是在飞机飞行的进场、降落和爬升阶段以一个高度准确性和完整性提供地球表面以上的准确高度测量，描述范围广泛的反射性。这样的信息被用于很多目的，而且不管地球表面如何都必须实现那些测量的高度准确性和完整性，例如在自动进场降落阶段中的最后进场和平飘引导期间。它还被用来确定飞机能够安全降落的特定高度，以及作为地形感知告警系统（TAWS）的一个输入，它在一个预先确定的高度和接近速率给出一个“拉起”告警；并且作为对防撞设备和气象雷达（预测风切变系统）、自动油门（导航）和飞行控制（自动驾驶）的一个输入。

无线电高度仪系统被设计在它们所安装的飞机的整个寿命期间工作。安装的寿命可能超过30年，结果导致宽的设备寿命、性能和容限范围。

2 高度仪

现在有二种使用中的无线电高度仪。一种采用调频连续波（FMCW）调制，第二种使用脉冲调制。以下各节提供了关于这些类型无线电高度仪的信息。

2.1 调频载波高度仪

2.1.1 工作描述

一个无线电高度仪的目的是为飞机提供到该飞机下面地球表面最小距离的一个准确、独立和绝对的测量。通常，无线电高度仪具有从-6米到6 000米（-20英尺到19 685英尺）的一个测量范围。但是有例外，一些高度仪具有一个大于15 000米（49 213英尺）的测量范围。无线电高度仪是航空生命安全系统一个不可或缺的组成部分，包括精确进场、降落、近地和防碰撞系统。无线电高度仪对自动驾驶和低能见度降落是必不可少的。此外，无线电高度仪在人工降落时被用来在将要或自动参与到一个被称为“平飘”的操作中帮助警告一个驾驶

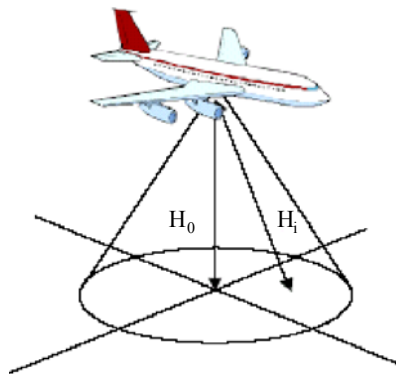
员，这是刚好在触地之前完成，以减少降落触地的力。一个无线电高度仪还作用为一架飞机地形规避警告系统的一部分，提供在驾驶舱中的预测前视能力，以及如果有必要，在一架飞机降落到一定高度以下或过于接近地面时提供一个告警。

因为无线电高度仪对一架飞机安全操作的重要性，它们被包括在进行乘客业务认证的飞机最低限度设备清单中。此外，在“一个软件/硬件失效将引起和/或促使飞机飞行控制系统灾难性失效”的情况下，它们必须对所有运输飞机按照一个安全关键程度评级或设计保障等级（DAL）“A”进行认证，而在“一个软件/硬件失效将会引起和/或促使飞行控制系统中一个危险/严重失效”的情况下，对商业和区域飞机按照一个DAL“B”进行认证。设计保障等级是一个从A到E的安全关键程度评级，而A/B级是最关键并要求最严格的认证过程。

在一架飞机上的无线电高度仪系统包括多达三个相同的无线电高度仪收发机（Tx/Rx）单元及它们的相关设备。所有Tx/Rx单元同时运行，并且相互独立。无线电高度是根据一个源自飞机的信号被从地面反射回来的时间间隔计算出来的。要求设计用于自动降落系统中的无线电高度仪要达到一个0.9米（3英尺）的精度。分别或组合使用的多种方法被用来避免高度仪对高度仪的相互干扰。首先，可以使每个高度仪的中心频率偏离开。其次，传输可以在时间上偏离开。第三，可以通过频率带宽和/或调制周期使传输偏离开。采用这些选项之一或组合将引起在单独一架飞机上的占用带宽大于任何单独一个无线电高度仪的所需带宽。

图1显示了无线电高度仪信号的位置和传输方向。

图 1



M.2059-01

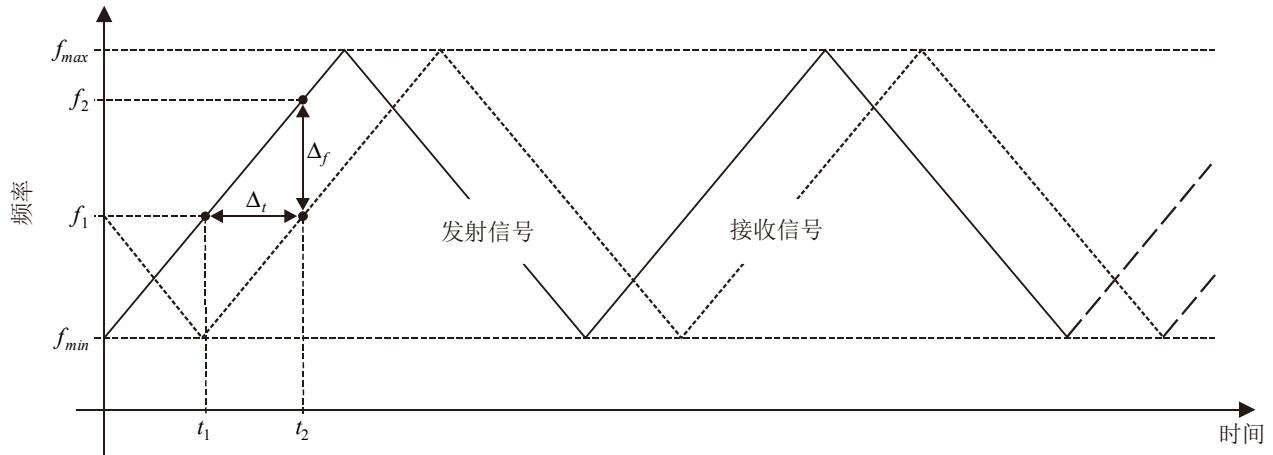
2.1.2 工作原理

FMCW无线电高度仪采用一个与分别的发射/接收天线相连的Tx/Rx运行。运行要求将一个来自发射天线的信号射向地面。当该信号触及地面时，它被反射回接收天线。然后该系统进行一个时间计算来确定该飞机和地面之间的距离，因为该飞机的高度正比于发射信号完成往返行程所需要的时间。由Tx/Rx产生的调频（FM）信号不能从驾驶舱中进行调谐。计算是基于一个在4 200-4 400 MHz频段中发射的信号将以相同的频率返回。但是，在信号行进到地面并返回所用的时间期间，发射机频率已经改变。发射和接收频率之差（ Δf ）直接正比于飞机在地面以上的高度，并且取决于FMCW调制的精确斜率（范围比周期），如图2所示。

如图2所示，一个高度是通过确定反射信号的频率 f_1 和在反射信号被接收的瞬间 t_2 发射的信号频率 f_2 之差来计算的。这个差分频率 Δf 直接正比于反射信号穿过从飞机到地面并返回该飞机的距离所需要的时间 Δt 。

图 2

典型调频载波无线电高度仪发射和接收信号



M.2059-02

三角形FMCW波形的周期能够根据高度可变。在每个瞬间，通过将发射波（具有频率 f_2 ）和接收波（具有频率 f_1 ）混合来得到一个差拍信号。此信号的频率 Δf 等于：

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (1)$$

知道了 Δt 或 Δf ，可以采用以下公式计算出在地面以上的高度：

$$H_0 = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{c\Delta f}{2(df/dt)} \quad (2)$$

其中：

- H_0 : 地面以上的高度 (m)
- c : 飞行速度 (m/s)
- Δt : 实测时间差 (s)
- Δf : 实测频率差 (Hz)
- df/dt : 每单位时间的发射机频移 (Hz/s)。

2.2 脉冲高度仪

2.2.1 工作描述

类似于FMCW，脉冲高度仪为飞机提供对到该飞机之下地球表面最小距离的准确、独立和绝对测量。典型的脉冲无线电高度仪具有从-6米到2 500米（-20英尺到8 200英尺）的报告高度范围和一个12 km（39 360英尺）的工作高度。

任何对潜在干扰汇聚影响的分析必须在工作高度计算，高度仪在那里持续搜索地面并容易受到可能导致虚假高度跟踪的干扰。脉冲无线电高度仪的功能还包括精确进场、降落、近地和自动驾驶降落以及在低能见度情况下所必需的防碰撞系统，作用为一架飞机地形规避告警系统的一部分，提供在驾驶舱中的预测前视能力，并且一旦有必要，在一架飞机下降到一定高度以下或过于接近地面时提供一个告警。

2.2.2 脉冲高度仪的工作原理

脉冲型无线电高度仪采用一个向着地球发射的射频能量脉冲来测量在该飞机正下方地面之上的绝对高度。对发射脉冲和接收脉冲之间的时间差进行测量。在电磁能量传播速率已知并且是常数的情况下，该时间正比于飞机的高度。

脉冲雷达高度仪的功能是要提供地面和飞机底部之间的地形间距或高度。脉冲高度仪还可以提供垂直爬升或下降速率和可选低高度告警。性能特性要设计得适合于可能需要以高垂直速率跟踪高度情况下的特殊应用。脉冲雷达高度仪还要被设计得能够支持自动降落和直升机上的自动悬停功能。

2.3 应用

要求设计用在自动降落系统中的无线电高度仪要达到一个0.9米（3英尺）或更高的准确度。这样的高程读数被传送到飞行员的观察显示器和多个自动安全部件。无线电高度仪提供一个自动飞行控制系统¹的必要信息分量，用于进场和降落、近地告警系统²、地面感知和告警系统³、飞行管理引导计算机、飞行控制系统、电子中央飞机监视⁴和发动机指示和机组警

¹ 一个包括了所有设备的系统，自动控制一个飞机沿着由该飞机内部或外部参照所描述的一条路径或高度飞行。

² 此系统在超过一定门限时警示飞行机组，例如过度的下降速率、50和2 450英尺之间的无线电高度。

³ 这是地面接近告警系统的一个增强版。

⁴ 一个监视飞机功能并将它们转送给驾驶员的系统。该系统显示要由驾驶员采取的修正行动，以及故障之后的系统限制。

示系统⁵。此外，来自无线电高度仪的高程信息被传送到交通防撞系统和广播式自动相关检测系统，它们被用来监视一架飞机周围的空域，并警告飞行员任何空中碰撞的威胁。

来自无线电高度仪的信息在低能见度条件下特别关键，但一直是必不可少的。通常，如果一个系统在起飞前的检查指示无线电高度仪不工作，飞行必须要被暂停。如果在飞行期间失去来自无线电高度仪的信号，防碰撞和以上列举的其他安全系统受到严重的影响。如果当一架飞机进场和降落时无线电高度仪工作不正常，自动驾驶系统将不能正常工作。在最好的情形下，一个机组将人工飞行进场或转向另外一个机场。但是，这增加了机组的工作负荷并降低了进场的能力，可能导致一个“复飞”错过进场。这样重复的降落尝试可能严重影响已经拥堵的降落航线，增加空中交通管制负荷并引发安全担忧。此外，对一定类型的机场和气象条件，失去无线电高度仪系统将妨碍授权飞机降落。因而强迫该飞机或者飞行一个等待航线直到天气改善，或者转飞到另外一个机场。因为无线电高度仪功能的重要性，必须要保护划分并被这些装置使用的频谱免受有害干扰，并且足以满足准确度要求。

2.3.1 运行场景

飞机进场和降落

分析一架飞机从18.5 km (10 nm) 到跑道进口的一个典型降落轨迹，主要使用的航空电子系统部件是仪表/微波降落系统、测距设备、卫星导航系统无线电高度仪、惯性参考系和提供气压高度和空速的空气数据计算机。飞行管理和飞行控制计算机持续监视传感器数据输入并将此数据关联来保证它们是在特定的参数限制之内，特别是关联传感器之间的无线电高度仪高度读数，使之在容限范围之内。使用自动油门；保持一个具有受控下降速率和速度的稳定进场。在一个预先确立的高度上，滑行路径垂直信息传感器数据由飞行管理计算机产生，而跑道表面之上的垂直高度由采用以英尺为单位的声讯通知的无线电高度仪提供，发起飞机平飘来触地。平飘阶段受采用来自无线电高度仪信息的自动驾驶系统的控制。这个飞行路线可以在正常或低能见度情况下实现。

如果一架飞机失去或接收错误的无线电高度仪数据，根据飞机的类型、机场降落要求或等级和天气将产生多个后果。丢失无线电高度仪数据将自动驾驶无法使用，导致驾驶员和副驾驶人工飞行和降落飞机。一些机场类型或一定的气象条件将禁止某些类型的飞机没有高度仪数据进行降落。如果仅仅一个无线电高度仪运行，则当做出降落飞机的决定时，地面以上的高度必需被调整到一个较高的高度。如果能见度差，则飞机可能会被迫等待直到天气变好或在另外一个机场降落。如果在降落的最后阶段无线电高度仪信号受到有害干扰，则可能发生一个危险或灾难性的情形。最好情况下，飞行机组负荷显著增加；最差情况下，飞机、机组和乘客被置于一个灾难性的情形下。

⁵ 用在现代飞机中的一个系统，向飞机机组提供对发动机和其他系统的检查手段。该系统以“检查表”的形式显示要由驾驶员采取的修正行动。

地形回避和近地告警系统

飞机上的一个近地告警系统（GPWS）在该飞机接近飞机下面的地面时向飞行机组提供一个自动和非常独特的声讯告警。另外一种近地告警系统被称为地形规避告警系统（TAWS），它也根据在该飞机前面的近地威胁程度提供独特的声讯告警。

GPWS和TAWS的设计和目的是要防止受控飞行撞地（CFIT）。无线电高度仪被集成进飞机飞行管理计算机系统并向GPWS和TWS提供关键的数据，例如飞机在地面以上的有效高度。通过一起工作，无线电高度仪、TAWS和GPWS使得在飞近地面时能够安全运行，通常在低能见度工作期间、精确进场和降落、或在山区。

按照ICAO附件6 – 第1部分第6章，GPWS在危险飞行条件下提供对时间敏感的告警。要求具有GPWS功能的TAWS向飞行机组提供飞机在地面以上高度的即刻情形通知。

GPWS警示基于无线电高度，而且是从提供给系统的输入推算出来的，并且从10到1 538米（30到5 000英尺）有效。声讯通知的模式是：

- 模式1 过度下降速率和危险下降速率
- 模式2 过度地面接近速率
- 模式3 起飞或复飞后负爬升速率或高度损失
- 模式4 当不在降落配置中时的不安全地面间隙
- 模式5 低于一个ILS滑行斜率的过度偏差
- 模式6 侧倾角提醒

所有这些模式都依赖于无线电高度仪提供的地面以上高度的信息，以向机组提供适当的提醒（警示和警告）来避免碰撞、避免飞机以一个错误的飞机配置降落（起落架或副翼在一个错误的位置），并向机组提供关于该飞机沿着其进场路径距离地面相对高度的信息读数。对高度期望的准确度在0.3至0.9米（1至3英尺）的范围之内。

这些模式大多数是基于规定的保护包线，特别是带有由无线电高度仪提供的实际高度。

通过比较，TAWS提供对潜在危险飞行条件的预测性和及时的前视提醒，包括地形接近和与地面碰撞风险。与GPWS相似，无线电高度仪提供与飞机在地面以上高度相关的垂直数据。

TAWS在所有最大认证起飞重量超过5 700 kg或批准携带多于9名乘客的涡轮发动机飞机上是强制要求的，对于直升机也同样。

不能够提供一个正确高度将极大可能因为未能以一个及时的方式提醒机组使他们能够采取适当的行动来避免与地面碰撞而导致一个危险或灾难性情况。

3 ICAO要求

ICAO附件第6部分第6章为一定的飞机重量分类规定了强制携带具有前视性地形功能的GPWS和TAWS。除了这些要求之外，很多管理机构的航空法规和适航性要求强制要求携带这样的设备，因为它直接关系到飞机的适航性和证书发放要求。

ICAO附件第6部分第1章规定：

“所有最大认证起飞质量超过15 000 kg或批准运载超过30名乘客的涡轮发动机飞机应该装备一个具有前视地形规避功能的近地告警系统。（其他段落对不同的飞机重量分类提出了类似的规定。）”

附件 2

技术特性

1 技术描述

1.1 无线电高度仪调制和接收机灵敏度

目前应用中的无线电高度仪采用二种雷达波形调制方法，被称为线性调频 – 连续波，或者LFMCW或FMCW和脉冲调制。作为复杂性最小的方法，FM/LFMCW调制波形被用于在触地之前关键高度提供极其准确的高度测量。要求这个准确度来向飞行控制和自动驾驶提供平滑连续数据，用于在能见度受限情况下的自动降落。此数据在飞行员对跑道的观察受限时特别关键。

雷达高度仪具有表1和2中所示最小检测门限的灵敏接收机。基本FMCW无线电高度仪包括一个“零差”系统，它提取当前发射波形的一部分，并把它作为一个参照提供给接收机混频器。这个配置直接将所有接收到的信号下变频给一个基带接收机。尽管典型雷达高度仪的信号处理带宽可以小于每个高度距离单元100 Hz，但总的接收机带宽可能有数MHz宽，取决于选定的频率调制率和高度延迟时间。最新的无线电高度仪实施应用了下变频和数字化信号的数字处理。这个对接收信号的后处理通常是在频域完成。出于此目的，接收并下变频的信号被应用于一个快速傅里叶变换（FFT）。在此变换级之后，判决算法（通常是专有的）从该信号提取高度信息。具有一个固定三角形FMCW波形时长的FMCW雷达通过在宽带接收机带宽内目标频谱频率的线性关系来测量到一个目标的距离。一个被测目标的频谱频率越高，则到该目标的距离越大，而在接收机通带中一个目标的频谱频率越低，则距离越近。具有可变三角形FMCW波形时长的FMCW雷达通过该三角形波形周期的时长测量到一个目标的距离。

所有FMCW 无线电高度仪通过频谱分析或三角形FMCW波形的时长来确定高度。一些无线电高度仪将一种“过零计数”方法用作计算主信号频率的手段，而其他无线电高度仪使用FFT数字处理技术，并且随后应用从接收信号提取高度信息的算法。

应该明白，任何不可预测且可与线性FM波形混合后导致无线电高度仪将混合信号误认为是地形的干扰有可能引起无线电高度仪报告一个虚假高度。

在干扰调制随着在接收机混频器中与线性FM参考混合而分布在数MHz带宽上的情况下，其影响是由每个接收辐射器的贡献增加提升FMCW雷达接收机的本底噪声。关键是要理解，线性变化调频引起一个相对窄带的载波，它落入或接近将要扫描通过该无线电高度仪接收机通带某些部分的高度仪调制的边缘。

在表1和2中有多种脉冲雷达高度仪实例。脉冲高度仪系统包括一个接收机-发射机、集成或远程高度指示器和各种天线选项。

飞机高度是由一个脉冲高度仪通过测量发射和从地球表面反射回来的接收脉冲之间的时延来确定的。一些脉冲高度仪的变化类型具有能够将一个天线用于发射与接收的优点。一个专用雷达高度仪天线的天线波束宽度必须要宽到足以适应飞机的正常横滚和俯仰角，它们导致返回信号时延的一个明显变化。为了提供到天线波束边界之内最近返回的距离，很多脉冲雷达高度仪包含了一个前沿距离跟踪器伺服环。此跟踪器的作用是在一个脉冲调制雷达中在返回信号的前沿设置一个闸门。

对一个脉冲高度仪，是通过将流逝时间除以光速的商减半来给出高度 ($h = (ct) / 2$ ，其中 h 是飞机的高度， c 是光速，而 t 是发射和接收之间流逝的时间)。从发射机馈入一个时间参考信号来触发一个精确斜坡发生器。将斜坡电压与正比于指示高度的测距电压相比较。

关键是要注意，对使用高度仪频段的潜在干扰源汇聚影响的任何评估必须要使用在表1和2中所规定的“工作高度”，而不是“报告高度的范围”。使用“工作高度”是合乎情理的，因为所有无线电高度仪以一个高度搜索模式在它们飞行的全部时间持续工作在它们“报告高度范围”之外。其结果是，在高度搜索模式期间，无线电高度仪容易受到将干扰检测为虚假高度的影响，这将反过来引起依赖无线电高度的系统之间的不恰当反应，例如近地告警、气象雷达、TCAS、飞行控制和其他关键系统。

1.2 无线电高度仪天线方向图

所有无线电高度仪采用一个提供8到13 dBi增益和35到60度之间天线方向图3 dB（半功率）点覆盖的天线设计。飞机在飞行中可能执行的俯仰和横滚角的宽泛范围使得需要这些宽的天线波束。天线方向图基本是圆锥形并且是线性、水平极化的。但是，以指向N、S、E、W表示的H极化辐射的实际方向完全取决于飞机的飞行矢量。在任何产品无线电高度仪天线中未说明对垂直极化信号的交叉极化隔离度，因而不可能依靠它来通过选择一个垂直极化传输对高度仪提供任何抗干扰的保护措施。

因为所有无线电高度仪天线必须要指向地球表面，使得系统容易受到进场期间发射的所有可能干扰源的影响。由于它们位于飞机上，高度仪天线无法利用对地球表面上很多可能干扰源进行遮挡或屏蔽。相反，它实际上可以在所有可能的辐射源从建筑物中泄露和从在何建筑之外工作的装置直接发射时“看到”它们。

如果传播路径是在一个正交于飞机底部的矢量的 $\pm 30^\circ$ 之内，应该使用如在表1和2中所提供的无线电高度仪天线的峰值增益。共享和兼容性研究应该考虑到飞机角位置在横滚中能够达到 $\pm 45^\circ$ ，而在俯仰中能够达到 $\pm 20^\circ$ 。在此角度范围之外，无线电高度仪的增益应该基于天线的特性（见表1和2）。

1.3 测量准确度

在RTCA DO-155“最小性能标准-机载低范围雷达高度仪”及EUROCAE ED30中规定了绝对测量准确度要求，规定在46米（150英尺）以下高度的测量准确度应在0.9米（3英尺）以内。在按照RTCA DO-155进行测量时，ARINC 707要求在整个-6.1至762米（-20至2 500英尺）高度范围中的指示高度上的测量准确度应在0.45米（1.5英尺）或2%之内，取较大者。在可用带宽之内，是采用信号数据处理技术来实现这种准确度要求。但是，这样的技术只有采用极其高的信噪比并且在低高度的跑道平坦表面上才是可能的。对特定带宽的使用，见表1和2。

1.4 预防单元间干扰-频率偏置

一些飞机同时使用高达三个无线电高度仪。要求多个高度仪来为小于 1×10^{-9} （10亿分之一）的发生虚假高度数据被自动驾驶或飞行控制系统接受的概率提供保护。为了允许天线安装在相互距离数英尺之内的三个无线电高度仪同时共存，很多无线电高度仪系统采用一个偏置的中心频率来工作，以减少相互干扰的概率。通常，频率偏置大约为5 MHz。因此，如果二个高度仪系统被安装在单独一架飞机上，要求一个附加的5 MHz，而对具有三个高度仪的飞机要求附加一个10 MHz。

1.5 无线电高度仪的频率稳定性

运行中的巨大数量无线电高度仪是基于一个电压控制振荡器（VCO）的“开环”线性调频，它工作在一个大约4 300 MHz的中心频率，在一个 -55° 至 $+70^\circ\text{C}$ 温度变化范围上的频率稳定性通常高达 ± 25 MHz。

2 要求的无线电高度仪总带宽

为了确定由一架飞机无线电高度仪系统所使用的带宽，必须考虑多个因素。首先，啁啾带宽必须与无线电高度仪的频率稳定性相结合。已知无线电高度仪系统对生命和财产安全性的重要性，建议采用-40 dB下降带宽来确定传输信号带宽。第三，必须要包括一个工作或安装因子。在一个大飞机上，采用二个或三个高度仪系统，而且这些系统可以使用一个5 MHz

至10 MHz的频率偏置。还要注意，接收带宽至少应该包括在所有工作情况下的发射器带宽；以及特别是由于温度范围引起的漂移。

如果在一架飞机上安装了多于一个无线电高度仪，中心频率不能总是在4 300 MHz。在一架具有二个或三个无线电高度仪的飞机上，高度仪可以采用二个或三个相对于4 300 MHz的中心频率偏置来避免相互干扰。高度仪系统还可以偏置时序、周期或跨距。以这种方式，在每架飞机上使用的带宽大于任何单独一个无线电高度仪的带宽。

脉冲雷达高度仪使用扩频技术来达到要求的准确度和信号完整性，它能够使用4 200-4 400 MHz频段中可用的整个200 MHz带宽。

此外，无线电高度仪以宽的带宽运行来达到必要的准确度级别，这对用于飞机进场和降落的自动飞行控制系统特别重要。减少可用频率带宽成比例地减少了无线电高度仪的准确度。

FMCW雷达高度仪接收机使用一个带通滤波器，这意味着避免在工作频段之外高强度辐射场（HIRF）传输的劣化或无线电高度仪性能的损伤。但是，带通滤波器对抗接近所用频段的发射的能力有限。其结果是，高度仪的性能可能受到频段边缘处信号的影响。

表1和2提供了代表性模拟和数字FMCW无线电高度仪的技术特性。

表 1 (续)

	无线电高度仪 A1	无线电高度仪 A2	无线电高度仪 A3	无线电高度仪 A4	无线电高度仪 A5	无线电高度仪 A6	单位
各个无线电高度仪系统 之间的中心频率偏置	5	5	0	不适用	不适用	不适用	MHz
波形重复频率	49 至 51 Hz	150 Hz	12 Hz 至 1 623 Hz	10 000 pps	20 000 pps	6 000 pps	Hz 或 pps (脉冲/秒)
脉冲宽度	不适用	不适用	不适用	130	200	75	ns
3 dB发射带宽	110	162.8	171	8	7	15	MHz
20 dB发射带宽	120	170	181	44	29	51	MHz
40 dB发射带宽	180	180	191	130	108	131	MHz
接收机							
灵敏度*	-120	< -113	? -120	-95	-95	-95	dBm
噪声指数	10	6	6	10	10	10	dB
$P_{T,RF}$ 输入功率门限接 收机过载	-30	-53	-56	-40	-40	-40	dBm
-3 dB中频 (IF) 带宽	2	0.25	0.025 至 2	9.2	6.0	16	MHz

表1 (完)

	无线电高度仪 A1	无线电高度仪 A2	无线电高度仪 A3	无线电高度仪 A4	无线电高度仪 A5	无线电高度仪 A6	单位
天线							
天线增益	10	10 典型, 9.5 最小	10 典型, 但可能 会使用不同 天线	13	11	11	dB _i
电缆损耗 (单路径)	6	6	2 至 7	6	6	6	dB
-3 dB波束宽度	40 至 60	55	45 至 60	35	45	45	度

* 对以上所列出的一些无线电高度仪, 根据IF带宽和噪声指数计算的接收机噪声功率电平高于接收机灵敏度电平。在这些情况下, 通常低于IF带宽的无线电高度仪检测带宽决定了接收机的灵敏度电平。

表 2
数字无线电高度仪

	无线电高度仪 D1	无线电高度仪 D2	无线电高度仪 D3	无线电高度仪 D4	单位
发射机					
标称中心频率	4 300	4 300	4 300	4 300	MHz
发射功率（峰值）	0.400	0.100	0.1 至 1	5	W（峰值）
调制	FMCW	FMCW	FMCW	脉冲	
啁啾带宽，不包括温度漂移	150	176.8	133	不适用	MHz
报告高度范围	-6 至 +1 676 (-20 至 +5 500)	-6 至 +1 737 (-20 至 +5 700)	-6 至 6 000 (-20 至 +19 685)	-6 至 2 424 (-20 至 +8 000)	米/（英尺）
工作高度	12	12	20	12	km
温度范围	-40 至 +70	-40 至 +70	-40 至 +71	-40 至 +71	摄氏度
频率稳定度	±50	±30	±5	不适用	ppm
在工作温度范围上的最大频率漂移	±0.22	±0.129	±0.22	不适用	MHz
典型的装备系统数量	2 或 3	2或3	1 或 2	1 或 2	每架飞机

表 2 (续)

	无线电高度仪 D1	无线电高度仪 D2	无线电高度仪 D3	无线电高度仪 D4	单位
双或三无线电高度仪安装的共享原理	根据安装的SDI设定的频率范围(偏置-2.5、0、或+2.5 MHz)。根据干扰接收调整的波形定时。用于减弱跨IF脉冲影响的信号处理。	系统安装数量(1、2、3)决定了-5 MHz、0 MHz或+5 MHz的频率偏置。每个系统数量选择一个线性跳频模型来避免飞机之间的相互干扰	不适用	不适用	
脉冲宽度	不适用	不适用	不适用	30 或 225	ns
波形重复频率	143 Hz 固定	1 000 Hz 固定	100 Hz 至 4 700 Hz	25 000 pps	Hz 或 pps (脉冲/秒)
3 dB 发射带宽	150	177	175	5 或 31	MHz
20 dB 发射带宽	153	180	185	26 或 105	MHz
40 dB 发射带宽	180	190	196	106 或 195	MHz
接收机					
灵敏度*	< -114	< -125	? -120	-95	dBm
噪声指数	8	9	8 至 12	10	dB
$P_{T,RF}$ 输入功率门限接收机过载	-30	-43	-53	-40	dBm

表 2 (完)

	无线电高度仪 D1	无线电高度仪 D2	无线电高度仪 D3	无线电高度仪 D4	单位
-3 dB中频 (IF) 带宽	0.312 MHz (LPF - 单边)	1.95 MHz	0.1 至 2.0	30	MHz
天线					
天线增益	11	10	8 至 11	13	dBi
电缆损耗 (单路径)	6 (最大10)	0	2 至 7	0 至 2	dB
-3 dB波束宽度	40 至 60	45 至 60	45 至 60	45	度

* 对以上所列出的一些无线电高度仪，根据IF带宽和噪声指数计算的接收机噪声功率电平高于接收机灵敏度电平。在这些情况下，通常低于IF带宽的无线电高度仪检测带宽决定了接收机的灵敏度电平。

附件 3

保护标准和在共享与兼容性中的应用

1 引言

以下描述的保护要求和标准将保护无线电高度仪不受可能引起高度准确度损失或引起虚假高度测量的有害干扰的影响。干扰可能产生自带外和带内干扰源。二种干扰源都能产生很多有害的影响，包括接收机灵敏度下降、过载、虚假高度报告和一般失效，取决于干扰的持续时间和特性。为此，描述和分析了很多干扰引入的失效模式，并确立了保护标准。

也许，当干扰信号被无线电高度仪解读为一个虚假地面信号并因此给出一个虚假高度读数的时候就会发生有害干扰造成对一个无线电高度仪最有害的影响。这种情况仅仅可以根据采用每个代表性无线电高度仪和每种潜在干扰源的各自情况来处理，因为影响是高度依赖于干扰信号的组合和无线电高度仪的特性。

一个干扰发射机可以通过在中频（IF）带宽内引入无用发射来引起有害干扰，它将被无线电高度仪测量为无效高度。干扰也可能导致本底噪声的增加，因而造成接收机灵敏度的损失，继而是确定正确高度能力的损失。

2 保护标准

无线电高度仪和其他系统之间的任何兼容性分析必须使用对一个无线电高度仪的最大可接受劣化保护标准。在无线电高度仪和来自其他发射机的干扰信号之间有三种主要的电磁干扰耦合机制：接收机过载、灵敏度下降和产生虚假高度。此外，带外和带内干扰可以影响一个无线电高度仪的性能。尽管一个带内干扰源比一个带外干扰源更可能产生一种或多种影响，但是没有明确的分界线来确定那种类型的影响将会发生。因此，当进行共享研究时，必须包含所有的因素。

2.1 接收机前端过载

当来自一个干扰信号的功率大到足以使一个无线电高度仪的前端饱和，进而引起非线性特性的固有效应的时候，接收机前端过载就会发生；例如，谐波失真或互调制。一个无线电高度仪的前端通常具有最适度的选择性（平缓的RF滤波器滚降）。因此，一个无线电高度仪同时易于受到其工作扫描带宽之内和来自此带宽之外干扰的影响。

对无线电高度仪前端的潜在干扰将会存在于一旦：

$$I_{RF} \geq P_{T,RF} \quad (3)$$

其中：

$$I_{RF} = \sum_i (I_{i,RF} * FDR_{i,RF}) \quad (4)$$

- I_{RF} : 在接收机输入处的峰值干扰信号总功率（考虑了电缆损耗和频率相关抑制（FDR）因子之后在天线输出处所有各个干扰贡献的总和）（mW）
- $P_{T, RF}$: 接收机前端过载发生的输入功率门限（mW）
- $I_{i, RF}$: 在接收机输入处考虑了电缆损耗后的第*i*个干扰源的功率（mW）
- $FDR_{i, RF}$: 由以下表3中所示滤波器特性给出的接收机前端FDR因子，表示应用于第*i*个干扰信号的衰减（见ITU-R SM.337建议书）。

表 3

无线电高度仪的RF灵敏度

干扰频率 (MHz)	RF滤波器衰减 (dB)
≤ 4 200	以每倍频程24 dB衰减 最高至40 dB
4 200	0
4 300	0
4 400	0
≥ 4 400	以每倍频程24 dB衰减 最高至40 dB

注意， $P_{T, RF}$ 通常是接收机1 dB压缩点，参照于接收机输入端口（如相对于低噪声放大器（LNA）的输出）。此量是一个取决于必须根据参数表对每种高度仪类型唯一确定的模型特性；在表1和2中给出了所选高度仪的数值。

2.2 接收机灵敏度下降

灵敏度下降效应与落入无线电高度仪IF带宽中的干扰信号强度相关。使一个无线电高度仪灵敏度降低问题复杂化的是通过混频与IF带宽相关的RF频谱不是时间上恒定的，因为无线电高度仪工作在采用一个线性调频信号的零差配置下。因此，根据特定无线电高度仪的特性，导致一个无线电高度仪接收机灵敏度下降的干扰影响是时间相关的。

来自带内干扰源对一个无线电高度仪的影响与该接收机IF带宽中干扰信号的功率相关。

当考虑*I*时，IF带宽内的干扰功率（在接收干扰信号与线性FM啁啾混合之后），当干扰信号引起RA接收机内的本底噪声增加1dB时，即认为无线电高度仪的性能劣化了。

在接收机有效热噪声功率由下式给出的情况下，这对应于一个-6 dB的*I/N*，这被认为应该进行无线电高度仪IF带宽之内的保护分析：

$$N = -114 \frac{\text{dBm}}{\text{MHz}} + 10 \log(B_{R,IF}) + N_F \quad (5)$$

其中：

- $B_{R, IF}$: 无线电高度仪的IF带宽 (MHz)
 N : 在接收机输入处的噪声指数 (dB)。

在根据IF带宽之内灵敏度降低确定兼容性时，无线电高度仪性能开始劣化时的干扰功率门限 $I_{T, IF}$ 被定义为：

$$I_{T, IF} \geq N - 6 \text{ dB} \quad (6)$$

干扰占比是 I (IF带宽内的干扰功率) 比 I_{RF} (总接收干扰功率)。它描述了将一个混频干扰信号与随后的IF低通滤波器允许通过的一个线性FM波形相混合的效应。

为了定义干扰占比，需要定义多个附加参数：

- f_1 : 无线电高度仪的最低扫频 (MHz)
 f_2 : 无线电高度仪的最高扫频 (MHz)⁶
 B_s : 啁啾带宽
 f_{ci} : 一个干扰源的中心频率 (MHz)。

对于固定频率干扰源，干扰占比定义为：

$$R_s = \frac{2B_{R, IF}}{B_s} \quad (7)$$

假如：

$$f_1 < f_{ci} < f_2$$

最小和最大扫频 f_1 和 f_2 分别能够位于4 200至4 400 MHz频段中任何位置，只要不违反扫频带宽和相邻频段保护标准。

接收机IF所捕获的干扰信号功率值正比于 R_s (干扰占比)。因此， $I_{T, RF}$ 和RF参照干扰门限 $I_{T, IF}$ 之间的关系则定义为：

$$I_{T, RF} = I_{T, IF} - 10 \log(R_s) \quad (8)$$

一旦计算的汇聚干扰超过接收机灵敏度下降开始产生处的门限 ($I_{T, RF}$)，则将产生有害干扰。

在干扰不是连续发射或干扰频率随时间改变的情况下，应该像对待一个连续发射源那样来对待发射干扰，因为由任何可变波形产生的干扰有可能引起任何单个高度测量丢失 (由于性能劣化)，或引起对任何单个测量发生一个虚假高度计算，它们反过来被包括在总的高度估算中。因为噪声电平增加或虚假高度造成不准确的高度测量产生“边界外”值，它们使一个原本应该准确的高度测量被严重地偏置。

⁶ 注意， $f_1 = 4.3\text{GHz} - 0.5 * B_s - \text{最大频率漂移}$ ， $f_2 = 4.3\text{GHz} + 0.5 * B_s + \text{最大频率漂移}$ ，其中啁啾带宽 (B_s)和最大频率漂移在表1和2中规定。

2.3 虚假高度报告

一个虚假高度报告是一个严重的无线电高度仪误差，它可能会引起关键飞机系统不当地响应，诸如近地告警、气象雷达、交通冲突规避系统（TCAS）、飞行控制或其他关键系统等。

在基于FMCW无线电高度仪的情况下，当对干扰信号在整个IF带宽的频谱频率分析期间被作为频率分量检测时，就将发生虚假高度报告。

提供给接收机混频器的FMCW高度仪本地振荡器（LO）信号是从 f_1 到 f_2 扫描，如在以上公式（7）中所定义。接收机混频器将从进入的干扰信号 f_{ci} 减去LO瞬时频率。当扫描LO频率和干扰源频率 f_{ci} 之差的绝对值落入0 Hz和IF带宽（ $B_{R, IF}$ ）之间时，将在频谱频率分析中产生潜在的虚假高度。

频谱分量的幅度和形成的干扰信号频谱的带宽将取决于接收干扰电平的强度和形成的差分信号保持在IF带宽中的时间部分。

因此，接收干扰功率必然受到干扰信号出现在最终信号处理带宽中时间量的调整，即检测器的带宽。在检测器级形成的干扰功率则由下式给出：

$$I_D = I_{RF} - 10 \log \left(\frac{2 * 100 \text{ Hz}}{B_S} \right) \quad (9)$$

其中，一个100 Hz检测带宽被认为是代表性的：

- I_D : 在检测器处的干扰功率
- B_S : 啁啾带宽。

如果由干扰信号所引起频谱分量的幅度上升到高度仪检测门限（ $I_{T, FA}$ ）以上，则它们可能会被高度仪错误地认为是有效高度，并且将没有手段将它们从高度计算中排除。

实际中，如果超过了保护门限 $I_{T, FA}$ ， I_D （在检测器处的干扰功率）将在FMCW接收机信号处理链中引起虚假目标频谱分量。

$$I_{T, FA} = -143 \text{ dBm}, \text{ 考虑跟随瞬时高度仪LO频率的100 Hz检测器。}$$

形式上：

- 如果 $I_D < I_{T, FA}$ 则不存在频谱分量和虚假目标。
- 如果 $I_D > I_{T, FA}$ 则将存在引起虚假高度的频谱分量。

潜在的干扰信号频谱分量位于整个IF带宽 $B_{R, IF}$ 之内，并且因此当下式发生时有可能在检测器中被处理：

$$|f_{ci} - f_{LOi}| < B_{R, IF} \quad (10)$$

其中：

- f_{ci} : 潜在干扰源的中心频率（MHz）
- f_{LOi} : 在以上§ 2.2中定义的 f_1 和 f_2 之间的任何瞬时频率。

此外，任何情况下干扰信号的功率频谱密度（ I_{PSD} ）都不会大于FMCW接收机的P1dB功率谱密度限值（ P_{1dBSD} ）：

$$I_{PSD} < P_{1dBSD} \quad (11)$$

其中：

$$I_{PSD} = P_{RI} - 10 \log (B_i)$$

此处：

P_{RI} : 在 f_{ci} 处的接收干扰功率 (dBm)

B_i : 干扰信号的-40 dB带宽 (Hz)

$$P_{1dBSD} = P_{T, RF} - 10 \log (B_{R, IF}) \quad (12)$$

此处：

$P_{T, RF}$: 输入门限接收机过载 (见表1和2)。

3 兼容性研究考虑和保护标准汇总

在飞行的所有阶段无线电高度仪都在运行，包括地面调动。因此，当考虑共享情形时，重要的是所有可能的干扰源被适当地汇聚。在共享研究中应该考虑从地面高度直到12 km的各种情形。对无线电高度仪的总干扰将取决于干扰源的数量和频谱特性、它们的空间分布和它们的相对天线增益。由于飞机飞行所在的地面以上高度，位于地面的汇聚干扰的影响将是大量的并且可能产生对无线电高度仪的有害干扰。

如果传播路径是在一个与飞机底部正交矢量的 $\pm 30^\circ$ 之内，应该使用如在表1和2中所提供的无线电高度仪天线的峰值增益。共享研究还应该考虑飞机顶垂线在横滚中能够达到 $\pm 45^\circ$ ，而在俯仰中能够达到 $\pm 20^\circ$ 。在此范围之外，无线电高度仪天线的增益应该基于天线的特性 (见表1和2)。在确定与地面系统的传播路径损耗时，因为在地面和飞越上空的飞机之间的无障碍路径，必须使用直接的视距传播。如果计算的最差汇聚干扰超过了以下对灵敏度降低、前端过载、虚假高度或功率谱密度规定的任何保护标准，则有害干扰将出现在无线电高度仪中。

由于无线电高度仪提供一个生命安全服务，当飞机处于运行中时，需要避免有害干扰。为了避免有害干扰，在飞行关键工作情形下必须要满足以下的保护标准：

灵敏度下降： $I/N = -6 \text{ dB}$

前端过载： $I_{RF} \leq P_{T, RF}$ ，如表1和2中规定

虚假高度 (仅仅对FMCW高度仪)：

$$I_D < I_{T, FA}, \text{ 其中, } I_{T, FA} = -143 \text{ dBm/100 Hz, 跟随瞬时高度仪本地振荡器}$$

由于无线电高度仪执行关键生命安全功能，有必要将一个附加安全极限添加到保护标准中，以作为保持此应用的高可靠性要求的手段。任何将要应用于工作在4 200-4 400 MHz频段中的无线电高度仪的安全极限水平要根据进一步的研究来确立。