الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R
قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصيـــة ITU-R M.2059-0
(2014/02)

الخصائص التشغيلية والتقنية لأجهزة تحديد الارتفاع الراديوية التي تستعمل نطاق الترددات 4 200–4 400 MHz ومعايير حمايتها

السلسلة M
الخدمة المتنقلة وخدمة الاستدلال الراديوي
وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة

الاتحاد الدولي للاتصالات ITU

150 ITU 1865-2015

تمهيـــد

يضطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد لمدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها.

ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهرتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في الملحق 1 بالقرار ITU-R 1. وترد الاستمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني http://www.itu.int/publ/R-REC/en)

السلسلة	العنـــوان
BO	البث الساتلي
BR	التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية
BS	الخدمة الإذاعية (الصوتية)
BT	الخدمة الإذاعية (التلفزيونية)
F	الخدمة الثابتة
M	**الخدمة المتنقلة وخدمة الاستدلال الراديوي وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة**
P	انتشار الموجات الراديوية
RA	علم الفلك الراديوي
RS	أنظمة الاستشعار عن بُعد
S	الخدمة الثابتة الساتلية
SA	التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية
SF	تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة
SM	إدارة الطيف
SNG	التجميع الساتلي للأخبار
TF	إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت
V	المفردات والمواضيع ذات الصلة

__ملاحظة:__ تمت الموافقة على النسخة الإنكليزية لهذه التوصية الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية بموجب الإجراء الموضح في القرار ITU-R 1.

النشر الإلكتروني
جنيف، 2015

© ITU 2015
جميع حقوق النشر محفوظة. لا يمكن استنساخ أي جزء من هذه المنشورة بأي شكل كان ولا بأي وسيلة إلا بإذن خطي من الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU).

التوصيـــة ITU-R M.2059-0

الخصائص التشغيلية والتقنية لأجهزة تحديد الارتفاع الراديوية التي تستعمل نطاق الترددات 200 4–400 4 MHz ومعايير حمايتها

(2014)

مجال التطبيق

تصف هذه التوصية الخصائص التشغيلية والتقنية لأجهزة تحديد الارتفاع الراديوية التي تستعمل في خدمة الملاحة الراديوية للطيران ومعايير حمايتها.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية عنصر أساسي في أنظمة سلامة الأرواح في مجال الطيران، بما في ذلك أنظمة الانخفاض والهبوط الدقيقين وأنظمة الاقتراب من الأرض وتفادي الاصطدام؛

ب) أن أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية تعمل في خدمة الملاحة الراديوية للطيران؛

ج) أن أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية قد تم تكييفها لعدة عقود بحيث تلائم جميع أنواع الطائرات؛

د) أن أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية تعمل أثناء الرحلة الجوية بأكملها ويجب أن تعمل بدون التعرض لتداخلات ضارة؛

هـ) أن أي نظام راديوي لتحديد الارتفاع موجود على متن طائرة واحدة يتألف من عدد يصل إلى ثلاثة أجهزة راديوية متماثلة لتحديد الارتفاع؛

و) أن هناك حاجة إلى توثيق خصائص استعمال الطيف ونشر أنظمة تحديد الارتفاع الراديوية على صعيد عالمي؛

ز) أن التعايش بين أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية الموجودة على متن الطائرة نفسها يتحقق من خلال أساليب تخفيف تقنية وتشغيلية،

وإذ تدرك

أ) أن خدمة الملاحة الراديوية للطيران خدمة تتعلق بالسلامة؛

ب) أن أنظمة تحديد الارتفاع الراديوية تعمل في النطاق 200 4-400 4 MHz على الصعيد العالمي؛

ج) أن الخصائص التقنية والتشغيلية التمثيلية لأنظمة تحديد الارتفاع الراديوية ومعايير حمايتها مطلوبة لإدارة الطيف وتخطيط النشر؛

د) أن حصول أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية على شهادات صلاحية الطيران عملية طويلة ومكلفة؛

هـ) أن أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية تحتاج إلى عرض نطاق يبلغ 196 MHz،

وإذ تلاحظ

أ) أنه طبقاً للرقم **10.4** من لوائح الراديو، فإن جوانب السلامة التي تتعلق بخدمة الملاحة الراديوية وخدمات السلامة الأخرى تتطلب ترتيبات خاصة لضمان عدم تعرّضها لتداخلات ضارة؛

ب) أن المتطلبات التنظيمية لأجهزة تحديد الارتفاع الراديوية تحددها منظمة الطيران المدني الدولي (ICAO)؛

ج) أن التوصية ITU-R M.1461 تُستعمل كمبادئ توجيهية لتحليل التوافق بين الرادارات العاملة في خدمة الاستدلال الراديوي (بما في ذلك أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية) والأنظمة العاملة في الخدمات الأخرى،

توصي

1 بأن ينظر إلى الخصائص التشغيلية والتقنية لأجهزة تحديد الارتفاع الراديوية الوارد وصفها في الملحقين 1 و2 على أنها خصائص تمثيلية لهذه الأنظمة العاملة في نطاق التردد 200 4-400 4 MHz وأن تستعمل عند إجراء دراسات التوافق؛

2 أن تستعمل معايير الحماية الواردة في الملحق 3 لحماية تشغيل أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية.

الملحـــق 1

الخصائص التشغيلية

1 مقدمة

يحجز استعمال خدمة الملاحة الراديوية للطيران الراديوية (ARNS) للنطاق 200 4-400 4 MHz الموزع لها حصراً لأجهزة قياس الارتفاع الراديوية المركبة على متن الطائرات، وللأجهزة المرسلة المستجيبة المرتبطة بها المقامة على الأرض بموجب الحاشية رقم **438.5** من لوائح الراديو.

تتمثل الوظيفة الأساسية لأي جهاز راديوي لتحديد الارتفاع في توفير قياسات دقيقة للارتفاع فوق سطح الأرض بمستوى عال من الدقة والسلامة خلال مراحل الاقتراب والهبوط والوصول إلى الارتفاع المطلوب للطائرة والتي تمثل طائفة متنوعة من الانعكاسية. وتُستعمل هذه المعلومات في كثير من الأغراض ويجب تحقيق الدرجة العالية من الدقة والسلامة في هذه القياسات بصرف النظر عن المسافة من سطح الأرض، خلال الاقتراب النهائي مثلاً والتوجيه بالإضاءة في المراحل الأخيرة من الاقتراب الأوتوماتي من الأرض. وتستعمل أيضاً لتحديد الارتفاع المطلوب لكي تهبط الطائرة بأمان وكمدخلات لنظام الإنذار بالاقتراب من الأرض (TAWS) الذي يعطي إنذاراً "بالتوقف عن الاستمرار في خفض الارتفاع" عند ارتفاع ومعدل اقتراب محدّدين سلفاً؛ وكمدخلات لمعدات تجنّب الاصطدام ورادارات الطقس (نظام التنبؤ بقص الرياح) وجهاز التحكم الآلي في تدفق الوقود إلى محرك الطائرة (الملاحة)، ووسائل التحكم في الرحلة الجوية (القيادة الآلية للطائرة).

وأجهزة تحديد الارتفاع الراديوية مصممة بحيث تعمل خلال كامل عمر الطائرة المركبة فيها. ويمكن أن تتجاوز فترة التركيب 30 عاماً، مما يؤدي إلى طائفة واسعة من أعمار المعدات والأداء والتفاوت.

2 أجهزة قياس الارتفاع الراديوية

هناك نوعان من أجهزة قياس الارتفاع الراديوية قيد الاستعمال حالياً. يستخدم أحد النوعين الموجات المستمرة بتشكيل التردد (FMCW)، فيما يستخدم الآخر التشكيل النبضي. وتقدم الأقسام التالية معلومات بشأن هذين النوعين من أجهزة قياس الارتفاع الراديوية.

1.2 أجهزة قياس الارتفاع التي تستخدم موجات حاملة بتشكيل التردد

1.1.2 الوصف التشغيلي

الغرض من أجهزة قياس الارتفاع الراديوية تزويد الطائرات بقياس دقيق ومستقل ومُطلق للمسافة الدنيا من سطح الأرض أسفل الطائرة. ولأجهزة قياس الارتفاع الراديوية عادةً مدى قياس يتراوح بين –6 أمتار و000 6 متر (–20 قدماً إلى 685 19 قدماً).

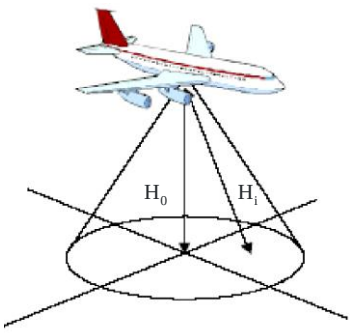
بيد أن هناك استثناءات حيث يوجد بعض من هذه الأجهزة بمدى قياس يزيد عن 15 000 متر (213 49 قدماً). إن أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية عنصراً أساسياً في أنظمة سلامة الأرواح في مجال الطيران، بما في ذلك أنظمة الانخفاض والهبوط الدقيقين وأنظمة الاقتراب من الأرض وتفادي الاصطدام. وأجهزة تحديد الارتفاع الراديوية ضرورية من أجل الهبوط عند استعمال القيادة الآلية وفي ظل ظروف الرؤية الصعبة. وعلاوةً على ذلك، تُستخدم أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية عند الهبوط يدوياً للمساعدة في تنبيه قائد الطائرة بتوقيت البدء في مناورة تُعرف باسم "flare" أو البدء فيها آلياً، وهي مناورة تتم قبل ملامسة الأرض مباشرة لخفض القدرة عند الهبوط على الأرض. ويعمل جهاز قياس الارتفاع الراديوي أيضاً كجزء من نظام إنذار الطائرة لتجنّب الاصطدام بالأرض حيث يوفر قدرة استشرافية تنبّؤية بشأن مهبط الطائرة، وربما إصدار إنذار عند الضرورة، عندما تهبط الطائرة أدنى من ارتفاع معين أو قريباً جداً من الأرض.

ونظراً إلى أهمية أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية للتشغيل الآمن للطائرات، تُدرج هذه الأجهزة ضمن قائمة المتطلبات الدنيا الواجب وجودها على الطائرات المعتمدة لخدمات الركاب. وعلاوةً على ذلك، يجب أن تعتمد هذه الأجهزة على درجة أهمية السلامة أو مستوى ضمان التصميم (DAL) من الفئة "A"، "حيث يتسبب عطل البرمجيات/العتاد و/أو يساهم في عطل كارثي في أنظمة التحكم في طيران الطائرة" بالنسبة لجميع طائرات النقل ومستوى DAL من الفئة "B"، "حيث يتسبّب عطل البرمجيات/العتاد و/أو يساهم في عطل خطير/كبير في أنظمة التحكم في طيران الطائرة" بالنسبة للطائرات التجارية والإقليمية. ومستوى ضمان التصميم عبارةٌ عن درجة مدى أهمية السلامة من A إلى E، حيث يعتبر المستوى A/B الأكثر أهمية ويحتاج بالتالي إلى أكبر عمليات الاعتماد صرامةً.

وتتألف أنظمة تحديد الارتفاع الراديوية الموجودة على متن كل طائرة من عدد يصل إلى ثلاثة وحدات إرسال واستقبال (Tx/Rx) متماثلة لقياس الارتفاع رادیویاً والمعدات المصاحبة لها. وتعمل جميع الوحدات Tx/Rx بالتزامن وبشكل مستقل كلّ عن الأخرى. ويُحسب الارتفاع الراديوي من الفاصل الزمني الذي تنعكس فيه الإشارة الصادرة من الطائرة من الأرض. وأجهزة تحديد الارتفاع الراديوية المصممة للاستخدام في أنظمة الهبوط الآلي يجب أن تحقق دقة مقدارها 0,9 متر (3 أقدام). هناك العديد من الطرائق التي تستخدم كل منها على حدة أو في توليفة معينة تستعمل من أجل تفادي التداخلات بين أجهزة قياس الارتفاع. الأولى، زحزحة التردد المركزي لكل جهاز. والثانية، زحزحة الإرسالات بالنسبة للزمن. والثالثة، زحزحة الإرسالات بالنسبة لعرض النطاق الترددي و/أو مدة التشكيل. ومن شأن استعمال أحد هذه الخيارات أو توليفة منها أن يُسفر عن زيادة عرض النطاق المشغول على طائرة واحدة عن عرض النطاق اللازم لأي جهاز راديوي وحيد لقياس الارتفاع.

ويعرض الشكل 1 موقع واتجاه إرسالات إشارة جهاز قياس الارتفاع الراديوي.

الشـــكل 1



M.2059-01

2.1.2 مبادئ التشغيل

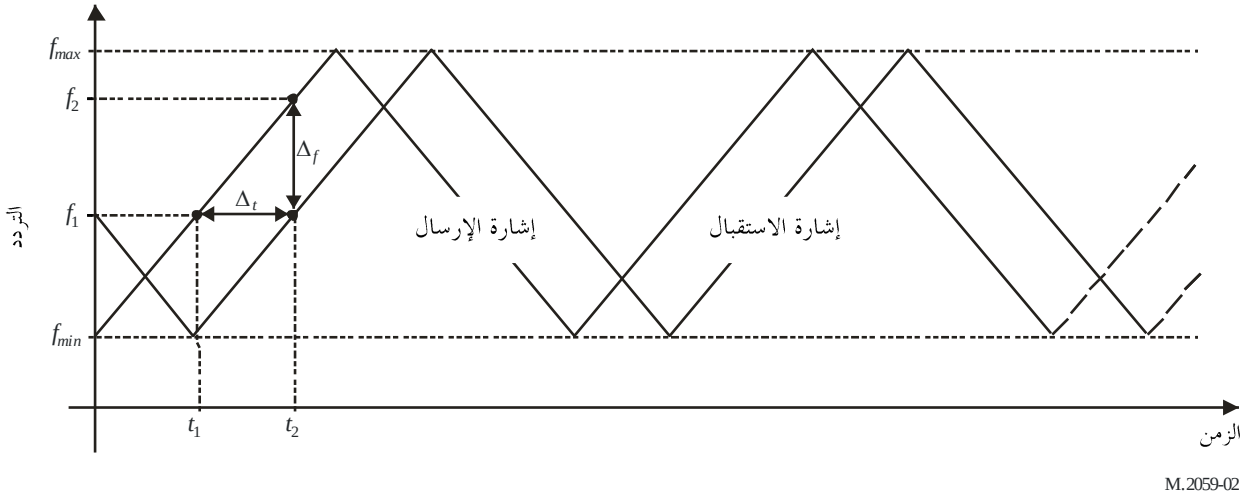
تعمل أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية ذات الموجات المستمرة بتشكيل التردد (FMCW) من خلال عمل الوحدة Tx/Rx بهوائيات إرسال/استقبال مستقلة. وعندما تصطدم الإشارة بالأرض ترتدّ ثانية إلى هوائي الاستقبال. ويقوم النظام حينئذ بحساب الزمن لتحديد المسافة بين الطائرة والأرض، حيث يتناسب ارتفاع الطائرة مع الزمن المطلوب لكي تقطع الإشارة المرسلة رحلة

الذهاب والعودة. والإشارة المشكلة بالتردد (FM) الصادرة عن الوحدة Tx/Rx غير قابلة للتعديل من قبل مهبط الطائرة. وتقوم الحسابات على افتراض أن أي إشارة ترسل في النطاق 200 4-400 4 MHz سترتد على نفس التردد. ومع ذلك، فإنه أثناء الوقت الذي تستغرقه الإشارة لكي تقطع رحلة الذهاب إلى الأرض والعودة، يكون تردد المرسل قد تغيّر. والفارق بين ترددي الإرسال والاستقبال (Δf) يتناسب طردياً مع ارتفاع الطائرة فوق سطح الأرض ويعتمد على الميل الفعلي للتشكيل FMCW (الاتساع إزاء المدة) كما هو موضح في الشكل 2.

وكما هو موضح في الشكل 2، يُحسب الارتفاع بتحديد الفارق بين التردد f_1 للإشارة المرتدة والتردد f_2 للإشارة المرسلة في اللحظة t_2 التي تستقبل فيها الإشارة المرتدة. ويتناسب هذا الفارق في التردد Δf طردياً مع الزمن Δt اللازم لكي تقطع الإشارة المرتدة المسافة من الطائرة إلى الأرض والعودة ثانية إلى الطائرة.

الشـــكل 2

إشارات مُرسلة ومُستقبلة من جهاز قياس ارتفاع راديوي نمطي يعمل بالموجة الحاملة المشكّلة بالتردد



والمدة التي يمكن أن يكون فيها شكل الموجة FMCW المثلث متغيراً تعتمد على الارتفاع. وفي كل لحظة، يتم الحصول على إشارة نبضية عن طريق مزج الموجة المرسلة (بالتردد f_2) وبالموجة المستقبلة (بالتردد f_1). وفارق التردد Δf لهذه الإشارة يساوي:

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

وبمعرفة أي من Δt أو Δf، يمكن حساب الارتفاع فوق سطح الأرض باستعمال المعادلة التالية:

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

حيث:

H_0: الارتفاع فوق سطح الأرض (m)

c: سرعة الضوء (m/s)

Δt: فارق الزمن المقاس (s)

Δf: الفارق المقاس في التردد (Hz)

df/dt: تخالف تردد المرسلات لكل وحدة زمنية (Hz/s)

2.2 أجهزة تحديد الارتفاع النبضية

1.2.2 الوصف التشغيلي

على غرار أجهزة تحديد الارتفاع التي تعمل بالموجات المستمرة المشكّلة بالتردد (FMCW)، تزوّد أجهزة تحديد الارتفاع النبضية الطائرة بقياس دقيق ومستقل ومطلق للمسافة الدنيا من سطح الأرض أسفل الطائرة. ولأجهزة قياس الارتفاع الراديوية النبضية النمطية مدى للارتفاع المُقاس يتراوح بين 6– m و500 2 m (–20 قدماً و200 8 قدم) وارتفاع تشغيلي يبلغ 12 km (360 39 قدماً).

وأي تحليل للآثار المتراكمة للتداخلات المحتملة يجب أن يُحسب على الارتفاع التشغيلي، حيث تستمر أجهزة قياس الارتفاع في البحث عن الأرض وتكون معرضة للتداخلات التي يمكن أن تُسفر عن تتبّع كاذب للارتفاع. وتشمل وظائف أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية النبضية كذلك أنظمة اقتراب وهبوط واقتراب من الأرض وإنذار لتجنّب الاصطدام بالأرض تتّسم بالدقة تعتبر ضرورية في الهبوط عند استخدام القيادة الآلية وفي ظل ظروف الرؤية الصعبة، حيث تعمل كجزء من نظام الإنذار لتجنّب الاصطدام بالأرض الخاص بالطائرة الذي يوفر قدرة استشراقية تنبّؤية بشأن مهبط الطائرة، وإنذار، عند الضرورة، عندما تهبط الطائرة أدنى من ارتفاع معين أو تقترب كثيراً من الأرض.

2.2.2 مبادئ تشغيل أجهزة قياس الارتفاع النبضية

تستعمل أجهزة قياس الارتفاع الراديوية من النوع النبضي نبضة من طاقة تردد راديوي ترسل نحو الأرض لقياس الارتفاع المطلق فوق سطح الأرض أسفل الطائرة مباشرةً. ويُقاس فارق الزمن بين النبضة المرسلة والنبضة المستقبلة. وحيث إن سرعة انتشار الطاقة الكهرمغنطيسية معروفة وثابتة، فإن الزمن يتناسب مع ارتفاع الطائرة.

وتتمثل وظيفة رادار تحديد الارتفاع النبضي في توفير خلوص الأرض أو الارتفاع بين الأرض وقاع الطائرة. ويمكن لجهاز تحديد الارتفاع النبضي أن يوفر أيضاً معدل الصعود أو الهبوط الرأسي والإنذار عند الوصول إلى ارتفاع منخفض يتم اختياره مسبقاً. وتصمم خصائص الأداء بحيث تتواءم مع تطبيقات بعينها قد يلزم فيها تتبُّع الارتفاع بمعدلات رأسية مرتفعة. ورادارات قياس الارتفاع النبضية مصمّمة أيضاً بحيث تدعم الهبوط الآلي وكذلك وظيفة التحليق الآلي في الطائرات الهليكوبتر.

3.2 التطبيق

أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية مصممة للاستعمال في أنظمة الهبوط الآلي اللازمة لتحقيق دقة مقدارها 0,9 m (3 أقدام) أو أعلى. وترسل قراءات الارتفاع هذه إلى شاشة العرض المرئي لقائد الطائرة وإلى العديد من مكوّنات السلامة الآلية. وتوفر أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية مكوّناً معلوماتياً أساسياً من نظام التحكم الآلي في الطيران[1] من أجل نظام الاقتراب والهبوط والإنذار بالاقتراب من الأرض[2] ونظام الإدراك للأرض والإنذار بشأنها[3] وحاسوب توجيه إدارة الرحلة الجوية وأنظمة التحكم في الطيران والمراقبة المركزية الإلكترونية للطائرات[4] وعدّادات المحركات ونظام إنذار الطاقم[5]. وبالإضافة إلى ذلك، ترسل معلومات الارتفاع المستقاة من أجهزة قياس الارتفاع الراديوية إلى نظام تجنّب الاصطدام في الحركة الجوية، والنظام الأوتوماتي

---

1 نظام يتضمن جميع المعدات اللازمة للتحكم آلياً في طيران الطائرة إلى مسار أو ارتفاع موضحين بمراجع داخل الطائرة أو خارجها.

2 ينذر هذا النظام طاقم الرحلة عند تجاوز عتبات معينة، مثل معدل هبوط مفرط بارتفاع راديوي بين 50 و450 2 قدماً.

3 هذا النظام صورة معززة من نظام الإنذار بالاقتراب من الأرض.

4 نظام يراقب وظائف الطائرة وينقلها إلى قائد الطائرة. ويعرض النظام الإجراءات التصحيحية التي يتوجب على قائد الطائرة اتخاذها وكذلك قيود النظام بعد العطل.

5 نظام يستعمل في الطائرات الحديثة لتزويد طاقم الطائرة بتطورات حالة المحركات والأنظمة الأخرى. ويعرض النظام الإجراءات التصحيحية التي يتوجّب على قائد الطائرة اتخاذها في شكل "قائمة مرجعية".

المستقل للمراقبة – الإذاعة التي تستعمل من أجل مراقبة الفضاء الجوي حول الطائرة ولإنذار قائدي الطائرات بأيّ تهديد من تصادم في الجو.

وتعتبر المعلومات المستقاة من أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية مهمة بشكل خاص في ظروف الرؤية الصعبة، بيد أنها حتمية في كل الأحوال. وعموماً، إذا أظهر فحص النظام قبل الإقلاع أن أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية لا تعمل، يجب تعليق الرحلة. وإذا ما فقدت الإشارة الصادرة عن أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية أثناء الرحلة، يحدث خلل كبير في نظام تجنّب الاصطدام وأنظمة السلامة الأخرى المذكورة أعلاه. فإذا كانت أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية لا تعمل بشكل جيد عند اقتراب الطائرة أو الهبوط، لن يتمكن نظام القيادة الآلية من العمل بالشكل السليم. وفي ظل أفضل الأحوال، سيقوم الطاقم بإجراء الاقتراب يدوياً أو القيادة إلى مطار آخر. بيد أن هذا الأمر يزيد من عبء العمل على الطاقم ويحط من قدرة عملية الاقتراب يمكن أن يُسفر عن اقتراب خاطئ "متكرر". ويمكن لمحاولات الهبوط المتكررة هذه أن تؤثر بشدة في برامج الهبوط المزدحمة بالفعل، وتزيد من عبء العمل المتعلق بالتحكم في الحركة الجوية ويثير شواغل بخصوص السلامة. وإلى جانب ذلك، فإنه بالنسبة لبعض فئات المطارات وفي ظل ظروف جوية معينة، يؤدي فقدان نظام تحديد الارتفاع الراديوي إلى منع منح الرخيص بالهبوط للطائرة. وفي هذه الحالة تُجبر الطائرة إما على الطيران في نموذج تأخير حتى تتحسن الأحوال الجوية أو تحويلها إلى مطار آخر. ونظراً إلى أهمية وظائف أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية، فإن الطيف الموزّع والمستعمل في هذه الأجهزة تجب حمايته من التداخلات الضارة وأن يكفي لتلبية متطلبات الدقة.

1.3.2 السيناريوهات التشغيلية

اقتراب الطائرة وهبوطها

بتحليل نموذج نمطي للهبوط من 18,5 km (10 nm) إلى عتبة مدرج هبوط طائرة، فإن مكوّنات أنظمة إلكترونيات الطيران الشائع استعمالها هي أنظمة الهبوط بالأجهزة/بالموجات الصغرية ومعدات قياس المسافة وأجهزة قياس الارتفاع الراديوية لأنظمة الملاحة الساتلية وأنظمة القصور المرجعية وحواسيب البيانات الجوية التي توفر بيانات الضغط الجوي وسرعة الهواء. وتراقب حواسيب إدارة الرحلة والتحكم في الرحلة باستمرار مدخلات بيانات المحاسيس وتقوم بالربط بينها للتأكد من أنها ضمن حدود معينة للمعلمات، خاصة أن قراءات أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية بين المحاسيس يتم الربط بينها للتأكد من وقوعها ضمن هامش التسامح المحدد. وفي حالة تشغيل جهاز الكبح الآلي، فإنه يتسنى الحفاظ على اقتراب مستقر بمعدلات هبوط متحكم بها. وعلى ارتفاع محدد سلفاً، فإن بيانات محاسيس المعلومات الرأسية لمسار الانحدار تُستخرج من المعادلة بواسطة حاسوب إدارة الرحلة ويوفر جهاز تحديد الارتفاع الراديوي الارتفاع الرأسي فوق سطح مدرج الهبوط بالإعلان عنه شفهياً بالقدم للبدء في مناورة إضاءة للطائرة من أجل ملامسة الأرض. ويتم التحكم في مرحلة الإضاءة بنظام القيادة الآلية باستعمال المعلومات المستقاة من جهاز تحديد الارتفاع الراديوي. ويمكن تنفيذ نموذج الرحلة إما في ظل ظروف رؤية عادية أو صعبة.

وإذا فقدت الطائرة بيانات جهاز تحديد الارتفاع الراديوي أو استقبلت بيانات خطأ، يمكن وقوع العديد من التّبعات طبقاً لنوع الطائرة ومتطلبات الهبوط في المطار أو تصنيفها والطقس. ويؤدي فقدان بيانات أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية إلى تعطيل القيادة الآلية وبالتالي يقوم قائد الطائرة ومساعدوه بتشغيل الطائرة والهبوط بها. وتحظر بعض فئات المطارات أو بعض الظروف الجوية هبوط بعض أنواع الطائرات بدون بيانات لأجهزة تحديد الارتفاع. فإذا كان هناك جهاز راديوي وحيد لتحديد الارتفاع قيد التشغيل، فإن الارتفاع فوق سطح الأرض عند اتخاذ قرار بهبوط الطائرة يجب ضبطه على ارتفاع أعلى. وإذا كانت الرؤية صعبة، يمكن إجبار الطائرة على الانتظار حتى تتحسّن الأحوال الجوية أو الهبوط في مطار آخر. وإذا عانت إشارة جهاز تحديد الارتفاع الراديوي من تداخلات ضارة أثناء المراحل الأخيرة من الهبوط، يمكن التعرّض لوضع خطير أو كارثي. وفي أحسن الظروف، سيزداد عبء العمل على طاقم الرحلة بشكل كبير؛ بينما في أسوأها، تتعرض الطائرة وطاقمها وركابها لوضع كارثي.

أنظمة تجنب الاصطدام بالأرض والإنذار بالاقتراب من سطح الأرض

يوفر نظام الإنذار بالاقتراب من سطح الأرض (GPWS) الموجود على متن الطائرة إنذاراً سمعياً آلياً شديد التميّز لطاقم الطائرة عند اقترابها بشدة من سطح الأرض أسفل الطائرة. وهناك نوع آخر من أنظمة الإنذار بالاقتراب من سطح الأرض يسمى نظام الإنذار بتجنب الاصطدام بالأرض (TAWS) والذي يوفر هو الآخر إنذارات سمعية مميزة استناداً إلى مستوى التهديد بالنسبة للاقتراب من سطح الأرض أمام الطائرة.

وتصميم الأنظمة GPWS وTAWS والغرض منها هو تفادي الطيران المتحكم به نحو الأرض (CFIT). وتدمج أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية ضمن المعدات الحاسوبية الخاصة بإدارة رحلة الطائرة وتوفر بيانات حرجة مثل الارتفاع الفعلي للطائرة فوق الأرض لكل من نظامي GPWS وTAWS. وأجهزة تحديد الارتفاع الراديوية والأنظمة GPWS وTAWS تمكن، من خلال العمل معاً، من الطيران بالقرب من الأرض، لاسيما في ظروف الرؤية الصعبة والاقتراب والهبوط الدقيقين أو في المناطق الجبلية.

وطبقاً للقواعد ICAO Annex 6 – الجزء 1، الفصل 6، يوفر النظام GPWS إنذارات حاسمة بالنسبة للزمن عندما تكون ظروف الطيران خطرة. وتعتبر وظائف النظامين TAWS وGPWS معاً ضرورية من أجل تزويد طاقم الطائرة بمعلومات حالة فورية بخصوص ارتفاع الطائرة فوق سطح الأرض.

وتستند إنذارات النظام GPWS إلى الارتفاع الراديوي وتشتق من البيانات المُدخلة إلى النظام وتُتاح على ارتفاعات من 10 إلى 538 1 m (30 قدماً إلى 000 5 قدم). وفيما يلي أساليب الإعلان السمعي:

الأسلوب 1 معدل هبوط مفرط وخطير

الأسلوب 2 معدل اقتراب مفرط من الأرض

الأسلوب 3 معدل صعود سالب أو فقدان الارتفاع بعد الإقلاع أو التحليق الدائري

الأسلوب 4 خلوص غير آمن من الأرض في غير حالات الهبوط

الأسلوب 5 انحراف مفرط أسفل ميل الانحدار لنظام الهبوط بالأجهزة (ILS)

الأسلوب 6 بيانات زاوية الميل الجانبي

وتعتمد هذه الأساليب كافة على معلومات الارتفاع فوق سطح الأرض التي توفرها أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية من أجل توفير الإنذارات المناسبة للطاقم (التنبيه والتحذير) لتجنّب الاصطدام ولتفادي هبوط الطائرة بتشكيلة غير سليمة (أن تكون زعانف الرفع أو الخفض بالجناح في وضع غير سليم) ولتزويد الطاقم بمعلومات بشأن ارتفاع الطائرة النسبي بالنسبة إلى الأرض خلال مسار اقترابها. وتتراوح الدقة المتوقعة لقيم الارتفاع بين 0,3 و0,9 m (قدم واحد وثلاثة أقدام).

وتستند معظم هذه الأساليب إلى أغلفة حماية تحدد على نحو خاص بالارتفاع الفعلي الذي توفره أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية.

وبالمقارنة، يوفر النظام TAWS إنذارات استباقية تنبّؤية في الوقت المناسب بظروف الطيران الخطيرة المحتملة المتعلقة بالاقتراب من الأرض واحتمال الاصطدام بها. وعلى غرار النظام GPWS، توفر أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية بيانات رأسية بخصوص ارتفاع الطائرة فوق سطح الأرض.

ويصرح بحمل النظام TAWS على متن جميع الطائرات ذات المحركات التوربينية التي يزيد وزنها الأقصى المعتمد عند الإقلاع على 700 5 kg، أو المرخص لها حمل أكثر من تسعة ركاب، وكذلك على متن الطائرات الهليكوبتر.

ويؤدي الإخفاق في توفير الارتفاع السليم في أغلب الأحوال إلى وضع خطير أو كارثي يتمثل في الفشل في إنذار الطاقم في الوقت المناسب بما يتيح له اتخاذ الإجراء المناسب لمنع الاصطدام بالأرض.

3 متطلّبات منظمة الطيران المدني الدولي (ICAO)

تحدد القواعد ICAO Annex 6، الجزء 1، الفصل 6 حتمية حمل النظامين GPWS وTAWS ذوي الوظائف الاستشرافية بخصوص معلومات الأرض بالنسبة لبعض فئات أوزان الطائرات. وبالإضافة إلى هذه المتطلبات، تحتم لوائح الطيران ومتطلبات الصلاحية للطيران في كثير من الإدارات حمل هذه المعدات نظراً إلى ارتباطها ارتباطاً مباشراً بمتطلبات الصلاحية للطيران والاعتماد بالنسبة لأي طائرة.

وينص الفصل 6، الجزء 1 من القواعد ICAO Annex 6 على:

"جميع الطائرات ذات المحركات التوربينية ذات الوزن الأقصى المعتمد للإقلاع الذي يزيد عن 15 000 kg أو المرخص لها حمل أكثر من 30 راكباً، يجب أن تُجهَّز بنظام إنذار بالاقتراب من الأرض له وظيفة استشرافية لتجنب الاصطدام بالأرض. (توجد أحكام مماثلة بفقرات أخرى من أجل مختلف فئات أوزان الطائرات.)"

الملحـــق 2

الخصائص التقنية

1 الوصف التقني

1.1 تشكيل أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية وحساسية المستقبِل

تستخدم أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية قيد الاستعمال حالياً نوعين من طرائق تشكيل أشكال الموجات الراديوية يُعرفان بالتشكيل الخطي للتردد – موجات مستمرة أو LFMCW أو FMCW والتشكيل النبضي. وشكل الموجة بالتشكيل FM/LFMCW يستعمل بوصفه الأسلوب الأقل تعقيداً لتوفير قياسات للارتفاع استثنائية من حيث الدقة على الارتفاعات الحرجة قبل ملامسة الأرض. وهذه الدقة ضرورية لتوفير بيانات سلسلة مستمرة لوسائل التحكم في الطائرة وللقيادة الآلية من أجل عمليات الهبوط الآلي في ظروف الرؤية الصعبة. وتعتبر هذه البيانات حاسمة على نحو خاص عندما تكون رؤية قائد الطائرة للمدرج مقيّدة.

ولأجهزة تحديد الارتفاعات الرادارية أجهزة استقبال حساسة بعتبة كشف دنيا كما هو مبيَّن في الجدولين 1 و2. ويتألف جهاز قياس الارتفاع الراديوي FMCW الأساسي من نظام "متجانس" يقوم باعتيان جزء من الموجة المرسلة آنياً ويدفع بها كمرجع إلى المازج الموجود بالمستقبل. وتقوم هذه التشكيلة مباشرة بخفض جميع الإشارات المستقبلة وتحويلها إلى النطاق الأساسي للمستقبل. وفي حين أنه قد يكون عرض نطاق معالجة الإشارة لأي جهاز تحديد ارتفاع راداري نمطي أقل من 100 Hz لكل خانة من خانات مدى الارتفاعات، فإن عرض النطاق الكلي للمستقبِل قد يصل إلى العديد من وحدات MHz حسب معدل تشكيل التردد المختار وزمن تأخير الارتفاع. وتُطبّق الأشكال الأحدث من أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية معالجة رقمية للإشارة المحوَّل ترددها بالخفض والمرقمنة. وهذه المعالجة اللاحقة للإشارات المستقبلة تحدث عادةً في ميدان التردد. ولهذا الغرض تخضع الإشارات المستقبلة والمحولة بالخفض لتحويل فوريه السريع (FFT). وبعد مرحلة التحويل هذه، تستخلص خوارزميات تحديد القرار (تخضع لشروط الملكية عادةً) معلومات الارتفاع من الإشارة. وتقوم أجهزة الرادار FMCW ذات المدة الثابتة لشكل الموجة FMCW المثلثة بقياس المدى من الهدف عبر علاقة خطية للتردد الطيفي للهدف في عرض نطاق المستقبل العريض.

وكلما زاد التردد الطيفي للهدف المكتشف زاد المدى من الهدف والعكس. وتقوم أجهزة الرادار FMCW ذات المدة المتغيّرة لشكل الموجة FMCW المثلثة بقياس المدى من الهدف عبر مدة فترة الموجة المثلثة.

وجميع أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية FMCW تحدد الارتفاع من خلال التحليل الطيفي لمدة الموجة FMCW المثلثة. وتستعمل بعض أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية طريقة "عد تقاطعات الصفر" كوسيلة لحساب تردد الإشارة المهيمنة في حين يستعمل البعض الآخر تقنية المعالجة الرقمية لتحويل فورييه السريع ثم تطبيق خوارزميات اشتقاق معلومات الارتفاع من الإشارة المستقبلة.

ومن ثم، ينبغي إدراك أن أيّ تداخل غير متوقع يمكن أن يمتزج بالموجة FM الخطية، ومن ثم يتسبّب في جعل جهاز تحديد الارتفاع الراديوي يخطئ في الإشارة الممزوجة باعتبارها أرض، يمكن أن يتسبّب في إعلان جهاز تحديد الارتفاع الراديوية عن ارتفاع زائف.

وفي هذه الحالات التي ينتشر فيها التشكيل المتسبّب في التداخل عبر كثير من الوحدات MHz من عرض النطاق بامتزاجه بالإشارة FM المرجعية الخطية في المازج الموجود بالمستقبل، يتمثل التأثير في زيادة الضوضاء الأساسية لمستقبل الرادار FMCW تدريجياً عن طريق كل إشعاع يتم استقباله. ومن المهم معرفة أن تشكيل التردد المتغيِّر خطياً يؤدي إلى وقوع الموجات الحاملة ضيقة النطاق نسبياً داخل أو بالقرب من حافة تشكيل جهاز تحديد الارتفاع المقرر كنسها عن طريق بعض أجزاء نطاق تمرير مستقبل جهاز تحديد الارتفاع الراديوي.

ويرد في الجدولين 1 و2 العديد من الأمثلة لجهاز تحديد الارتفاع الراداري النبضي. ويتضمن نظام تحديد الارتفاع النبضي مستقبِل – مرسِل وكاشفات ارتفاع مدمجة أو بعيدة وخيارات مختلفة للهوائي.

ويقوم جهاز تحديد الارتفاع النبضي بتحديد ارتفاع الطائرة عن طريق قياس المهلة الزمنية بين النبضة المرسلة والنبضة المستقبلة، المنعكسة من سطح الأرض. ولبعض أنواع أجهزة قياس الارتفاع النبضية ميزة تتمثل في إمكانية استخدامها هوائي واحد للإرسال والاستقبال. وعرض حزمة هوائي جهاز تحديد الارتفاع الراداري المحدد يجب أن يكون عريضاً بما يكفي لتغطية زاويتي التمايل والتمور الاعتياديتين للطائرة، بما يؤدي إلى تغيّر كبير في مهلة الإشارة المرتدّة. ولتوفير المدى لأقرب إشارة مرتدة ضمن حدود حزمة الهوائي، يضم الكثير من أجهزة تحديد الارتفاع الراداري النبضية دارة تعزيز بوحدة تتبّع لمدى الحافة الأمامية. وتعمل وحدة التتبُّع على موضعية البوابة الخاصة برادار التشكيل النبضي فوق الحافة الأمامية للإشارة المرتدة.

وبالنسبة لأجهزة تحديد الارتفاع النبضية، يحدد الارتفاع بنصف حاصل ضرب الزمن المنقضي في سرعة الضوء ($h = (c \cdot t)/2$، حيث h، ارتفاع الطائرة وc سرعة الضوء وt، الزمن المنقضي بين الإرسال والاستقبال). ويقوم المرسل بإرسال إشارة مرجع زمني لتفعيل مولد موجات منحدرة للدقة. وتقارن فولطية الموجة المنحدرة بفولطية المدى التي تتناسب مع الارتفاع المبيّن.

ومن المهم الإشارة إلى أن أيّ تقييم للتأثيرات المتراكمة للتداخلات المحتملة باستعمال نطاق جهاز تحديد الارتفاع يجب أن تستعمل فيه "الارتفاع التشغيلي" المحدد في الجدولين 1 و2 وليس "مدى الارتفاع المبلّغ عنه". وسبب استعمال "الارتفاع التشغيلي" هو أن جميع أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية تستمر في التشغيل بأسلوب البحث عن الارتفاع طوال الوقت الذي تكون فيه خارج "مدى الارتفاع المبلّغ عنه" لها. ونتيجة لذلك، فإن أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية تكون معرّضة أثناء عملها بأسلوب البحث عن الارتفاع للكشف عن مصادر تداخل بوصفها ارتفاعات زائفة تتسبّب بدورها في تفاعلات غير مناسبة فيما بين الأنظمة القائمة على أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية مثل نظام الإنذار بالاقتراب من الأرض ورادارات الأحوال الجوية والنظام TCAS وأنظمة التحكم في الطائرة وغيرها من الأنظمة الهامة.

2.1 مخطط إشعاع هوائي جهاز تحديد الارتفاع الراديوي

تستعمل جميع أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية تصميماً للهوائي يوفر كسباً يتراوح بين 8 و13 dBi وتغطية بين 35 و60 درجة عند النقطة 3 dB (منتصف القدرة) لمخطط إشعاع الهوائي. ويفرض ضرورة وجود حزم الهوائي الواسعة هذه المدى الواسع لزوايا التموّر والتمايل التي يمكن أن تكون عليها الطائرة أثناء طيرانها. ومخطط إشعاع الهوائي يكون في الأساس على شكل مخروط ومستقطب خطياً في الاتجاه الأفقي. بيد أن الاتجاه الفعلي لإشعاع مستقطب أفقياً من حيث التسديد في اتجاه الشمال

أو الجنوب أو الشرق أو الغرب يعتمد كلياً على متجه طيران الطائرة. وعزل الاستقطاب المتقاطع للإشارات ذات الاستقطاب الرأسي غير موصّف في أي هوائيات منتجة لأجهزة تحديد الارتفاع الراديوية ولا يمكن الاعتماد عليه لتوفير أي إجراء لحماية جهاز تحديد الارتفاع من التداخلات من خلال اختيار الإرسال بالاستقطاب الرأسي.

وحقيقة ضرورة أن تسدد جميع هوائيات أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية نحو سطح الأرض يجعل الأنظمة عرضة لكل مصادر التداخلات المحتملة التي تشع أثناء الاقتراب. وهوائيات أجهزة تحديد الارتفاع، نظراً لموقعها على الطائرة لا تتمتع بفائدة الاحتجاب أو الاستتار عن الكثير من مصادر التداخلات المحتملة الموجودة على سطح الأرض. وعلى العكس من ذلك، فهي يمكنها أن "ترى" رأسياً جميع مصادر الإشعاع المحتملة التي تتسلّل من المباني وعن طريق الإرسال المباشر من أي أجهزة تعمل خارج أي منشأة.

وكسب الذروة، كما هو وارد في الجدولين 1 و2 لهوائيات أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية ينبغي استعماله عندما تكون مسيرات الانتشار ضمن المدى ±30° من المتجه العمودي على باطن الطائرة. ويجب أن تأخذ دراسات التقاسم والتوافق في الاعتبار حقيقة أن الموقع الزاوي للطائرة يمكن أن يصل إلى ±45° بالنسبة للتمايل و±20°بالنسبة للتمور. وخارج هذا المدى الزاوي، ينبغي لكسب جهاز تحديد الارتفاع الراديوي أن يستند إلى خصائص الهوائي (انظر الجدولين 1 و2).

3.1 دقة القياس

ترد متطلّبات الدقة المطلقة للقياس في المعايير RTCA DO-155 "معايير الأداء الدنيا – أجهزة تحديد الارتفاع الرادارية منخفضة المدى المحمولة جواً" وكذلك في المعيار EUROCAE ED30 الذي يحدد قيمة دقة القياس في حدود 0,9 m (3 أقدام) على الارتفاعات الأدنى من 46 m (150 قدماً). ويشترط المعيار ARINC 707 أن تكون دقة القياس عند القياس طبقاً للمعايير RTCA DO-155 في حدود 0,45 m (1,5 قدم) أو 2% أيُّهما أكبر، على الارتفاع المبيّن في كامل المدى من –6,1 إلى 762 m (–20 إلى 500 2 قدم). ومتطلبات الدقة هذه ضمن عرض النطاق المتاح تتحقق باستعمال تقنيات معالجة الإشارة. بيد أن هذه التقنيات لا يمكن استعمالها إلاّ مع قيم استثنائية للنسبة إشارة إلى ضوضاء فوق السطح المستوي للمدرج على ارتفاعات منخفضة. وفيما يتعلق باستعمال عروض نطاقات محددة، انظر الجدولين 1 و2.

4.1 منع التداخل بين الوحدات – تخالف التردد

تستعمل بعض الطائرات عدداً من أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية يصل إلى ثلاثة أجهزة في آن واحد. ويستلزم وجود أجهزة متعددة للتحوّط من احتمال قبول نظام القيادة الآلية أو نظام التحكم في الطائرة لبيانات ارتفاع زائفة بقيمة احتمال تقل عن 1×10^{-9} (واحد في المليار). ومن أجل إمكانية التعايش بين ثلاثة أجهزة راديوية لتحديد الارتفاع تعمل في آن واحد مع وجود هوائياتها على مسافة أقدام قليلة من بعضها، يعمل الكثير من أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية بتخالف في التردد المركزي لتقليص احتمال التداخل فيما بينها. ويبلغ تخالف التردد بوجه عام 5 MHz تقريباً. وبالتالي، إذا تم تركيب نظامين لتحديد الارتفاع على نفس الطائرة، يحتاج الأمر إلى 5 MHz إضافية، بينما يحتاج الأمر إلى 10 MHz إضافية للطائرة المركب فيها ثلاثة أنظمة لقياس الارتفاع.

5.1 استقرار التردد في أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية

يعتمد عدد ضخم من أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية قيد الاستعمال على تشكيل تردد خطي "مفتوح الدارة" لمذبذب بالتحكم في الفولطية (VCO) يعمل على تردد مركزي مقداره 4 300 MHz تقريباً باستقرار في التردد يصل عادةً إلى ±25 MHz عبر تغيّر في درجة الحرارة بين –55° و+70°.

2 إجمالي عرض النطاق اللازم لأجهزة تحديد الارتفاع الراديوية

لتحديد عرض النطاق الذي يستعمله نظام من أنظمة تحديد الارتفاع الراديوية الخاصة بالطائرات، يجب مراعاة العديد من العوامل. أولاً، عرض نطاق الكنس يجب أن يُراعى مع استقرار تردد جهاز تحديد الارتفاع الراديوي. ونظراً للأهمية الحيوية لنظام تحديد الارتفاع الراديوية بالنسبة لحماية الأرواح والممتلكات، يُوصى باستعمال عرض نطاق بتناقص يبلغ مقداره −40 dB لتحديد عرض نطاق الإشارة المرسلة. ثالثاً، تجب مراعاة عامل تشغيلي أو عامل متعلق بالتركيب. ويُستخدم على الطائرات الكبيرة نظامان أو ثلاثة أنظمة راديوية لتحديد الارتفاع ويمكن أن تستعمل هذه الأنظمة تخالفاً في التردد يتراوح بين 5 و10 MHz. وجدير بالذكر أيضاً أن عرض نطاق الاستقبال، ينبغي أن يتضمن، في أقل الأحوال، عرض نطاق الإرسال في ظل جميع ظروف التشغيل؛ لا سيما في ظل الانسياق الناجم عن مدى درجة الحرارة.

وفي حالة وجود أكثر من جهاز راديوي لتحديد الارتفاع على متن الطائرة، لا يمكن الإبقاء على التردد المركزي عند القيمة 4 300 MHz دائماً. فعلى الطائرة التي تحمل على متنها جهازين أو ثلاثة أجهزة راديوية لتحديد الارتفاع، يمكن تشغيل هذه الأجهزة على ترددين مركزيين أو ثلاثة بتخالف عن القيمة 4 300 MHz لتفادي التداخل فيما بينها. ويمكن اللجوء إلى التخالف في التوقيت أو المدة أو الاتساع. وبهذه الطريقة، يكون عرض النطاق المستخدم على كل طائرة أكبر من عرض نطاق أي جهاز وحيد من أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية.

وتستعمل أجهزة تحديد الارتفاع الرادارية النبضية تقنيات توزيع الطيف لتحقيق الدقة المطلوبة وسلامة الإشارة حيث يحتمل استعمال عرض النطاق البالغ 200 MHz بالكامل المتاح في نطاق الترددات 4 200-4 400 MHz.

وعلاوةً على ذلك، تعمل أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية في عروض نطاقات واسعة لتحقيق مستويات الدقة المطلوبة والتي تعتبر مهمة بوجه خاص بالنسبة لنظام التحكم الآلي في الطائرة المستخدم في حالة اقتراب الطائرة وهبوطها. وخفض عرض نطاق التردد المتاح يُخفض بالتناسب دقة أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية.

وتستخدم مستقبلات أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية FMCW مرشاح تمرير النطاق مما يعني نبذ إرسالات المجالات المشعة عالية الشدة (HIRF) خارج نطاق التشغيل والحيلولة بينها وبين التسبُّب في انحطاط أو تدنّي أداء أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية. بيد أن مرشاح تمرير النطاق له قدرة محدودة فيما يتعلق بنبذ الإرسالات القريبة من النطاق المطلوب. ونتيجة لذلك، قد يتأثر أداء جهاز تحديد الارتفاع بالإشارات الموجودة على حافة النطاق.

ويقدم الجدولان 1 و2 الخصائص التقنية لأجهزة تمثيلية راديوية لتحديد الارتفاع FMCW تماثلية ورقمية.

الخصائص التقنية لأجهزة تحديد الارتفاع الراديوية

الجـــدول 1

أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية التماثلية

	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A1	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A2	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A3	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A4	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A5	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A6	الوحدات
المرسِل							
التردد المركزي الاسمي	4 300	4 300	4 300	4 300	4 300	4 300	MHz
القدرة المرسلة	0,600	1	0,1 إلى 0,25	100	5	40	W (الذروة)
التشكيل (FMCW أم نبضي)	FMCW	FMCW	FMCW	نبضي	نبضي	نبضي	
عرض نطاق الكنس بعد استبعاد الانسياق الناجم عن درجة الحرارة	104	132,8	133	لا ينطبق	لا ينطبق	لا ينطبق	MHz
مدى الارتفاع المبلَّغ عنه	4,6− إلى 2 500+ (15− إلى 8 200+)	6− إلى 2 438+ (20− إلى 8 000+)	6− إلى 6 000+ (20− إلى 19 685+)	1 524+ (5 000)	1 524+ (5 000)	457+ (1 500)	metres/(feet)
الارتفاع التشغيلي	12	12	20	12	12	12	km
مدى درجة الحرارة التشغيلية	40− إلى 70+°	55− إلى 70+°	40− إلى 71+°	55− إلى 70+°	55− إلى 70+°	55− إلى 70+°	Celsius
استقرار التردد	100	لا يوجد مرجع بلوري	لا يوجد مرجع بلوري	لا ينطبق	لا ينطبق	لا ينطبق	ppm/°C
الانسياق الأقصى في التردد عبر مدى درجة الحرارة التشغيلية	15±	15±	20±	لا ينطبق	لا ينطبق	لا ينطبق	MHz
العدد النمطي لأنظمة تحديد الارتفاع المركبة على متن الطائرة الواحدة	حتى 3	حتى 3	حتى 3	حتى 3	حتى 3	حتى 3	لكل طائرة

الجـــدول 1 (*تابع*)

	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A1	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A2	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A3	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A4	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A5	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A6	الوحدات
تخالف التردد المركزي بين أنظمة تحديد الارتفاع الراديوية	5	5	0	لا ينطبق	لا ينطبق	لا ينطبق	MHz
تردد تكرار الموجة	49 إلى 51 Hz	Hz 150	12 Hz إلى 1 623 Hz	pps 10 000 (نبضة في الثانية)	pps 20 000 (نبضة في الثانية)	pps 6 000 (نبضة في الثانية)	Hz أو pps (نبضة في الثانية)
عرض النبضة	لا ينطبق	لا ينطبق	لا ينطبق	130	200	75	ns
عرض نطاق الإرسال عند 3 dB	110	162,8	171	8	7	15	MHz
عرض نطاق الإرسال عند 20 dB	120	170	181	44	29	51	MHz
عرض نطاق الإرسال عند 40 dB	180	180	191	130	108	131	MHz
المستقبِل							
الحساسية*	120–	113– >	120– ≥	95–	95–	95–	dBm
عامل الضوضاء	10	6	6	10	10	10	dB
حمولة المستقبِل المفرطة عند عتبة قدرة الدخل $P_{T,RF}$	30–	53–	56–	40–	40–	40–	dBm
عرض نطاق التردد المتوسط عند 3– dB	2	0,25	0,025 إلى 2	9,2	6,0	16	MHz

الجـــدول 1 (*تتمة*)

	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A1	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A2	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A3	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A4	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A5	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي A6	الوحدات
الهوائي							
كسب الهوائي	10	10 نمطي 9,5 كحد أدنى	10 نمطي، بيد أنه يمكن استعمال هوائي مختلف	13	11	11	dBi
خسارة الكبل (مسير واحد)	6	6	2 إلى 7	6	6	6	dB
عرض الحزمة عند –3 dB	40 إلى 60	55	45 إلى 60	35	45	45	degrees

* بالنسبة لبعض أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية المدرجة أعلاه، فإن مستوى قدرة ضوضاء المستقبل، المحسوب استناداً إلى عرض نطاق التردد المتوسط وعامل الضوضاء، يكون أعلى من مستوى حساسية المستقبِل. وفي هذه الحالات يحدد عرض نطاق كاشف جهاز تحديد الارتفاع الراديوي مستوى الحساسية، حيث إنه يكونَ عادةً أقل من عرض نطاق التردد المتوسط.

الجـــدول 2

أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية الرقمية

	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي D1	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي D2	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي D3	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي D4	الوحدات
المرسِل					
التردد المركزي الاسمي	4 300	4 300	4 300	4 300	MHz
القدرة المرسلة (الذروة)	0,400	0,100	0,1 إلى 1	5	W (الذروة)
التشكيل	FMCW	FMCW	FMCW	نبضي	
عرض نطاق الكنس بعد استبعاد الانسياق الناجم عن درجة الحرارة	150	176,8	133	لا ينطبق	MHz
مدى الارتفاع المبلَّغ عنه	6− إلى 1 676+ (20− إلى 5 500+)	6− إلى 1 737+ (20− إلى 5 700+)	6− إلى 6 000+ (20− إلى 19 685+)	6− إلى 2 424+ (20− إلى 8 000+)	Metres/(feet)
الارتفاع التشغيلي	12	12	20	12	km
مدى درجة الحرارة	40− إلى 70+	40− إلى 70+	40− إلى 71+	40− إلى 71+	Celsius
استقرار التردد	50±	30±	5±	لا ينطبق	ppm
الانسياق الأقصى في التردد عبر مدى درجة الحرارة التشغيلية	0,22±	0,129±	0,22±	لا ينطبق	MHz
العدد النمطي للأنظمة التي يمكن تركيبها	2 أو 3	2 أو 3	1 أو 2	1 أو 2	لكل طائرة

الجـــدول 2 (*تابع*)

	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي D1	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي D2	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي D3	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي D4	الوحدات
المبدأ الرئيسي للتقاسم في حالة تركيب جهازين وثلاثة من الأجهزة الراديوية لتحديد الارتفاع	يحدد اتساع التردد طبقاً للسطح البيني SDI المثبّت (التخالف ±2,5 MHz). ويضبط توقيت شكل الموجة عند استقبال تداخلات. وتستعمل معالجة الإشارة للتخفيف من أثر النبضة IF المتقاطعة	يحدد رقم النظام المركب (1 و2 و3) تخالف التردد –5 أو 0 MHz أو +5 MHz. ويختار كل رقم نظام نموذج قفزة ترددية خطية لتفادي التداخلات المتبادلة بين الطائرات	لا ينطبق	لا ينطبق	
عرض النبضة	لا ينطبق	لا ينطبق	لا ينطبق	30 أو 225	ns
تردد تكرار الموجة	143 Hz ثابت	1 000 Hz ثابت	100 Hz إلى 4 700 Hz	25 000 pps	Hz أو pps (نبضة في الثانية)
عرض نطاق الإرسال عند 3 dB	150	177	175	5 أو 31	MHz
عرض نطاق الإرسال عند 20 dB	153	180	185	26 أو 105	MHz
عرض نطاق الإرسال عند 40 dB	180	190	196	106 إلى 195	MHz
المستقبِل					
الحساسية*	< –114	< –125	≥ –120	–95	dBm
عامل الضوضاء	8	9	8 إلى 12	10	dB
حمولة المستقبِل المفرطة عند عتبة قدرة الدخل $P_{T,RF}$	–30	–43	–53	–40	dBm

الجـــدول 2 (*تتمة*)

	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي D1	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي D2	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي D3	جهاز تحديد الارتفاع الراديوي D4	الوحدات
عرض نطاق التردد المتوسط (IF) عند 3– dB	MHz 0,312 (LPF – Single sided)	MHz 1,95	0,1 إلى 2,0	30	MHz
الهوائي					
كسب الهوائي	11	10	8 إلى 11	13	dBi
خسارة الكبل (مسير واحد)	6 (10 max)	0	2 إلى 7	0 إلى 2	dB
عرض الحزمة عند 3– dB	40 إلى 60	45 إلى 60	45 إلى 60	45	degrees

* بالنسبة لبعض أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية المدرجة أعلاه، فإن مستوى قدرة ضوضاء المستقبِل، المحسوب استناداً إلى عرض نطاق التردد المتوسط وعامل الضوضاء، يكون أعلى من مستوى حساسية المستقبِل. وفي هذه الحالات يحدد عرض نطاق كاشف جهاز تحديد الارتفاع الراديوي مستوى الحساسية، حيث إنه يكون عادةً أقل من عرض نطاق التردد المتوسط.

الملحـــق 3

معايير الحماية وتطبيقها في التقاسم والتوافق

1 مقدمة

معايير ومتطلّبات الحماية الموضحة أدناه سوف تحمي أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية من تأثير التداخل الضار الذي قد يؤدي إلى الحطّ من دقة الارتفاع أو التسبب في قياس ارتفاعات زائفة. وقد يحدث التداخل من مصادر خارج النطاق وداخله. ويمكن لهذين النوعين من المصادر التسبُّب في الكثير من التأثيرات الضارة من بينها فقدان حساسية المستقبِل والحمل الزائد والإبلاغ عن ارتفاعات زائفة والتعطُّل العام؛ وذلك طبقاً لمدة التداخل وخصائصه. ولهذا الغرض، يرد شرح لعدد من أساليب التعطّل بسبب التداخل مع تحليلها فضلاً عن تحديد معايير الحماية.

وربما يحدث التأثير الأكثر ضرراً على جهاز تحديد الارتفاع الراديوي من جرّاء التداخل الضار عندما يفسر هذا الجهاز إشارات التداخل على أنها إشارات أرضية زائفة ومن ثم إعطاء قراءة غير صحيحة للارتفاع. ولا يمكن التعامل مع هذه الحالات إلاّ على أساس كل حالة على حدة مع كل جهاز تمثيلي راديوي لتحديد الارتفاع وكل نوع من مصادر التداخل المحتملة نظراً إلى أن التأثير يعتمد بشدة على خصائص مصدر التداخل وجهاز تحديد الارتفاع الراديوي معاً.

ويمكن لمرسِل مسبب للتداخل أن يُحدث هذا التداخل الضار من خلال إدخال إرسالات غير مرغوبة ضمن عرض نطاق التردد المتوسط (IF) تُقاس كارتفاعات غير صالحة من قبل جهاز تحديد الارتفاع الراديوي. ويمكن أن يُسفر عن التداخل أيضاً زيادة في الضوضاء الأساسية ومن ثم فقدان حساسية المستقبِل وما يستتبعه من عدم القدرة على تحديد الارتفاع الصحيح.

2 معايير الحماية

يجب أن تستخدم في أي دراسة للتوافق بين أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية والأنظمة الأخرى معايير الحماية بالنسبة للانحطاط الأقصى المقبول في أداء جهاز تحديد الارتفاع الراديوي. وهناك ثلاث آليات أساسية لاقتران التداخل الكهرمغنطيسي بين أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية وإشارات التداخل الصادرة عن المُرسلات الأخرى: الحِمل الزائد للمستقبِل وفقدان الحساسية وقياس ارتفاع زائف. كما يمكن للتداخل خارج النطاق وداخله أن يؤثر في أداء جهاز تحديد الارتفاع الرادَيوي. وفي حين يُرجّح أكثر حدوث نوع أو أكثر من التأثيرات مع مصدر تداخل داخل النطاق مقابل مصدر خارج النطاق، لا توجد علامات واضحة لتحديد نوع التأثير الذي سيحدث. وبالتالي، تجب مراعاة جميع العوامل عند إجراء دراسات التقاسم.

1.2 الحِمل الزائد على الطرف الأمامي للمستقبِل

يُحدث الحِمل الزائد على الطرف الأمامي للمستقبِل عندما تحدث قدرة كبيرة من إشارة تداخل تشبّعاً للطرف الأمامي لمستقبل جهاز تحديد الارتفاع الراديوي مما يؤدي إلى تأثيرات متأصّلة من السلوك غير الخطي؛ مثل التشوّه التوافقي أو التشكيل البيني. ويكون للطرف الأمامي لأي جهاز راديوي لتحديد الارتفاع عادةً انتقائية متوسطة (الانحسار التدريجي للمرشاح RF). وبالتالي، فإن أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية معرّضة للتداخلات في كل من عرض نطاق كنسها التشغيلي أو من خارج عرض النطاق هذا.

ويقع التداخل المحتمل على الطرف الأمامي لجهاز تحديد الارتفاع الراديوي عندما:

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

حيث:

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

I_{RF} : قدرة الذروة الإجمالية لإشارة التداخل عند دَخل المستقبِل (مجموع كل المصادر المساهمة في التداخل عند خَرج الهوائي بعد مراعاة خسارة الكبل وعامل النبذ على أساس التردد (FDR) (mW))

$P_{T,RF}$: عتبة قدرة الدخل التي يحدث عندها الحمل الزائد للطرف الأمامي للمستقبِل (mW)

$I_{i,RF}$: قدرة مصدر التداخل رقم i عند دخل المستقبِل بعد مراعاة خسارة الكبل (mW)

$FDR_{i,RF}$: العامل FDR للطرف الأمامي للمستقبِل معطى من خصائص المرشاح المبيّنة في الجدول 3 أدناه، والذي يمثل التوهين الذي يتعين تطبيقه على إشارة التداخل رقم i (انظر التوصية ITU-R SM.337).

الجـــدول 3

الانتقائية RF لأجهزة تحديد الارتفاع الراديوية

تردد التداخل (MHz)	توهين المرشاح RF (dB)
≥ 4 200	توهين بمقدار 24 dB لكل أثمون حتى 40 dB كحدّ أقصى
4 200	0
4 300	0
4 400	0
≤ 4 400	توهين بمقدار 24 dB لكل أثمون حتى 40 dB كحدّ أقصى

ويُلاحظ أن $P_{T,RF}$ هي عادةً نقطة انضغاط المستقبل عند 1 dB، بالنسبة إلى منفذ دَخل المستقبِل (مقابل خرج المكبّر منخفض الضوضاء (LNA)). وهذه الكمية عبارة عن خاصّية تعتمد على النموذج يجب تحديدها بشكل مفرد لكل نوع من أنواع أجهزة تحديد الارتفاع من بطاقة بياناته؛ وترد القيم الخاصة بأجهزة تحديد الارتفاع المرشحة في الجدولين 1 و2.

2.2 فقدان حساسية المستقبِل

يتعلق فقدان حساسية المستقبِل بشدة إشارة التداخل التي تقع ضمن عرض نطاق التردد المتوسط لجهاز تحديد الارتفاع الراديوي. والشيء الذي يُعقّد مسألة فَقدان حساسية جهاز تحديد الارتفاع الراديوي هو أن الطيف RF الذي يرتبط بعرض نطاق التردد المتوسط من خلال المزج ليس ثابتاً مع الزمن، لأن أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية تعمل بتشكيل متجانس الاقتران (homodyne) باستعمال إشارة بتشكيل خَطّي للتردُّد. ولذا، فإن أثر التداخُل على فقدان حساسية مستقبِل جهاز تحديد الارتفاع الراديوي يعتمد على الزمن طبقاً للخصائص التقنية لجهاز تحديد الارتفاع الراديوي المحدد.

والتأثير على جهاز راديوي لتحديد الارتفاع من مصادر تداخل داخل النطاق يتعلق بقدرة إشارات التداخل في عرض نطاق التردد المتوسط للمستقبل.

وعند النظر إلى I، قدرة التداخل داخل عرض نطاق التردد المتوسط (بعد مزج إشارة التداخل المستقبلة مع إشارة بتشكيل خطّي للتردد)، فإن أداء جهاز تحديد الارتفاع الراديوي يعتبر منحطاً عندما تتسبَّب إشارة التداخل في زيادة الضوضاء الأساسية داخل مستقبِل جهاز تحديد الارتفاع الراديوي بمقدار 1 dB.

ويقابل هذا قيمة لنسبة تداخل إلى ضوضاء (I/N) تساوي −6 dB، حيث تشتق قدرة الضوضاء الحرارية الفعلية للمستقبِل، والتي تنبغي مراعاتها عند إجراء تحليل الحماية داخل عرض نطاق التردد المتوسط لجهاز تحديد الارتفاع الراديوي، من المعادلة:

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

حيث:

$B_{R,IF}$: عرض نطاق التردد المتوسط (IF) لجهاز تحديد الارتفاع الراديوي (MHz)

N_F : عامل الضوضاء عند دخل المستقبِل (dB).

وعند تحديد التوافق على أساس فقدان الحساسية داخل عرض النطاق IF، فإن عتبة قدرة الضوضاء، $I_{T,IF}$، التي يبدأ عندها أداء جهاز تحديد الارتفاع الراديوي في الانحطاط وتُحدَّد كالتالي:

$$I_{T,IF} \geq N - 6\,\text{dB} \tag{6}$$

ومدة انتشار التداخل هي النسبة بين I (قدرة التداخل داخل عرض النطاق IF) وI_{RF} (القدرة الإجمالية للتداخل المستقبِل). وهي توضح تأثير مزج إشارة تداخل بتردد ثابت بموجة FM خطية يليه ترشيح لاحق بمِرشاح تمرير IF منخفض.

ولتحديد مدة انتشار التداخل، يتعين تحديد العديد من المعلمات الإضافية:

f_1 : تردد الكنس الأدنى لجهاز تحديد الارتفاع الراديوي (MHz)

f_2 : تردد الكنس الأعلى لجهاز تحديد الارتفاع الراديوي (MHz)[6]

B_S : عرض نطاق الكنس

f_{ci} : التردد المركزي لمصدر التداخل (MHz).

وبالنسبة لمصادر التداخل ذي التردد الثابت، تحدد مدة انتشار التداخل كالتالي:

$$R_S = \frac{2B_{R,IF}}{B_S} \tag{7}$$

بشرط:

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

ويمكن وضع ترددي الكَنس الأدنى والأقصى، f_1 وf_2 ، على التوالي في أي مكان بالنطاق 4 200-4 400 MHz، شريطة عدم الإخلال بمعايير الحماية في عرض نطاق الكنس وفي النطاق المجاور.

ومقدار قدرة إشارة التداخل التي يلتقطها التردد المتوسط للمستقبِل تتناسب مع R_s (مدة انتشار التداخل). لذا، فإن العلاقة بين $I_{T,RF}$ والعتبة $I_{T,IF}$ تحدد كالتالي:

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

فإذا تجاوز التداخل الإجمالي المحسوب العتبة التي يحدث عندها فقدان حساسية المستقبِل ($I_{T,RF}$)، يحدث تداخل ضار.

وفي الحالات التي لا يرسل فيها التداخل باستمرار أو يتغيّر فيها تردد التداخل مع الزمن، ينبغي التعامل مع التداخل المرسل على أنه مصدر يرسل باستمرار لأن التداخل المتولد عن أي موجة متغيرة الشكل يمتلك فرصة التسبب إما في فقدان أي قياس وحيد للارتفاع (نتيجة لانحطاط الأداء) أو حساب ارتفاع زائف لأي قياس وحيد والذي يتضمن بدوره التقدير الإجمالي للارتفاع. وقياس الارتفاع غير الدقيق عبر الزيادة في مستوى الضوضاء أو الارتفاعات الزائفة يولد قيماً "خارج الحدود" تؤثر بشدة على قياس الارتفاع الذي يُفترض أن يكون دقيقاً.

---

6 يُلاحظ أن $f_1 = 4.3\text{GHz} - 0.5*B_s$ أو $f_2 = 4.3\text{GHz} + 0.5*B_s$، حيث إن عرض نطاق الكنس (B_s) والانسياق الأقصى للتردد محددان في الجدولين 1 و2.

3.2 الإبلاغ بارتفاعات زائفة

الإبلاغ عن ارتفاع زائف خطأ خطير لجهاز تحديد الارتفاع الراديوي قد يؤدي إلى استجابة غير مناسبة لأنظمة حساسة في الطائرة مثل نظام الإنذار بالاقتراب من الأرض ونظام تجنب الاصطدام في الحركة الجوية (TCAS) ووسائل التحكم في الطائرة وغير ذلك من الأنظمة الحساسة.

وفي حالة أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية القائمة على التشكيل FMCW، تحدث حالات الإبلاغ عن ارتفاعات زائفة عندما يتم اكتشاف إشارات التداخل على أنها مكونات ترددية أثناء التحليل الطيفي للتردد في كامل عرض النطاق IF.

وإشارة المذبذب المحلي (LO) لجهاز تحديد الارتفاع FMCW المُدخلة على مازج المستقبِل يتم كنسها من التردد f_1 إلى التردد f_2 كما تحدد في المعادلة (7) أعلاه. ويقوم مازج المستقبِل بطرح التردد اللحظي للمذبذب المحلي من تردد إشارة التداخل الواردة، f_{ci}.وعندما تقع القيمة المطلقة للفارق بين تردد المذبذب المحلي الممسوح وتردد مصدر التداخل، f_{ci}، بين 0 Hz وعرض النطاق IF ($B_{R,IF}$)، يتولد ارتفاع زائف عند التحليل الطيفي للتردد.

ومقدار المكونات الطيفية وعرض النطاق الناتج لطيف إشارة التداخل تعتمد على شدة مستوى التداخل المستقبل والجزء من الزمن الذي تبقى فيه إشارات الفارق الناتجة داخل عرض النطاق IF.

وبالتالي، يجب ضبط قدرة التداخل المستقبل بالقدر من الزمن الذي تتواجد فيه إشارة التداخل في عرض النطاق النهائي لمعالجة الإشارة، الذي هو عرض نطاق الكاشف. وتُعطى قدرة التداخل الناتج عند مرحلة الكاشف بالمعادلة:

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

حيث يعتبر عرض نطاق مقداره 100 Hz مناسباً:

I_D : قدرة التداخل عند الكاشف

B_S : عرض نطاق الكنس.

فإذا كان مقدار المكونات الطيفية الناتجة عن إشارة التداخل يتجاوز عتبة الكشف لجهاز تحديد الارتفاع ($I_{T,FA}$)، فإنه قد ينظر إليها زيفاً على أنها ارتفاعات صحيحة من جانب جهاز تحديد الارتفاع ولن تكون هناك وسيلة من أجل استبعادها من حساب الارتفاع.

وعملياً تتسبّب قدرة التداخل عند الكاشف (I_D) مكونات طيفية لهدف زائف داخل سلسلة معالجة إشارة المستقبِل FMCW إذا تجاوزت عتبة الحماية، $I_{T,FA}$

$I_{T,FA}$ = −143 dBm باعتبار وجود عرض نطاق لكاشف مقداره 100 Hz بعد التردد اللحظي للمذبذب المحلي لجهاز تحديد الارتفاع.

ورسمياً:

إذا كانت $I_D < I_{T,FA}$ فإنه لن تكون هناك مكونات طيفية ولا أهداف زائفة.

إذا كانت $I_D > I_{T,FA}$ ستكون هناك مكونات طيفية تُسفر عن ارتفاعات زائفة.

والمكونات الطيفية المحتملة لمصدر التداخل تقع داخل عرض النطاق الإجمالي IF ($B_{R,IF}$) ويمكن بالتالي أن تعالج داخل الكاشف عندما:

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

حيث:

f_{ci} : التردد المركزي لمصدر التداخل المحتمل (MHz)

f_{LOi} : أي تردد لحظي بين الترددين f_1 وf_2 المحددين في الفقرة 2.2 أعلاه.

وبالإضافة إلى ذلك، يجب في كل الأحوال ألا تزيد الكثافة الطيفية لقدرة مصدر التداخل (I_{PSD}) عند حد الكثافة الطيفية لقدرة المستقبِل FMCW عند dB 1P (P_{1dBSD}):

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

على أساس:

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

حيث:

P_{RI} : قدرة التداخل المستقبلي على التردد f_{ci} (dBm)

B_i : عرض نطاق مصدر التداخل عند dB 40− (Hz)

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

حيث:

$P_{T,RF}$: عتبة الحمل الزائد عند دخل المستقبِل (انظر الجدول 1 و2).

3 اعتبارات دراسة التوافق وملخص لمعايير الحماية

تعمل أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية خلال جميع مراحل الرحلة الجوية، بما في ذلك المناورات الأرضية. وبالتالي عند بحث سيناريوهات التقاسم، من المهم تجميع جميع المصادر المحتملة للتداخل بصورة مناسبة. وينبغي النظر في سيناريوهات مختلفة من مستوى سطح الأرض حتى km 12 في دراسات التقاسم. ويعتمد التداخل الإجمالي على أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية على عدد من خصائص طيف مصادر التداخل، وتوزيعها المكاني والكسب النسبي لهوائياتها. ونتيجة لطيران الطائرات على ارتفاع من سطح الأرض، قد يكون أثر التداخلات المتراكمة من مصادر موجودة على الأرض كبيراً. وقد يؤدي إلى تداخل ضار على أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية.

وكسب الذروة الوارد في الجدولين 1 و2 لهوائيات أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية ينبغي استعماله إذا كانت مسيرات الانتشار في حدود ±30° من متجه عمودي على باطن الطائرة. ويجب أن تُراعى دراسات التقاسم أيضاً حقيقة أن ارتفاعات الطائرة قد تصل إلى ±45° في التمايل وإلى ±20° في التمور. وخارج هذا المدى، ينبغي أن يستند كسب هوائيات أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية إلى خصائص الهوائيات (انظر الجدولين 1 و2). وعند تحديد خسارة مسير الانتشار مع أنظمة الأرض، يجب استعمال خط بصر مباشر نتيجة لمسير خالٍ من العوائق بين الأرض والطائرة التي تطير فوقها. فإذا تجاوز التداخل الإجمالي الأسوأ المحسوب، أي من معايير الحماية المحددة أدناه فيما يتعلق بفقدان الحساسية أو الحمل الزائد عند الطرف الأمامي أو ارتفاعات زائفة أو الكثافة الطيفية للقدرة، سيكون هناك تداخل ضار على أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية.

ونتيجة لحقيقة أن أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية توفر خدمة من خدمات حماية الأرواح، يتعين تفادي حدوث تداخل ضار عندما تكون الطائرات قيد التشغيل. ولتفادي التداخل الضار يجب الالتزام بمعايير الحماية التالية في سيناريوهات التشغيل الحرجة للطائرة:

فقدان الحساسية: $I/N = -6$ dB

الحِمل الزائد على الطرف الأمامي: $I_{RF} \leq P_{T,RF}$ كما هو موضح في الجدولين 1 و2

ارتفاعات زائفة (بالنسبة إلى أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية FMCW فقط):

$I_D < I_{T,FA}$ حيث $I_{T,FA}$ = –143 dBm/100 Hz بعد المذبذب اللحظي لجهاز تحديد الارتفاع

ونتيجة للوظيفة الحرجة فيما يتعلق بحماية الأرواح التي تقوم بها أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية، قد يكون من الضروري إضافة هامش سلامة إضافة إلى معايير الحماية كوسيلة للحفاظ على متطلبات الاعتمادية العالية لهذه التطبيقات. وسيتم تحديد مستوى هامش السلامة، إن وجد، الذي يتعين تطبيقه على أجهزة تحديد الارتفاع الراديوية التي تعمل في النطاق 200 4-400 4 MHz استناداً إلى دراسة أخرى.