التقرير ITU-R M.2076

العوامل التي تخفف من التداخل الذي تسببه رادارات التحديد الراديوي للموقع وخدمة استكشاف الأرض الساتلية/خدمة الأبحاث الفضائية (النشيطة) في الرادارات البحرية ورادارات الملاحة الراديوية للطيران في النطاقين 9,0-9,2 و9,3-9,5 GHz وبين رادارات خدمة استكشاف الأرض الساتلية/خدمة الأبحاث الفضائية (النشيطة) ورادارات التحديد الراديوي للموقع في النطاقين 9,3-9,5 و9,8-10,0 GHz

(2006)

1 مقدمة

تدعو المسألة ITU-R 234/8 إلى دراسة الخصائص التقنية، ومعايير الأداء، وغيرهما من عوامل تحديد الموقع وأنظمة الملاحة الراديوية العاملة في النطاقين 9 200-9 000 MHz و9 500-9 300 MHz، ومعايير التداخل لتلك الأنظمة. وإضافة إلى ذلك، أنشأ القرار (WRC-03) 747 البند 3.1 من جدول الأعمال لكي ينظر المؤتمر WRC-07 في النهوض بالتوزيعات لخدمة تحديد الموقع في النطاقين 9 200-9 000 MHz و9 500-9 300 MHz وللتوزيع الأولي المشترك وأن ينظر في توسيع نطاق التوزيع الأولي لخدمة استكشاف الأرض الساتلية (النشيطة) وخدمة الأبحاث الفضائية (النشيطة) في النطاق 9 800-9 500 MHz الملاصق للنطاق 200 MHz. وترد خصائص الرادارات الأرضية التمثيلية في النطاق 10,5-8 500 GHz في مشروع التوصية الجديدة [ITU-R M.[8B.8-10 GHz. ويمثل هذا التقرير إسهاماً إضافياً في الدراسات اللازمة للمسألة ITU-R 234/8 والقرار 747 (المؤتمر العالمي للاتصالات الراديوية لعام 2003).

وتقدم التوصية ITU-R M.1372-1 – الاستخدام الفعال للطيف الراديوي بواسطة محطات الرادار في خدمة التحديد الراديوي، وصفاً لبعض أهم تقنيات خفض التداخل المستخدمة في الرادارات عموماً. وتركز هذه التوصية على العملية اللاحقة للكشف، وإن كان يمكن تنفيذ أحد التقنيات الموصوفة بها قبل الكشف. وتشمل العوامل التي تناقش هنا بعض العوامل التي تغطيها التوصية ITU-R M.1372 فضلاً عن بعض العوامل المكملة لها.

1.2 موجز الاستنتاجات

الشكل الرئيسي لانحطاط التداخل الذي يُحتمل أن يسببه التداخل النبضي هو زيادة معدل الإنذارات الخاطئة. ويخفف من هذا بصورة طبيعية بعض الخصائص العامة للرادارات، بما في ذلك الفصوص الجانبية للهوائيات والنبض غير المتزامن. وتفيد في هذا الشأن الاستجابات للنبضات الفردية، بما في ذلك الثابت الزمني السريع والتأثيرات المتطابقة للمراشيح، والتأثيرات الأخرى لتقصير أمد النبضات. وشكل الاقتران الذي يثير أقصى قدر من الانشغال هو اقتران فص جانبي مع الحزمة الرئيسية.

والتصميم المحكم للرادار يمكن أن يخفف من التداخل النبضي بطرائق عديدة، تشمل ما يلي:

- تقنيات النبضات المتعددة، بما فيها التجهيز M مرة من N مرة؛
- الإزالة المتعمدة للنبضات الفردية غير المتزامنة؛
- استشعار تأثيرات النبضات غير المتزامنة في المراجعة اللاحقة للتجهيز لنواتج مرشاح دوبلر؛
- العمليات غير الخطية والمتغيرة مع الزمن مثل الحد من التحكم وحساسية التحكم الزمني؛
- مضاهاة المسح بالمسح.

2 أنواع الرادارات في النطاقات

هناك أنواع عديدة من رادارات الملاحة الراديوية تعمل في النطاقين 000 9-200 9 MHz و300 9-500 9 MHz. وتعمل رادارات الملاحة الجوية الموجودة على الأرض في النطاق 000 9-200 9 MHz؛ وهي تشمل رادارات الاقتراب الدقيق (PARs) ورادارات أجهزة الكشف عن سطح المطار (ASDE). هي رادارات لمراقبة أهداف منفصلة. ويستخدم النطاق 300 9-500 9 MHz عدد كبير من رادارات الملاحة الراديوية البحرية التي توجد الغالبية العظمى منها على متن سفن، وبواسطة رادارات محمولة جواً لتفادي الطقس. والأنظمة البحرية هي رادارات لأهداف منفصلة في حين أن الأنظمة المحمولة جواً هي رادارات موزعة الأهداف.

وتعمل خدمة التحديد الراديوي للموقع على أساس توزيع ثانوي في النطاقين 000 9-200 9 MHz و300 9-500 9 MHz. وتتميز رادارات التحديد الراديوي لمواقع الطقس المتاحة على سطح الأرض والعاملة في النطاق 300 9-500 9 MHz عن سائر رادارات تحديد الموقع (الرقم 475.5 من لوائح الراديو (RR)). وتعمل رادارات التحديد الراديوي للموقع أيضاً في النطاقين 500 9-800 9 MHz و800 9 MHz-10,5 GHz على أساس توزيع أولي.

وتعمل الرادارات ذات الفتحة التركيبية المحمولة في الفضاء (SARs) في الخدمة EES/SR (النشيطة) حالياً في النطاق 9,8-9,5 GHz على أساس توزيع أولي مشترك. وينبع الاقتراح الذي يدعو إلى تمديد ذلك التوزيع بمقدار 200 MHz من رغبة في تحسين استبانة مدى SARs.

3 أنواع تأثيرات التداخل المحتمل

ينقسم أبرز نوعين من انحطاط الأداء الذي يمكن أن تسببه رادارات التحديد الراديوي للموقع أو EES/SR (النشيطة) لرادارات مراقبة الأهداف المنفصلة مثل PARs أو ASDEs، أو رادارات الملاحة الراديوية البحرية إلى فئتين:

- عمليات الكشف عن هدف مفقود؛
- توليد عمليات كشف خاطئة للهدف أو "إنذارات خاطئة" وعمليات تتبع خاطئة للهدف.

ويمكن النظر إلى هذين التأثيرين على أنهما يمثلان نقصاً في احتمال الكشف وزيادة في احتمال الإنذارات الخاطئة، على التوالي.

ورغم أن رادارات التحديد الراديوي للموقع أو EES/SR (النشيطة) يمكن من الناحية النظرية أن تسبب قدراً من عدم الحساسية (عمليات الكشف عن هدف مفقود، إلخ)، فإن هذا التأثير يتوقع أن يكون طفيفاً، كما أثبتت ذلك عملياً العديد من برامج القياس، ومن ثم سوف يتركز الاهتمام على توليد الأهداف الخاطئة.

وتسبب الإشارات النبضية التي تصدرها الرادارات الأخرى احتمال توليد عمليات كشف أهداف خاطئة حتى عندما يتم توفير "معدل ثابت للإنذارات الخاطئة" (CFAR) في الرادار الأرضي. ومع ذلك، فإن الجزء المتبقي من هذا التقرير يبين أنه يمكن تجنب هذه التأثيرات إلى حد كبير عن طريق التصميم الجيد. كما أن رادارات الهدف المنفصل، بما فيها الرادارات المكرسة لتتبع الهدف، تتعرض لتفاقم في أخطاء تقدير الموقع وأخطاء تصنيف الهدف نتيجة لإشارات غير مرغوب فيها. غير أن الأرجح أن هذه التأثيرات تنجم عن تداخل مستمر يشبه الضجيج وليس عن تداخل نبضي من رادارات أخرى.

ويتألف انحطاط الأداء الذي تحدثه رادارات التحديد الراديوي للموقع ورادارات EESS في رادارات الأهداف الموزعة من إنذارات خاطئة منفصلة (عنصر واحد من عناصر الصورة، مثلاً) (يشار إليها في أوساط مجتمع رادارات الطقس بتعبير عنصورة (speckle)) والتسبب في عدم دقة في القياسات الناتجة عن ظواهر الطقس. وتعبر أوساط علم الفضاء عن أي نوع من التداخل يحدث في رادارات التصوير ذات الفتحة التركيبية كزيادة في تغير قدرة خرج المعالج في أي عنصر من عناصر الصورة[1].

[1] مشروع مراجعة للتوصية ITU-R RS.1166 – معايير الأداء والتداخل في نبائط الاستشعار النشطة المحمولة في الفضاء.

وتخالف هذه التأثيرات تأثير التداخل المستمر الذي يشبه الضوضاء على رادارات الهدف المنفصل التي تتحكم بصورة فعالة في معدل الإنذارات الخاطئة بها. وفي تلك الحالة، ينحو احتمال الإنذارات الخاطئة إلى أن يظل دون تغيير، ولكن منحنى احتمال الكشف كدالة لمدى الهدف أو المقطع العرضي للرادار (RCS) يعاني بصورة لا يمكن تجنبها تحولاً إلى المدى الأقصر أو المقطع العرضي الأكبر عندما تزداد قوة الإشارة غير المرغوب بها. وهذا النقص العام في الحساسية، الذي يؤثر في المقام الأول على الأهداف الصغيرة أو البعيدة أو الضعيفة الإضاءة نتيجة لظروف الانتشار المعاكسة من قبيل الانتشار المتعدد المسير أو التوجيه المعاكس. كما يؤدي هذا النقص إلى انحطاط وظائف أخرى من قبيل دقة التتبع. غير أن التداخل المستمر الشبيه بالضوضاء يقع خارج نطاق أغراض هذه الوثيقة.

4 خصائص تخفيف التداخل الموجودة في الرادارات عموماً

يمكن التخفيف من التداخل عن طريق اقتران القدرة الضعيف أو العابر، وحالات معينة من عدم خطية المستقبل، والكسب الذي يتغير مع الزمن، وتجهيز الإشارات، وإجراءات ما بعد التجهيز، وفصل الموجات الحاملة. ففي التفاعلات فيما بين الرادارات لا يكون الفصل في التردد ضرورياً دائماً للتشغيل المتوائم لأن ارتفاع درجة العزل في اقتران القدرة وفي الزمن إما أنه يحدث بصورة طبيعية أو يمكن تحقيقه عن طريق التصميم الجيد. ويحدث العزل عن طريق عدم تطابق الاستقطاب في بعض توليفات رادارات التحديد الراديوي للموقع والرادارات المحمولة في الفضاء والرادارات الملاحية، غير أنه لا يمكن الاعتماد عليه في الحالة العامة لأن الرادارات العاملة في خدمة موزعة معينة غالباً ما تستخدم استقطاباً أفقياً و/أو رأسياً و/أو دائرياً.

وتحدد الأجزاء التالية آليات معينة تسهم في عوامل التخفيف هذه. وينطبق الكثير منها على النبضات المقترنة من رادارات التحديد الراديوي للموقع أو الرادارات ذات أجهزة الاستشعار المحمولة في الفضاء بالرادارات البحرية، والرادارات المحمولة جواً، ورادارات مراقبة الحركة الجوية، بينما ينطبق بعضها أساساً على رادارات من فئة واحدة أو أخرى من تلك الفئات.

1.4 العزل في اقتران القدرة (تأثيرات التيسير بواسطة الهوائيات)

تنطوي التفاعلات بين رادارين من نوعين مختلفين بصورة تكاد تكون دائمة على عدم التزامنية بين مسح حزمتين من حزم الهوائيات. ويكون ذلك أمراً مكفولاً عملياً عندما يكون أحد الرادارين رادارا للتحديد الراديوي للموقع والآخر رادار للملاحة الراديوية، لأن الفروق بين مهمتيهما تسفر عن فروق في خصائص النظام المتعلقة بهما. ويزداد تعزيز المسح غير المتزامن في التفاعلات التي تشمل رادارات التحديد الراديوي للموقع "ذات ثلاثة أبعاد"؛ وتستعمل هذه الرادارات حزم استكشاف يجري مسحها في الاتجاه الرأسي وفي اتجاه مروحي، بينما تكون الرادارات الملاحية السطحية (للملاحة ومراقبة الحركة الجوية ذات بُعدين أي أنها تجري المسح في الاتجاه المروحي فقط. وهناك 8 رادارات من بين 14 رادارا للتحديد الراديوي للموقع وصفت في مشروع التوصية الجديدة ITU-R M.[8B.8-10 GHz] تستعمل حزم استكشاف تمسح في اتجاه الارتفاع والاتجاه المروحي. وعلى ذلك، فإن حزم الاستكشاف لهذه الرادارات المخصصة للتحديد الراديوي للمواقع تقضي عادة جزءاً كبيراً من الوقت تبحث في مناطق إما فوق الأفق حيث لا يمكن لها أن تقترن بقوة مع رادارات الملاحة الراديوية السطحية أو، في حالة الرادارات المحمولة جواً بزوايا انخفاض مختلفة، بحيث لا تضيء رادارا ملاحياً سطحياً معنياً ورادارا ملاحياً معنياً محمولاً جواً إلا بين حين وآخر. وأقوى رادارات التحديد الراديوي للموقع هي الرادارات السطحية التي لها نقاط عدم إشعاع تقع على الأفق، ومن ثم، فإنه اقترانها برادارات الملاحة الراديوية السطحية يكون ضعيفاً. وعلاوة على ذلك، فإن رادارات التحديد الراديوي للموقع غالباً ما تستعمل توجيهاً إلكترونياً وتجري المسح بأنماط يتعمد أن تكون عشوائية ظاهرياً أو بأنماط شبه عشوائية لأنها تتكيف مع بيئة الهدف. وفي هذه الحالات، تعاود الحزمة الرئيسية لرادار التحديد الراديوي للموقع زيارة اتجاه الرادار الملاحي على فترات غير منتظمة فقط بدلاً من أن يعاود زيارته بانتظام. وهذا يجعل من غير المحتمل أن تفسر رادارات الملاحة الراديوية الأهداف المنفصلة الإشارات الرادارية الناجمة عن التداخل بين حزمة رئيسية وحزمة رئيسية على أنها هدف صحيح. وعلى أي حال، فإن ضيق الحزم الرئيسية لجميع الرادارات يجعل الكسر من الوقت الذي تسود فيه حالات تقارن بين حزمة رئيسية وحزمة رئيسية أخرى ضئيلاً للغاية. وعلى ذلك، تقتصر الحالات التي تثير القلق عادة على ما يلي:

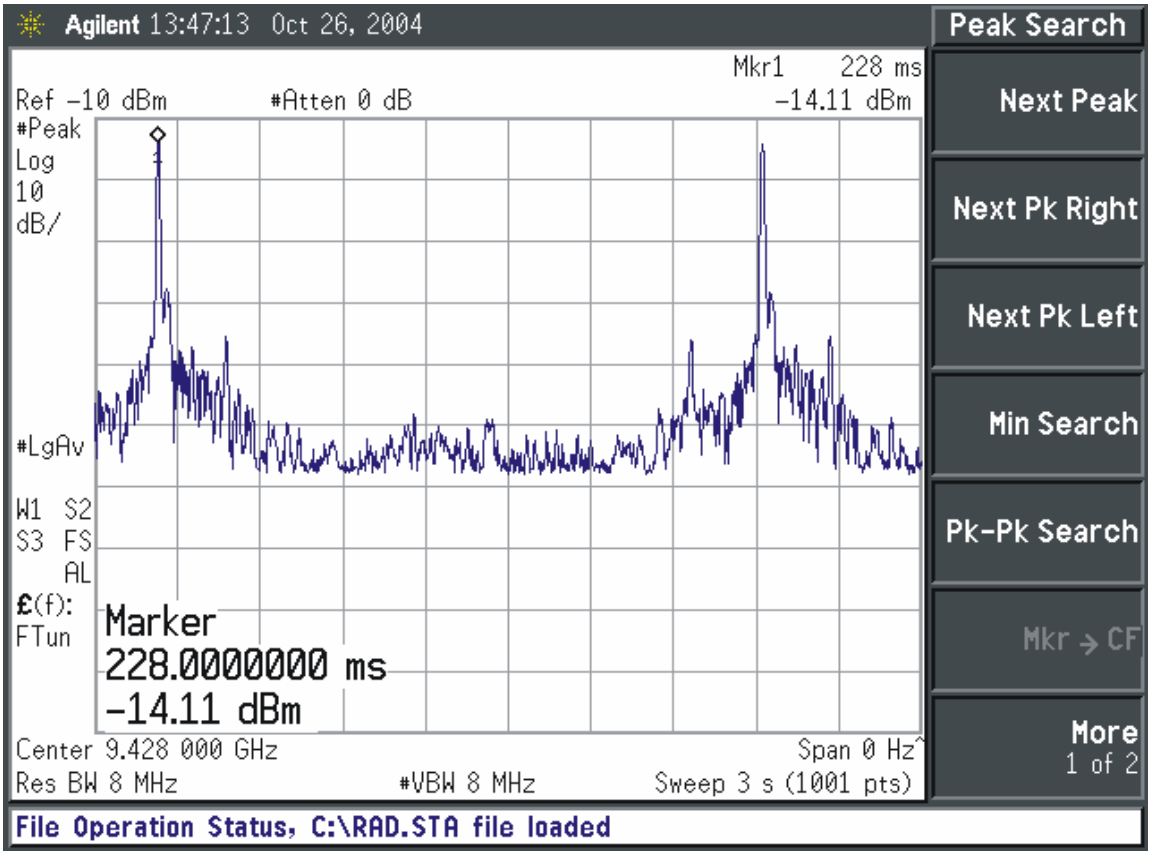
- الفصوص الجانبية لرادار للتحديد الراديوي للموقع إلى فصوص جانبية لرادار للملاحة الراديوية؛
- الحزمة الرئيسية لرادار للتحديد الراديوي للموقع إلى الفصوص الجانبية لرادار للملاحة الراديوية؛
- الفصوص الجانبية لرادار للتحديد الراديوي للموقع إلى الحزمة الرئيسية لرادار للملاحة.

1.1.4 اقتران فص جانبي بفص جانبي آخر

الجزء الأعظم من الفصوص الجانبية لكل من رادارات التحديد الراديوي للموقع والملاحة الراديوية يكون ذا كسب يقل بمقدار 30 dB على الأقل عن كسب الحزمة الرئيسية. والواقع أن المستويات الوسطية للفص الجانبي لهذه الهوائيات العالية الكسب تميل إلى أن تكون في حدود –10 dBi، حيث تكون قيمة عوامل كبت القيمة الوسطية للفص الجانبي عادة في حدود 40 dB. وتستعمل رادارات الملاحة البحرية التي تعمل في حدود 10 GHz عادة صفيفاً من الهوائيات بدليل موجات ذي فتحات. ومن ثم، يكون لها قدرة جيدة نسبياً على كبت الفص الجانبي. وإضافة إلى ذلك، فإن لها حزماً ضيقة نسبياً في مستوي السمت. ويقدم الشكل 1 مثالاً لمخطط الهوائي في مستوي السمت مقيساً برادار للملاحة البحرية التجارية يعمل في النطاق 9,5-9,3 GHz. وكما يتضح من الشكل، فإن أقوى فص جانبي مكبوت بمقدار 25 dB. كما أن المستوى الوسطي للفص الجانبي أضعف من كسب الحزمة الرئيسية بمقدار 47 dB على الأقل.

الشكل 1

نمط كسب الهوائي في مستوي السمت لرادار ملاحة بحرية يعمل في النطاق 10 GHz



Rap 2076-01

ولا ينعكس هذا النوع من الأداء في معظم قيم كسب الفص الجانبي المنشورة، بما في ذلك القيم الواردة في مشروع التوصية الجديدة ITU-R M.[8B.8-10 GHz]، لأن المواصفات والمعايير لا تذكر عادة إلا أعلى مستويات الفصوص الجانبية القريبة.

غير أن ذلك أمر سهل الفهم. ونظراً لأن أي هوائي يمكن أن يركز الطاقة فقط ولا يضخمها، فإن أي كسب في حزمته الرئيسية لا يمكن أن يتحقق إلا بخفض الكسب الموجَّه في معظم النواحي الأخرى إلى ما دون كسب الحزمة الرئيسية (sr)4π، وهي قيمة تساوي بالضرورة 0 dBi. والقيم المبينة لكسب الحزمة الرئيسية هي كسب في القدرة، يمثل خسارة أومية؛ وبعبارة أخرى تشتيت للطاقة التي لا يشعها الهوائي. ولذا فإن قيمتها تقل عادة عدة وحدات dB عن الكسب الموجَّه المصاحب لها. ويقل كسب القدرة لمخطط الهوائي بكامله على مجموع (sr)4π من الزاوية عن قيمة الكسب الموجه المناظر بنفس العامل، ولذا فإن متوسط كسب القدرة في منطقة الفص الجانبي لا يمكن أن يزيد عن –3 dBi. ويركز التصميم الجيد بدرجة كبيرة على الطاقة المشَعَّة في منطقة الحزمة الرئيسية وزيادة كبت معظم الفصوص الجانبية. وعلى ذلك، فإن معظم عمليات اقتران فص جانبي بفص جانبي تكون عادة أضعف بمقدار 66 إلى 80 dB عن اقتران حزمة رئيسية بحزمة رئيسية.

ولذا، وباستثناء الحالات التي تكون فيها مسافة الفاصلة قصيرة جداً، فإن نبضات اقتران فص جانبي بفص جانبي تكون عادة أضعف من أن تسبب إنذاراً خاطئاً.

ويحدث فعلاً أن تركز الهوائيات ذات الفتحات المستطيلة وشبه المستطيلة كسب فصوصها الجانبية على هيئة ضلوع تقع في مستويات تحتوي على محاور طولية وعرضية للفتحة، ويمكن أن يزيد فيها متوسط كسب الفصوص الجانبية عن –10 dBi، غير أنه يحدث كبت في هذه الحالات للفصوص الجانبية في جميع المستويات الأخرى إلى قيم يقل متوسطها عن –10 dBi. وإضافة إلى ذلك، فإن أي إنذارات خاطئة تنشأ عن اقتران فص جانبي بفص جانبي سوف تنتشر عشوائياً على مدى عريض من القيم السمتية، ومن ثم فإنها تنحو إلى أن تظهر كأهداف.

2.1.4 اقتران حزمة رئيسية بفص جانبي

إلى جانب المرسلات المستجيبة للمنارات ذات القدرة المنخفضة، فإن رادارات التحديد الراديوي للموقع في هذه النطاقات، الموصوفة في مشروع أولي لتوصية جديدة [ITU-R M.[8B.8-10 GHz، يتراوح كسب هوائياتها عادة بين 28 و42 dBi، بينما يصل كسب هوائي رادارات الطقس إلى 46 dBi. ويكون للرادارات الأولية عرض نطاق سمتي ضيِّق، يتراوح بين 1,5° و5,75° عند انخفاض 3 dB؛ في حين أن حزم رادارات الطقس ضيِّقة تصل إلى 0,9°. وإذا كانت تغطيتها السمتية منتظمة على مدى 360°، كما هو الحال عادة، فإن حزمها الرئيسية ستضيء الرادارات الأخرى بتواتر لا يزيد غالباً عن 0,42% = 100 * 1,5/360 إلى 1,6% = 100 * 5,75/360 وقد ينخفض إلى 0,25% = 100 * 0,9/360 بالنسبة إلى رادارات الطقس، كما أن الرادارات الكثيرة الأخرى التي تقوم بالمسح في الاتجاه الرأسي سوف تضيئها عن طريق الحزم الرئيسية لرادار التحديد الراديوي للموقع بتواتر يقل كثيراً عن ذلك. وانخفاض قيم هذه النسب المئوية في حد ذاته لا يضمن تحقيق التوافق ولكنه مهم لعدة أسباب:

- تحدث إضاءات بين حين وآخر على فترات تختلف باختلاف فترة المسح في رادارات الملاحة الراديوية؛
- يكون التداخل شبيهاً بالنبض وغير متزامن؛
- ينحو أي تأثير تداخلي إلى أن يتخذ شكل إنذارات خاطئة.

ومن ثم فإن الإنذارات الخاطئة، بما فيها ومضات الطقس الظاهرية، والتي تنشأ عن طريق الحزمة الرئيسية للحزمة الدوارة في رادار التحديد الراديوي للموقع تؤدي عادة إلى التخفيف عن طريق السمت الظاهري لرادار الملاحة الراديوية، ليقع عادة على نقاط حلزونية على وسيلة عرض لمؤشر موضع المسطح (PPI). وما لم تكن هذه النقاط كثيفة للغاية، فإنه يمكن إهمالها بالنظر أو في خوارزميات معالجة التتبع في أثناء المسح. وغالباً ما تقوم رادارات التحديد الراديوي للموقع المزودة بوسيلة إدارة إلكترونية للحزمة بمسح شبه عشوائي لأنها لا تواجه قيوداً في المسح بمعدل زاوي منتظم. وعندما يحدث مثل هذا المسح غير المنتظم في نفس المستوى الذي يتم فيه مسح رادار الملاحة الراديوية (الذي يكون منتظماً عادة)، فإن الإنذارات الخاطئة، التي قد تنشأ عن طريق الحزمة الرئيسية للتحديد الراديوي للموقع، سوف تنتشر عشوائياً فوق قطاع سمتي عريض لرادار الملاحة الراديوية، ومن ثم فإنه لا يتسبب في تكوين آثار لأهداف خاطئة.

3.1.4 حجب الفص الجانبي

حجب الفص الجانبي هو سمة اختيارية تُدمج أحياناً في الرادارات [Skolnik, 1990; Maisel, 1968]. ويدعم ذلك الترتيب الهوائي العالي الكسب المميز للرادارات ذات الهوائي المساعد المنخفض الكسب والذي يغذي مستقبِلاً منفصلاً له نفس قيمة كسب المستقبِل الرئيسي. ويتم توفير مضخمات لوغاريتمية في القناتين كلتيهما بحيث يتيسر تعيين نسبة قدرة الإشارة في القناتين بواسطة شبكة طرح. والهدف من هذه الحواجب هو منع كشف النبضات العائدة ونبضات التداخل لأي هدف قوي أو معالجتها بأي شكل آخر، عن طريق الفصوص الجانبية لهوائي الرادار. ويتحقق ذلك باستخدام نسبة ملائمة لكسب الهوائي المساعد إلى كسب الهوائي الرئيسي وقيم ملائمة لعتبة الحجب لنسبة الإشارات التي يستقبلها الهوائيان. ولا يمكن لهذه التقنية توفير حماية من التداخل المستمر وذلك لأنه إذا كان هذا التداخل قوياً بالقدر الكافي لحجب المستقبِل فإنه سيفعل ذلك معظم الوقت وسيؤدي إلى تدهور كبير في فعالية النظام. ولا تتراكم قيمة حجب الفص الجانبي لكبت التداخل إلى على التداخل الذي تكون نسبة تشغيله منخفضة. وإذا استخدمت هذه التقنية في الرادارات الملاحية، فإنها ستزيد من تقييد التفاعلات المهمة لتنحصر في التفاعلات التي يتم فيها استقبال التداخل عن طريق الحزمة الرئيسية للرادار الملاحي.

4.1.4 اقتران فص جانبي بحزمة رئيسية

لنفترض أن راداراً للتحديد الراديوي للموقع يؤثر على الطاقة غير المرغوبة في رادارات الملاحة الراديوية، فتنشأ إمكانية لتكوين إنذارات خاطئة. وأكثر الإنذارات الخاطئة إثارة للمشاكل هي تلك التي تكتشف عند نفس السمت والمدى في مسحات متعاقبة لحزمة هوائي رادار للملاحة الراديوية، لأنه يمكن عندئذ مضاهاتها، إما بالملاحظة اليدوية أو أوتوماتياً، لتظهر وكأنها هدف صحيح. وأحد الشروط اللازمة لحدوث ذلك هي أن الإنذارات الخاطئة يجب أن تحدث بصفة مستمرة عند توجيه الحزمة الرئيسية لرادار الملاحة الراديوية باتجاه معين، وهذا يركز الانتباه على حالة التقارن بين الفصوص الجانبية لرادار للتحديد الراديوي للموقع والحزمة الرئيسية لرادار الملاحة الراديوية. ويمكن أن يكون ذلك التقارن قوياً إلى حد كبير أحياناً، لأن رادارات الملاحة الراديوية في هذه النطاقات تكون ذات كسب مرتفع بدرجة متوسطة عادة. ويتعين أن تُحدِث رادارات الملاحة البحرية في هذا النطاق كبتاً لا يقل عن 20 dB للفص الجانبي خارج القطاع 10° المركز على الحزمة الرئيسية، التي توفر ما لا يقل عن 20 dB من كبت التداخل لنسبة 97% من الوقت في أي اتجاه (غالباً ما يكون الكبت الفعلي للفص الجانبي أفضل من ذلك بكثير كما هو موضح في الشكل 1). وهذه الندرة في حد ذاتها لن تمنع حدوث الإنذارات الخاطئة من المضاهاة لتظهر كأهداف، لأنها ستنحو إلى حصرها في قطاع ضيق واحد. غير أن النبض غير المتزامن سوف يجعل أي إنذار خاطئ يظهر في مديات عشوائية أساساً، وسوف يتغير في أغلب الأحيان تغيراً غير وحيد النغمة من مسح إلى آخر، مما يقلل من فرصة مضاهاته بخوارزمية تتبع أوتوماتية أو بالمراقبة البصرية.

2.4 التأثيرات الميسرة بالمعالج

داخل معالج الإشارة يمكن أن تتأثر الإشارات غير المرغوب فيها الآتية من الرادارات الأخرى بالعمليات التي تؤثر في حدود الإطار الزمني لفرادى النبضات (التي يطلق عليها "الوقت الخاطئ" في الأعمال المنشورة عن الرادار ذي الفتحة التركيبية المحمول في الفضاء) وبالعمليات التي تعمل في الإطار الزمني لنبضات عديدة (يطلق عليها "الوقت البطيء" في الأعمال المنشورة عن الرادار ذي الفتحة التركيبية المحمول في الفضاء). وأي رادارين من نوعين مختلفين، وخاصة إذا كانا يؤديان مهمتين مختلفتين مثل التحديد الراديوي للموقع والملاحة البحرية، يستعملان بصورة تكاد لا تتغير قط فترات تكرار نبضي مختلفة، وخاصة في لحظة معينة من الزمن. ويتيح هذا فرصاً لاستخدام تقنيات فعالة للتخفيف من التداخل من رادار إلى رادار. ولأن هذا الكبت ينتج عن عدم التزامن بين النبضات المتولدة عن الرادار المتضرر والنبضات المستَقْبَلَة من الرادار المسبب للتداخل، فإنه يكون بمثابة عزل في الزمن وليس عزلاً في المكان أو في التردد الراديوي. وتشمل هذه التقنيات طرائق معالجة عديدة سيرد وصفها أدناه.

1.2.4 العمليات الوحيدة النبضة

1.1.2.4 ثابت الزمن السريع

توفر العديد من رادارات الملاحة البحرية ثابت زمن سريع (FTC)، أو مفاضلة، وهي سمة تحد من التأثير الغامض لجلبة الأمطار. وتطبق تقنية FTC في الفيديو، أو في الدارات اللاحقة للكشف ولكنها تسبق "مضاهاة نبضة بنبضة" أو عمليات التكامل غير المتماسك. ونتيجة لذلك، فإنها يمكن أن تعزز فعالية تلك العمليات بتقييد النبضات غير المرغوب فيها إلى قيم العرض الضيقة ونسب التشغيل المنخفضة نظراً لتشغيلها بعمليات مقارنة نبضة بنبضة. ومن الممارسات المعتادة توفير شكل ما من أشكال FTC في رادارات الملاحة البحرية العاملة في حدود النطاق 10 GHz والرادارات العاملة في النطاق 2 GHz؛ وتسهل تقنية FTC، بالاقتران مع مضخمات/كاشفات IF اللوغاريتمية المستعملة في هذه الرادارات كبت جلبة البحر. كما أن لها تأثيراً حسناً يحدث صدفة وهو أنها تقصِّر أمد النبضات الطويلة التي قد تُستقبَل من الرادارات الأخرى. والواقع أن FTC ترتبط ارتباطاً وثيقاً بتقنية تمييز عرض النبضة، التي تُستخدم في بعض الرادارات لغرض صريح هو التغلب على التداخل النشط.

2.1.2.4 التأثيرات غير المتوالفة على نسبة التشغيل

بصورة مستقلة عن استعمال تقنية FTC، سوف تثير النبضات الطويلة من رادارات التحديد الراديوي للموقع التي تكون غير متوالفة مع رادارات التحديد الراديوي للموقع التي تكون غير متوالفة مع رادارات الملاحة الراديوية استجابات في قطاعات IF لرادارات الملاحة الراديوية التي تكون أضيق بكثير من النبضات التي تبثها رادارات التحديد الراديوي للموقع. وسوف تثير الانتقالات في بداية النبضة المرسلة ونهايتها استجابات تشبه الاستجابة النبضية لرادارات الملاحة الراديوية، بعرض يبلغ نحو 1 ms فقط أو أقل (بحسب أسلوب عرض نبضات رادار الملاحة الراديوية). وخلال فترات الوجود بين انتقالات النبض المرسل (الفترات الزمنية للارتفاع، وفترات السقوط، وبعض انتقالات النبضات الفرعية) ستكون مستويات الاستجابة منخفضة، ومقاربة لمستويات الاستجابة التي تثيرها موجات حاملة غير متوالفة وغير مشكّلة. وكما في حالة استعمال تقنية FTC، يمكن لهذا التأثير أن يخفض بدرجة كبيرة نسبة التشغيل الفعال للنبضات الغريبة ومن ثم يزيد بدرجة كبيرة من فعالية "مضاهاة نبضة بنبضة" (سيقدم وصف لها) في خفض احتمال الكشف عن أهداف خاطئة.

2.2.4 تقنيات التكامل المتعدد النبضات

بصورة عامة، تشمل هذه التقنيات "ما قبل الكشف" أو التكامل المتماسك و"ما بعد الكشف" أو التكامل غير المتماسك. ووفقاً للاستعمال المتبع في هذا السياق يشير تعبير "الكشف" فقط إلى العملية التي تستخلص غلاف شكل الموجة وتستبعد الموجة الحاملة لها، ولا يشير إلى عملية مقارنة مستوى إشارة بعتبة لتحديد ما إذا كان هدف ما موجوداً. ويستخدم التكامل المتماسك عادة لتنفيذ معالجة دوبلر ولزيادة الحساسية الشاملة للرادار إلى الحد الأقصى. وقد تستخدم رادارات الاقتراب الدقيق التكامل المتماسك. وخلافاً للتكامل المتماسك، لا يعمل التكامل غير المتماسك إلى على قوة النبضات المستَقْبَلة بعد استبعاد معلومات الطور الخاصة بها بواسطة "كاشف غلاف". وسواء أجرت الرادارات الملاحية أو لم تُجرِ تكاملاً متماسكاً، فإن معظمها يجري نوعاً ما من التكامل غير المتماسك. وتتوفر مجموعة من تقنيات تكامل لما بعد الكشف؛ وتوجد دراسة استقصائية عنها في دليل سكولنيك للرادار (Skolnik's Radar Handbook) [Trunk, 1990].

1.2.2.4 التكامل الخطي

فضلاً عن التمييز بين التكامل المتماسك وغير المتماسك، يوجد تمييز مهم بين التكامل الخطي وغير الخطي، أو تمييز محدَّد الكَمّ. ولم تستقبل أوزان التكامل الخطي قطارات نبض بواسطة عدد النبضات المستقبلة في مدى فردي/زاوية فردية أو خلية مدى/زاوية/دوبلر فحسب ولكن أيضاً بواسطة سعة كل نبضة. ولأن التكامل الخطي يحتفظ بوزن لسعة كل نبضة، فإن نبضة قوية تسهم إسهاماً تناسبياً أكبر في خرج ناتج التكامل مقارنة بما تسهم به نبضة ضعيفة، ولذا فهي تتيح لنبضات التداخل المعزولة إنتاج خرج قوي نسبياً عندما تكون قوية بالقدر الكافي. ومع ذلك، فإن وزن عدد النبضات في خلية مدى/زاوية/دوبلر تميز ضد التداخل النبضي غير المتزامن إلى درجة، تكون قيِّمة بصفة خاصة عندما تكون نبضات التداخل ضعيفة نسبياً.

1.1.2.2.4 الخصائص التخفيفية للتداخل المتعدد النبضات المميزة للرادارات ذات الفتحة التركيبية

إضافة إلى مزية كسب المعالجة التي تتراكم على فرادى النبضات، يحدث كسب إضافي في الرادارات ذات الفتحة التركيبية المحمولة في الفضاء SARs نتيجة تكامل الكثير من النبضات التي تكوِّن فتحات تركيبية. ويتم رفع قدرة الإشارة المرغوبة بمعامل يساوي مربع عدد النبضات، N، متكاملاً خلال زمن الفتحة التركيبية، والذي يكون عادة طويل جداً. واستجابة للتداخل النبضي غير المتزامن، مع ذلك، سيكون كسب المعالجة السمتية قريباً جداً من الوحدة.

وفي الأحوال العادية، لا يزيد الكسب الشامل لمعالجة (المدى والسمت) لنسب التشغيل المنخفضة للتداخل النبضي غير المتزامل عن عدد قليل من وحدات dB. وخلافاً لذلك، فإن الضوضاء المستمرة (أو التداخل الذي يشبه الضوضاء) سيشهد كسباً سمتياً يساوي N.

2.2.2.4 استبعاد التداخلات النبضية غير المتزامنة عن طريق التكامل الثنائي

خلافاً للتكامل الخطي، فإن التكامل الثنائي (غير الخطي)، الذي يناقَش أيضاً في التوصية ITU-R M.1372، يستبعد كميات مختلفة من المعلومات المتعلقة بسعة النبضة؛ وفي حالات متطرفة، تُعطِي كل نبضة وزناً متساوياً. ومن ثم فإن التكامل الخطي ينحو إلى التسوية بين أوزان فرادى النبضات الصحيحة العائدة من الهدف ونبضات التداخل القوية، ولذلك فهو يميز ضد نبضات التداخل غير المتزامنة المعزولة حتى لو كانت قوية جداً. والتكامل المتماسك يكون عادة خطياً، أما التكامل غير المتماسك فقد يكون إما خطياً أو غير خطّي.

"والتكامل الثنائي"، أو "الكشف التتابعي"، أو "الكشف الثنائي العتبة" هو عملية غير متماسكة وغير خطية. وفي هذه الحالة، يشير تعبير "الكشف" إلى خرج عتبة متخذة أساساً للمقارنة تكون هي ذاتها أدنى المجرى من "مكشاف الغلاف". ويجمع الكشف التتابعي بين خرج العتبة المتخذة أساساً للمقارنة أو "عمليات الكشف الأولي" في كل خلية مدى/زاوية أثناء عمليات المقارنة التكرارية لفترات فرادى النبضات (PRIs) أو "الكنسات". وغالباً ما يشار إلى هذه العمليات إما كمكامِلات أو مُقارِنات، مع أنها قلما تعمل كمكامِلات أو مقارِنات حقيقية بالمعنى الدقيق لعلم الرياضيات. وفرادى عمليات الكشف قد تكون محدودة أو ذاك كَمّ يقتصر على كميات ثنائية بسيطة (صفر أو واحد). وتحقق التصميمات المختلفة توازنات مختلفة فيما بين الكشف عن الهدف أو حساسية التتبع، ودقة التقدير السمتي للهدف ("التمركز") وكبت عمليات الكشف التي تثيرها النبضات غير المتزامنة. وفي بعض الحالات، يتوفر للمشغل قدر من الحرية في ضبط عملية الموازنة عن طريق ضبط ترتيبات التشغيل. ويرد تلخيص لخصائص استبعاد النبضات غير المتزامنة لهذه العمليات في التوصية ITU-R M.1372.

وتتسم المكامِلات/الكواشف ذات العتبة المزدوجة من النوع الثنائي بأهمية خاصة لأنها قوية بشكل خاص في التمييز ضد إعلانات الهدف الناتجة عن النبضات غير المتزامنة. ويمكن تقسيم المكامِلات/الكواشف ذات العتبة المزدوجة الثنائية إلى نوعين:

- نافذة متحركة، M من N؛
- العد التنازلي بقواعد تعسفية للعد. ويسمى هذا أحياناً المُراكِم، أو المُكامِل الثنائي، أو المُكامِل الأُسِّي.

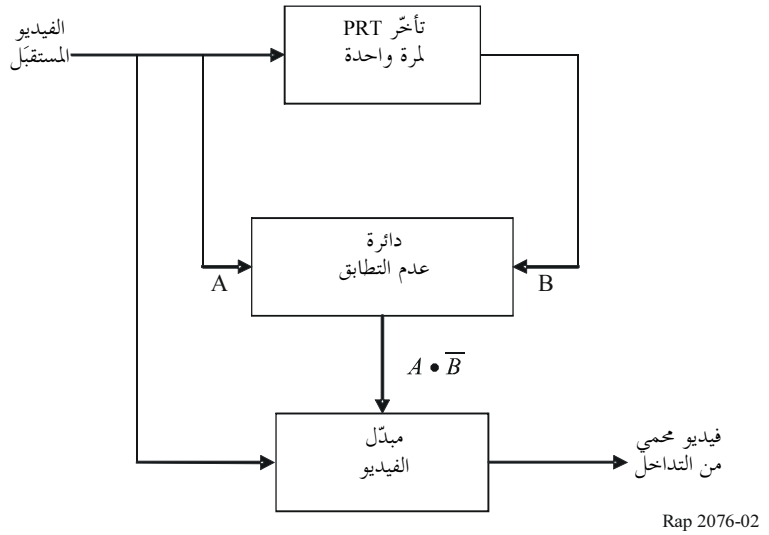
ويشار إلى هاتين التقنيتين كلتيهما باسم عمليتي ماركوف. ويجري تناولهما في التوصية ITU-R M.1372.

3.2.4 تقنيات إزالة وإحلال النبضات غير المتزامنة

تم التعرف على إمكانية التخلص من النبضات غير المتزامنة المعزولة منذ عقود كثيرة، سابقة على ظهور معالجة الإشارات الرقمية. والصور الأولى (وكذلك الصور المبسطة المستخدمة اليوم) تعمل فقط على أساس السعة، دون استعمال معلومات تتعلق بالطور. وأبسط صورة هي أساساً مكامِل ثنائي 2 من 2، على النحو المبين في الشكل 2. وتكون مثل هذه الدارات فعالة في الفيديو "العادي" أي في عدم وجود أجهزة انتقاء MTI.

الشكل 2

مزيل النبضات غير المتزامنة في الفيديو البسيط



وحتى عند إجراء معالجة MTI، تنشأ مشكلة لأن كل نبضة غير متزامنة معزولة تولِّد عدة نبضات متزامنة، مع تولد المزيد من النبضات المتزامنة عندما تستخدم ملغيات تكرارية أو ذات تغذية مرتدة مقارنة بما يتولد عن استخدام ملغيات ذات تغذية أمامية فقط. وحتى في غياب دلالة الوسط المتحرك (MTI)، فإن مُكاملات التغذية المرتدة يمكن أن تتسبب في حدوث المشكلة ذاتها. وثمة علاجان يطرحان نفسيهما طبيعياً:

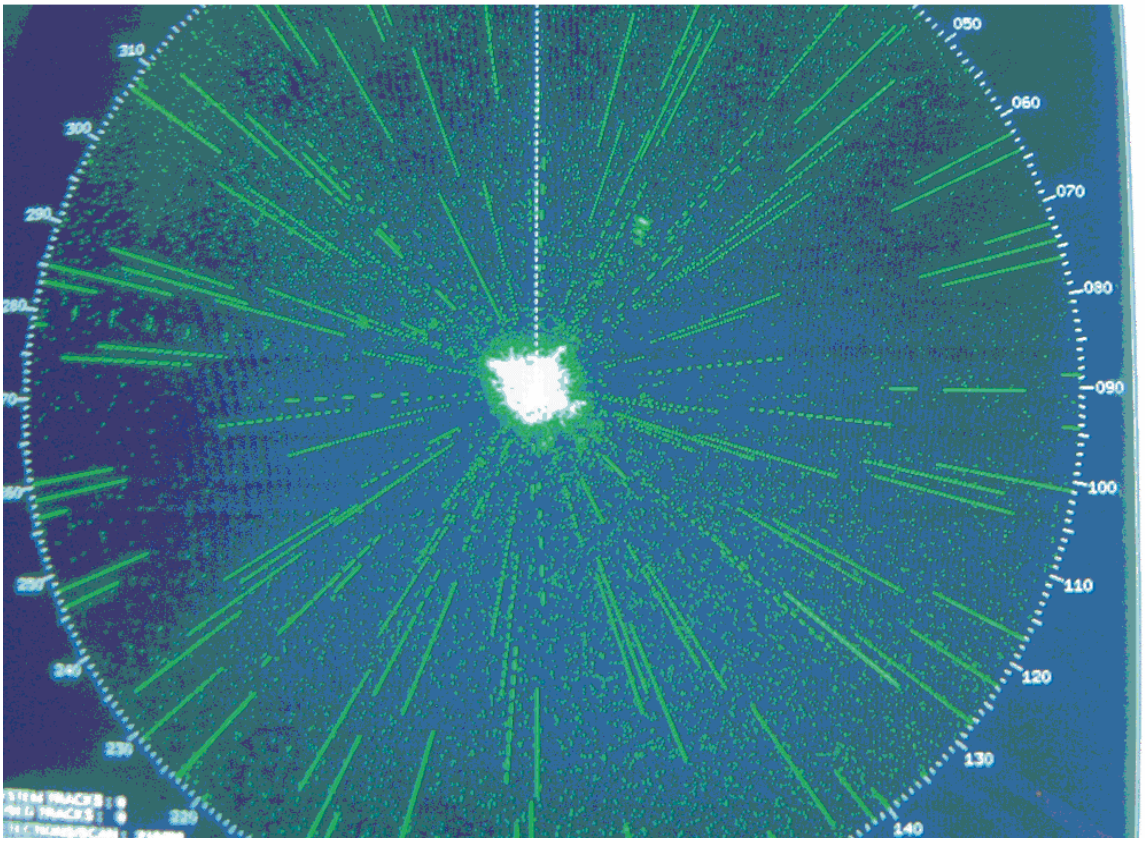
- إزالة النبضات غير المتزامنة قبل وصول الإشارة إلى ملغي MTI.
- استخدام تغذية أمامية فقط، أو ملغيات ومكاملات الاستجابة المحدودة للنبضات.

ومع أوجه التقدم التي تحققت في قدرات معالجة الإشارات الرقمية، أصبح من الممكن أن تتعرف الرادارات على عينات من نبضات منفردة كتداخل، اعتماداً على عدم اتساقها، سواء من حيث القوة (أي القدرة) أو زيادة الطور، مع عينات النبضات المستقبَلة التي تسبقها و/أو تأتي بعدها. ويمكن أن يتم ذلك قبل المعالجة المتماسكة مثل ترشيح دوبلر أو المقارنة الذاتية. وتستخدم هذه العمليات نافذة متزلقة من العينات المتتابعة في نفس نصف المدى الزمني ولكن من PRIs مختلفة لتوفير تقريب لما ينبغي أن تكون عليه قيمة العينة في PRI قيد الاختبار. وقد تغطي هذه النافذة ما بين 8 و16 PRIs أو نحو ذلك وقد تغذي زوجاً واحداً فقط من PRIs، مع تحسن دقة تقدير الإشارة العائدة الصحيحة كلما ازداد طول نوافذ الخلفية الطبيعية. وتقارن هذه العمليات بين القوة أو مربع القوة ($I^2 + Q^2$)، أو القيم الفردية I وQ للعينة، بالنسبة إلى PRI قيد الاختبار (PRI "الراهنة") بنظيراتها في نافذة الخلفية. ومن ثم، فإنها يمكن أن تعمل إما على الأشكال السابقة على الكشف (المتماسكة) أو اللاحقة للكشف (غير المتماسكة) للنبضات المستقبَلة. وعندما تكون الفروق كبيرة بالقدر الكافي، يستعاض عن القيمة الراهنة للعينة بقيمة تُستنبط من قيم الخلفية الطبيعية. ونظراً لأن المعالجة تجري على عينات "الفيديو المتماسك" لكل من I وQ، فإنها تنطبق بغض النظر عن النطاق العامل. ويستخدم هذا النوع من التقنيات في بعض الرادارات في المجالين العسكري والمدني. ولما كانت هذه العمليات تتم بالضرورة قبل إجراء التكامل المتعدد النبضات، فإن التقديرات الناتجة من عتبات الخلفية الطبيعية، ومن العينة المختبرة، تكون عرضة لتغيرات في الضوضاء عندما تكون قريبة من عتبة إمكانية الكشف، فإن نبضات التداخل الشديدة الضعف تكون معرضة لأن تُفقد. ومن جهة أخرى، فإن كفاءة إزالة التداخل تتحسن تدريجياً مع زيادة نسبة التداخل إلى الضوضاء، وبالتالي تصبح إزالة التداخل القوي أمراً شبه محتم. وهذه الخاصية تجعل من هذه العمليات مكملات ممتازة لكبت التداخل غير المتزامن الضعيف الذي يسهم به التكامل الخطي للنبضات المتعددة من قبيل ترشيح دوبلر والتكامل (غير المتماسك) لما بعد الكشف.

ويحتوي رادار للملاحة البحرية يمكن أن يعمل في النطاق GHz 9,5-9,3 على عملية مماثلة للعملية الموصوفة أعلاه. فهو ينشئ لكل خلية مدى نافذة منـــزلقة تغذي 3 PRIs فقط. فإذا كانت إحدى النبضات في النافذة قوية على نحو غير متناسب بالنسبة إلى النبضتين الأخريين، يجري تعويض المتوسط المرجح للنبضتين الأخريين للنبضة الشاذة. ويستطيع مشغل الرادار أن يقوم بتشغيل أو عدم تشغيل عملية استبعاد التداخل. وقد شملت الاختبارات التي أجريت على ذلك الرادار تطبيق قطار نبضات بقيمة 10 ms بعامل تشغيل 1% بدون بوابة من أجل محاكاة تشكيل المسح للهوائي. ويبين الشكل 3 الصورة التي يظهر عليها مؤشر وضع الإمرار الانتقائي بمؤشر وضع النبضة (PPI) في الرادار عندما تكون سمة استبعاد التداخل في وضع عدم التشغيل. وتنتج كل نبضة تداخل خطاً شعاعياً يناظر عرض نبضة تداخل قدره 10 ms.

الشكل 3

التداخل النبضي على مؤشر موضع النبضة في رادار للملاحة البحرية
مع خاصية استبعاد التداخل في وضع عدم التشغيل

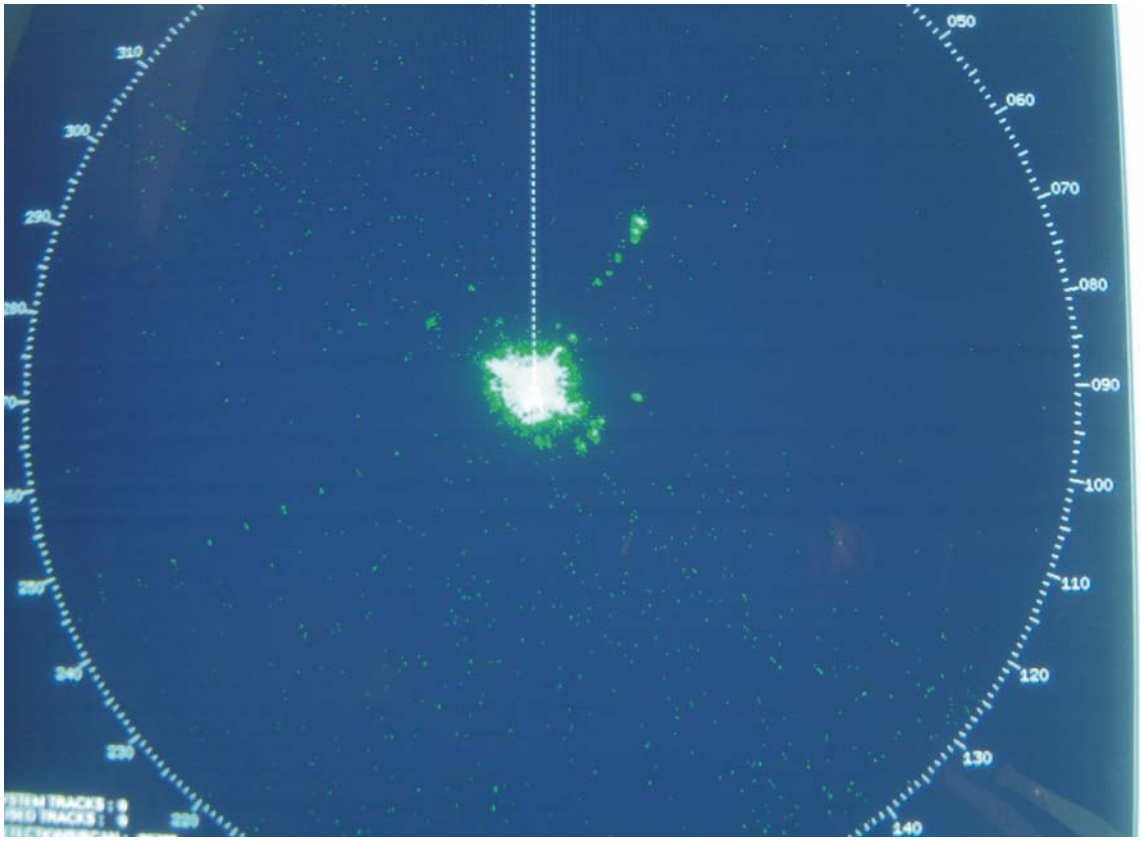


Rap 2076-03

ويبين الشكل 4 الهيئة التي ظهر عليها مؤشر وضع النبضة عندما كانت نبيطة استبعاد التداخل في وضع التشغيل، والومضات الوحيدة الظاهرة على مؤشر موضع النبضة عائدة من جلبة ثابتة بالقرب من موقع الاختبار مع إضافة خط يوضع عمداً لمحاكاة الموجات العائدة من الأهداف في الاتجاه 280° تقريباً.

الشكل 4

التداخل النبضي على مؤشر موضع النبضة لرادار للملاحة البحرية مع خاصية استبعاد التداخل في وضع التشغيل



Rap 2076-04

4.2.4 متطلبات وممارسات استبعاد النبضات غير المتزامنة

ينص قرار للمنظمة البحرية الدولية على ضرورة أن توفر رادارات الملاحة البحرية وسيلة لتحقيق خفض خافٍ في التداخل الناشئ من الرادارات الأخرى (فضلاً عن الصدى غير المرغوب فيه الآتي من الأشكال المختلفة من الجلبة) (الفرع 1.2.3.5 من قرار المنظمة البحرية الدولية (MSC.192(79)). وهذه التوصية مطابقة تماماً للتوصيات الواردة في معايير كل من رادارات الاتفاقية الدولية للحفاظ على الحياة البشرية في البحر (SOLAS) والرادارات الأخرى (IEC 60936 وIEC 62252). ورغم أن جميع العوامل المذكورة أعلاه تسهم في الحد من التداخل حتى وإن كان ذلك تأثيراً جانبياً، فإن رادارات الملاحة البحرية توفر عادة خاصيةً مخصصة حصراً لعلاج هذه المسألة. وتؤدي هذه الرادارات ما يُعرف في الدوائر المتخصصة باسم "مقارنة نبضة بنبضة"، أو "مقارنة كنسة بكنسة"، أو "مقارنة خط بخط"[2]. وتستخدم هذه الخاصية عادة نافذة منـــزلقة تغطي عدداً قدره N من تتابعات PRI أو "الكنسات" وتطبق على معيار N من M بالنسبة للكشف الثاني.

وهناك معالج للإشارات تعرضه للبيع أحدى الشركات الرائدة في الصناعة لاستخدامه في رادارات الطقس الأرضية والتي يمكن أن يعمل بعضها في النطاق 9,3-9,5 GHz، تحتوي على عملية سابقة على الكشف مشابهة للعملية اللاحقة للكشف تستخدم في رادارات الملاحة البحرية وهي تنشئ لكل خلية مدى نافذة منـــزلقة تغطي ثلاث قيم PRIs. وإذا توفرت شروط معينة

[2] في التوصية ITU-R M.1372، يشار إلى عملية النوافذ المنـــزلقة 2 من 2 بتعبير "مميز PRF".

تتعلق بقدرات النبضات الثلاث، يستعاض عن قيمة المُطوِّر لأحدث نبضة بقيمة النبضة السابقة لها مباشرة. ويمكن لمصمم الرادار أو مستعمله أن يختار من بين ظروف مختلفة لاستبدال النبضات، غير أن المبدأ الأساسي هو أن التداخل الذي يحدث في خلية مدى معيّن لمرة واحدة فقط في كل ثلاث PRIs يمكن الاستعاضة عنه بقيمة معقولة. ولأن العملية تغذي فقط ثلاث PRIs، فإنها يمكن أن تستعيض عن التداخل الذي له نسبة تشغيل تصل إلى $33^{1/3}$%، ولكن هذا لا يمكن أن يتحقق إلا عندما تسود علاقة خاصة جداً بين PRF لنبضات التداخل وبين الرادار المضيف. وكلما انخفضت النسبة الدورية للتداخل أصبحت علاقات تردد تكرار النبضات (PRF) مسبب التداخل/المتضرر من التداخل أقل تحديداً وأكثر رسوخاً.

كما أن من المرجح أن تحتوي رادارات تجنب الطقس المحمولة جواً على عمليات استبعاد النبضات غير المتزامنة. ويتضمن أحد معايير اللجنة التقنية الراديوية للملاحة الجوية (RTCA) شرطاً يقضي بأن تكبت هذه الرادارات التداخل من رادار إلى رادار، وينص هذا الشرط على أن: "الإرسال من رادار من نوع مطابق، يعمل على متن طائرة تحلق في مسير موازٍ لمهبط مجاور أو يتبع الطائرة المزودة إلى مسافة تصل قرباً إلى ميلين بحريين، لن يتسبب في صدور تحذيرات خاطئة، أو فقد عمليات كشف أو أي تداخل آخر يمكن مشاهدته"[3].

3.4 تأثيرات الكسب غير الخطي والمتغير الزمن

1.3.4 التحديد

يمكن إجراء التحديد عند نقاط مختلفة في المستقبِل/المعالج. ويمكن تنفيذه بوسائل مختلفة ويمكن أن يحدث إما عمداً أو دون تعمد. يحدث التحديد غير المتعمد إذا تم تشغيل مستقبِل RF و/أو دارة IF خارج مداهما الخطي. وفي الرادارات التي تستخدم معالجة الإشارة الرقمية تتضمن الدارة محول A/D.

وبغض النظر عن طبيعة تنفيذ التحديد، فإنه ينحو بوضوح إلى مساواة سعات النبضات غير المرغوب فيها أو النبضات العائدة الصحيحة عندما تكون إحداها أو كلتاهما قوية. ويعزز هذا من قدرة المعالجات الأخرى المشار إليها هنا على التمييز ضد النبضات غير المتزامنة التي قد تُستقبَل من رادارات تحديد الموقع.

وتُدرج أحياناً محددات في سلسلة المستقبِل/المعالج في محاولات لمنع عمليات الكشف عند حدوث جلبة قوية. وكانت هذه الممارسة شائعة في السابق عندما كانت أجهزة انتقاء مؤشرات الأهداف المتحركة (MTI) في عدم وجود عمليات CFAR فعالة بالقدر الكافي للقيمة المتوسطة للخلية ولا خرائط للجلبة، وكان القصد منها هو تمكين المشغِّل من ضبط المستوى الحدي اللازم لمنع جميع الإنذارات الخاطئة الناجمة عن الجلبة المتبقية كلها تقريباً. وينحو هذا الاستخدام للتحديد إلى التراجع مع زيادة توافر محولات A/D والمعالجات الرقمية ذات الدينامية العالية.

وكما أُوضِح أعلاه، فإن العمليات التي يتم فيها إبقاء السِّعات تنحو إلى زيادة حساسية الكشف إلى الحد الأقصى، ولكن العمليات التي تكون فيها السعات محدودة أو ذاك كَمّ معلوم تنحو إلى أن يحدث بها فقدان متفاوت للحساسية مع توفير تمييز قوي ضد النبضات غير المتزامنة. وعند توفر محدد يكون بوسع المستعمل أحياناً أن يغير عمليات المعاوضة للتحول من اتزان يسعى للوصول بالحساسية إلى الحد الأمثل إلى تزايد يركز على الحماية من الإنذارات الخاطئة التي تنجم عن التداخل عن طريق خفض المستوى الحدي، أي عن طريق زيادة التحديد. وهذا مهم بصفة خاصة عند استعمال مُكامِل التغذية المرتدة، إذ أن عمليات التغذية المرتدة تولِّد نبضات متزامنة من النبضات غير المتزامنة ومن ثم تنحو إلى أن تكون استجابتها للنبضات غير المتزامنة سيئة.

ويمثل التحديد القوي في عرض نطاق واسع (معالجة ديكي) قبل الترشيح إلى عرض نطاق أضيق بمرشاح مناسب تقنية استُخدمت في الماضي كصورة رخيصة من صور CFAR. كما أنها تفيد في توهين تأثير نبضات التداخل الضيقة وتُستخدم

[3] معايير الأداء التشغيلي الدنيا لرادار الطقس المحمول جواً مع قدرة تطلعية لقص الريح، الوثيقة رقم RTCA/DO-220، 21 سبتمبر، 1993، RTCA, Inc.

أحياناً كتقنية توفر تدبيراً إلكترونياً مضاداً للتدبير المضاد من أجل منع التوقف بسبب كنس ضوضاء FM القوية. ومع ذلك، فإن ذلك ينطوي على مخاطرة إذا لم يكن اختيارياً، لأنه يسمح لإشارات التداخل القوية والمتوسطة القوة، حتى لو كانت غير متوالفة مع الإشارة المرغوبة، بأن تسبب كبتاً للإشارات الصغيرة. ويمكن النظر إلى التكامل الثنائي، الذي نوقش في الفقرة 2.2.2.4 كشكل من أشكال التحديد، وإن كان ينفذ على مسافة بعيدة أدنى المجرى في المستقبِل/المعالج ومن ثم لا يتسبب في كبت الإشارات الصغيرة.

2.3.4 المضخمات اللوغاريتمية

منذ منتصف السبعينات من القرن الماضي، تستخدم جميع رادارات الملاحة البحرية تقريباً مضخمات لوغاريتمية. ويُحدث استخدام المضخمات اللوغاريتمية تأثيراً مماثلاً لتأثير التحديد القوي، وإن كان أقل اكتمالاً، في أنه يحد من تأثير سعة فرادى النبضات المرتفعة كأحد العناصر التي تسهم في انحطاط الأداء. ومن المؤكد أن هذه المضخمات تقلل من احتمال أن تؤدي نبضات التداخل القوية إلى تشبع المستقبِل. وعلاوة على ذلك، فإن هذه المضخمات تكون بالضرورة خطية أو شبه خطية عند مستويات الإشارة المنخفضة، ولكنها لكي تحقق أكبر قدر من الفعالية عندما تستخدم مشفوعة باقتران مع التيار المتردد (أو FTC؛ انظر الفقرة 1.1.2.4) لتخفيف جلبة البحر الناتجة، فإن الانتقال من الجزء الخطي إلى الجزء اللوغاريتمي يحدث عند 20 dB تقريباً تحت المستوى المتوسط للضوضاء [Croney, 1956].

3.3.4 المراقبة الزمنية للحساسية

المراقبة الزمنية للحساسية (STC) هي نوع من الكسب المتغير الزمن. وهي نوع من تقليل الحساسية المتعمد يختلف داخل كل PRI أو "كنسة". ولا يتم تقليل حساسية المستقبِل أو المعالج إلا في الأوقات المناظرة للموجات العائدة من الأهداف القصيرة المدى، لأن تلك الأهداف تنتج انعكاسات من القوة بحيث لا يحتاج الكشف عنها إلى الحساسية الكاملة للمستقبِل. والمراقبة الزمنية للحساسية في المديات التي تقل عن قيمة مختارة، هي عتبة الكشف لانعكاسات الرادار العائدة إلى بوابة الهوائي، تتغير بمعدل يعوض تقريباً العلاقة العكسية للأس الرابع بين قوة الانعكاس ومدى الهدف بالنسبة للمقطع العرض للرادار فيما يتعلق بهدف معين (في الواقع، تنتج بعض المستقبلات في الأحوال العادية قيم خرج تتناسب مع لوغاريتم سعة أو قدرة الإشارة المستقبَلة. وتعادل دارة المراقبة الزمنية للحساسية، التي تنفذ في مقطع الفيديو، الاستجابات التي لها دالة كسب مشتقة من انحطاط أُسِّي)، وتساعد المراقبة الزمنية للحساسية في كبت الموجات العائدة من الخلية والتي تكون عادة أقوى في حالة الجلبة القصيرة المدى والتي قد تتجاوز في غير ذلك من الأحوال قيمة المدى الدينامي الخطي للمستقبِل/المعالج. كما تنحو المراقبة الزمنية للحساسية غلى كبت عمليات الكشف نتيجة "للزوايا" (التي تنجم عادة عن الانعكاسات التي تسببها الطيور) في المدى القصير.

وبطبيعة الحال، تساعد المراقبة الزمنية للحساسية في الحد من عدد وسعة عمليات الكشف التي قد تثيرها النبضات التي تصدر عن رادارات التحديد الراديوي للموقع أيضاً إلى حد أن عمليات الكشف تبدو كأهداف خاطئة في المدى القصير. وفي الكثير من الحالات، تكون إزالة الأهداف الخاطئة في المدى القصير أكثر أهمية من إزالة الأهداف الخاطئة التي تظهر في المديات الأبعد، لأن الأهداف القصيرة المدى تحتاج عادة إلى إجراءات أسرع لتجنب الاصطدام مقارنة بالأهداف البعيدة المدى. وتستخدم رادارات الملاحة البحرية المراقبة الزمنية للحساسية، التي تنفذ في دارة فيديوية، كوسيلة لكبت جلبة البحر الناتجة. كما تستخدم رادارات مراقبة الحركة الجوية في هذا النطاق تقنية المراقبة الزمنية للحساسية.

4.4 معالجة CFAR

تحتاج رادارات مراقبة الأهداف المنفصلة آلية من نوع ما للمحافظة على معدل الكشف داخل حدود معقولة. ونظراً لأن معظم عمليات الكشف تنتج عادة عن ضوضاء و/أو جلبة، ومن ثم تمثل إنذارات خاطئة، فإنه يطلق على هذه الآلية اسم عمليات CFAR. وفي أبسط الأنظمة، يمكن أن يُتخذ هذا كوسيلة للتحكم اليدوي في الكسب أو في عتبة الكشف. غير أن هذا يتم عادة بصورة أوتوماتية. ويمكن أن يتم ذلك على أساس شامل إلى حد ما؛ بمعنى أنه يؤثر على قطاعات زاوية عريضة

وعلى كسر كبير من جميع المديات، أو أنه يمكن أن يتم بواسطة عتبات تتكيف محلياً. في الفئة الأولى، قد تشمل التقنيات التحكم الأوتوماتي في الكسب، الذي يؤخذ كقيمة متوسطة تشمل جميع أو معظم المديات، أسلوب ديكي، وSTC، و/أو مزيج من مضخم لوغاريتمي و/أو FTC أو مفاضلة النبضات. وتشمل الأشكال المحلية التكييف لثبات معدل الإنذار الكاذب CFAR إعداد خرائط الجلبة وبخاصة دارات العتبة والمتوسط المحلي. وخريطة الجلبة هي مصفوفة من مستويات إشارة، مأخوذة كمتوسط على مدى الكثير من مسحات الهوائي للكثير من خلايا المدى/السمت الصغيرة. وتوفر دارات المتوسط المحلي والعتبة، أو دارات المعدل الثابت للإنذارات الكاذبة (CFAR) لمتوسط الخلايا، عتبة للكشف تتكيف مع مستوى الجلبة (والتداخل) في المنطقة المجاورة مباشرة لكل خلية مدى/دوبلر/سمت يجري اختبارها للتعرف على وجود هدف. وتشتغل عمليات المعدل الثابت للإنذارات الكاذبة للمتوسط المحلي والعتبة ببناء نافذة تنـــزلق في مدى (لكل قناة دوبلر، في حالة رادارات دوبلر) خلال كل فترة من فترات تكرار النبضات. وتتراكب كل نافذة من هذه النوافذ على خلية المدى التي سيتخذ قرار الكشف بشأنها ويضاف إليها نحو 10 إلى 30 من خلايا المدى المجاورة (نصفها عادة في المدى القصير ونصفها الآخر في المدى الطويل). وفي الأحوال العادية تعين القيمة المتوسطة لسعة الإشارة في الخلايا المتجاورة وتضرب هذه القيمة المتوسطة في معامل، مثل 4 أو 8 مثلاً، لتحديد عتبة كشف محلية. ومع ذلك، تستخدم في أحيان كثيرة أشكال مغايرة عديدة من هذا التصميم الأساسي. وعلى سبيل المثال، فإن تعيين المتوسط للخلايا السابقة على الخلية التي يجري اختبارها قد يتم بصورة منفصلة عن الخلايا اللاحقة لها وقد تستخدم أعلى هاتين القيمتين المتوسطتين في تحديد العتبة.

وفي عمليات تعيين متوسط المعدل الثابت للإنذارات الكاذبة CFAR، تُستبعد عادة الخلايا الفردية من قيم تعيين المتوسط. وقد يجري ذلك لمنع المتبقي من الموجات العائدة من مشتتات الجلبة النقطية من رفع مستوى عتبة الكشف دونما ضرورة. ومع ذلك، فإنه يمنع أيضاً النبضات غير المتزامنة المعزولة من تلويث قيمة العتبة وإنتاج مستويات عتبة مرتفعة بصورة غير ملائمة. ولا يسهم هذا في خفض الأهداف الخاطئة التي تثيرها النبضات غير المرغوب فيها، ولكنه يخفف من أي اتجاه يسفر عن تقليل النبضات غير المرغوب فيها لحساسية الرادار المتأثر.

5.4 التأثيرات الميسرة بواسطة البرمجيات (ما بعد المعالجة)

يمكن أيضاً دراسة تجمع مدى/سمت عمليات الكشف عن الهدف بطريقة أوتوماتية في خوارزميات مختلفة للبت في ما إذا كانت مجموعة معينة من عمليات الكشف تمثل هدفاً صحيحاً أو لا تمثل هدفاً صحيحاً (وتميز هذه العمليات أيضاً ضد "الزوايا"، وهي في الغالب انعكاسات من الطيور).

أي معالجة "بالتتبع أثناء المسح"، تربط بين تقارير الهدف الآتية من مسوح متتابعة لحزم الهوائي، وتقدر مواضع الهدف وسرعات المتجهات، يكون لها أيضاً إمكانية استبعاد الأهداف الكاذبة. وهذه المعالجة اللاحقة توجد عادة في رادارات مراقبة الحركة الجوية. كما أن الكثير من رادارات الملاحة البحرية كون مزوداً بخاصية مقارنة مسحة بمسحة من أجل كبت جلبة البحر. وتنحو هذه الخاصية إلى أن تقترن باستعمال وسائل عرض شبكة المسح، التي تختلف عن وسائل العرض التقليدية ذات المسح الشعاعي. والمزية الأصلية لوسائل عرض شبكة المسح هي أنها أكثر نصوعاً بكثير من وسائل العرض الشعاعية لأن شاشاتها تكتب مرات عديدة، بدلاً من أن تكتب مرة واحدة، خلال كل مسحة للهوائي. ويتطلب تنفيذها ضرورة الاحتفاظ بالبيانات المتعلقة بعمليات الكشف عن الهدف من جميع خلايا المدى–السمت في مسحة كاملة واحدة على الأقل للهوائي في الذاكرة قبل عرضها. وقد ساعدت أوجه التقدم التي تحققت في دوائر الذاكرة الرقمية خلال السنوات الأخيرة في جعل وسائل عرض شبكات المسح عملية من الناحية الاقتصادية. وتسمح قدرات الذاكرة أيضاً بتخزين بيانات مسحات عديدة للموجات العائدة للرادار بالنسبة لجميع عمليات الكشف عن المسوح الفردية ومقارنة بيانات الكشف في كل خلية مدى–سمت على مسحة هوائي واحدة ببيانات الكشف في نفس خلية المدى–السمت في واحدة أو اثنتين من المسحات السابقة قبل عرضها. وإذا صنفت الموجات العائدة تصنيفاً ثنائياً (موجوداً أو غير موجود) أو بدلالة عدد قليل من المستويات، فإنه يمكن تطبيق قواعد لاشتقاق أي نصوع مناسب يتم عرضه في كل عنصر مدى–سمت من عناصر الصورة بحسب توليفة مستويات الموجات العائدة في المسحات المنفصلة. وسوف تزيد هذه الخاصية من تكثيف عناصر الصورة التي تظهر الموجات العائدة

الخاصة بها دائماً في مسحتين أو أكثر. وأهم من ذلك لأغراض التوافق بين رادارات التحديد الراديوي للموقع ورادارات الملاحة الراديوية، أنها ستؤدي إلى تقليل نصوع أو إعتام عناصر الصورة التي تظهر فيها موجة عائدة ظاهرية خلال مسحة واحدة ولكن ليس خلال المسحة التالية أو المسحتين التاليتين. وحتى في الرادارات الملاحية التي لا توجد بها هذه الخاصية يكون بوسع المشغل أن يستنبط ما إذا كانت الاستجابات المبينة على وسيلة العرض تمثل مدى لهدف صحيح أو لا، معتمداً في ذلك على الملاحظة البصرية لمدى ثبات وضاءة عناصر الصورة. وعند وصول تداخل من رادار آخر عن طريق اقتران الفص الجانبي بالحزمة الرئيسية، يمكن أن يحدث ذلك عمليات كشف بصورة متكررة في نفس الاتجاه. غير أن النبضات غير المتزامنة لرادارين سوف تميل إلى منع عمليات الكشف هذه من أنت تتكرر في نفس خلية المدى. ومن ثم فإن التجهيز المتعدد المسحات سوف ينحو إلى الحيلولة دون عرض عمليات الكشف.

6.4 التأثيرات الميسرة بالطيف

من بين الظواهر المتعلقة بالتردد، تمثل كل من انتقائية المستقبل وكبت الاستجابة الزائفة عاملين لاستبعاد التداخل من رادار إلى رادار بنفس الطريقة التي يؤثران بها في أي تفاعل تداخل آخر. ويمكن توقع أن تكبت انتقائية المستقبل المكونات الطيفية التي تكون خارجة بالقدر الكافي عن نطاق المرور للرادار المتضرر بما لا يقل عن 60 dB. ولا تتحقق الاستفادة الكاملة من كبت نطاق الوقف في رادارات الملاحة الراديوية إلا إذا كان هناك كبت مماثل للمكونات غير المرغوب فيها من طيف الإرسال لرادارات التحديد الراديوي للموقع والرادارات ذات المحاسيس المحمولة في الفضاء. وفي النطاقين 000 9-200 9 و300 9-500 9 MHz، تستخدم معظم رادارات التحديد الراديوي للموقع مرسلات من غير النبائط ذات الحقول المتقاطعة، ومن ثم تكون مكونات الضوضاء للانبعاثات غير المرغوب فيها منخفضة نسبياً.

وبالمثل، فإن جميع الرادارات ذات المحاسيس المحمولة في الفضاء المقترح تشغيلها جزئياً في النطاق 300 9-500 9 MHz أو النطاق 800 9-000 10 MHz ستستخدم أيضاً نبائط إرسال من غير المرسلات ذات الحقول المتقاطعة. وسوف يتزايد استخدام منحدرات انتقال الرقاقة ومنحدرات الارتفاع والانخفاض ومنحدرات انتقال الرقاقة، مع تشكيل زاوية السقوط العارض المصاحب بدلاً من ضوضاء النبيطة لتحديد مستويات الانبعاثات غير المرغوب فيها من رادارات التحديد الراديوي للموقع والرادارات ذات المحاسيس المحمولة في الفضاء. ويرد وصف للكفاءة الطيفية لعدد من نبائط خرج المرسل لرادارات عديدة في التوصية ITU-R M.1314 – الحد من الانبعاثات غير المرغوبة في أنظمة الرادار لعاملة فوق 400 MHz.

وإضافة إلى ذلك، ينحو التشكيل البيني لإشارتين إلى أن يصبح أقل أهمية بالنسبة إلى التفاعلات بين رادار ورادار منها بالنسبة إلى التداخل بين أنظمة الاتصالات، لأن إرسالات الرادارات يكون لها عادة نسب تشغيل ذات شكل موجي منخفض ومن النادر حدوث اقتران زمني بين نبضات من رادارين لأن من غير المحتمل أن يبث كل رادار نبضة تصل إلى نظام متأثر في نفس الوقت الذي تصل فيه نبضة من الرادار الآخر.

وتبث بعض رادارات التحديد الراديوي للموقع نبضات طويلة بنسب تشغيل منخفضة بالنسبة إلى نسب تشغيل أنظمة الاتصالات ولكنها مرتفعة بالنسبة إلى نسب تشغيل رادارات الملاحة الراديوية. ومع ذلك، فإن أطول النبضات تشكّل عادة بتردد كنسي، أو زقزقة الأشكال موجية من أجل دعم ضغط النبضة في مستقبل رادار التحديد الراديوي للموقع، وكنس التردد في هذه النبضات الطويلة يكون عادة أكثر اتساعاً من نطاقات التمرير لرادارات الملاحة الراديوية. وحتى ذا كان كنس التردد يغطي كامل نطاق التمرير لرادار الملاحة الراديوية، سوف يسود استبعاد كبير معتمد على التردد في الوقت الذي يتم فيه كنس التردد اللحظي عبر نقاط تحت نطاق التمرير وفوقه. وقد تم التحقق من هذا التأثير من خلال تجارب أُجريت على رادار للملاحة البحرية يعمل في النطاق 9,3-9,5 GHz، ويجري حالياً إبلاغ النتائج بصورة منفصلة. ويمكن النظر إلى هذا التخفيف للطاقة المتوالفة بطرائق مختلفة. ومن الواضح أن متوسط الكثافة الطيفية للقدرة يقل بانتشار التردد. ثمة طريقة أكثر فائدة للنظر إلى تأثر التخفيف، هي الاعتراف بأن عرض النبضة الفعال؛ أي بأن عرض النبضات التي تصدر عن قطاع IF في رادارات الملاحة الراديوية، يكون في أغلب الأحيان أصغر كثيراً عن عرض النبضة المرسلة من رادار التحديد الراديوي للموقع.

ويمكن كفالة هذا الخفض لعرض النبضة بالتصميم الجيد لرادارات التحديد الراديوي للموقع ورادارات EES/SR. وبهذه الطريقة، يترجم بتر التردد عن طريقه مستقبل أنظمة الملاحة الراديوية إلى بتر في الوقت. وإذا زاد معدل كنس التردد عن مربع قيمة IF لعرض نطاق التمرير، فإن عرض النبضة الفعلي (عند خرج مصمم IF) يثبت بواسطة فترة الاستجابة النبضية، غير أن سعة النبضة المستقبلة تتوهن بالنسبة إلى سعة النبضة التي يلتقطها هوائي الجهاز المتضرر. وفي تلك الحالة، تصبح قدرة الاستجابة القصوى متناسبة عكسياً مع معدل الكنس. وبطبيعة الحال يسهم هذا أيضاً في التخفيف.

ويستخدم تنوع التردد ورشاقة التردد في الكثير من الرادارات، وخاصة في رادارات الملاحة الراديوية الفضائية. ويقلل استخدام رشاقة التردد من خطر التداخل المستمر لانبعاثات صادرة من أحد الرادارات مع نطاق التمرير للقبول في رادار آخر.

5 الاستنتاجات

يجري تحسين التوافق المتبادل بين رادار للتحديد الراديوي للموقع ورادار للملاحة البحرية في المقام الأول عن طريق مسح حزم هوائياتها، بحيث يندر استقبال الطاقة غير المرغوب فيها عن طريق اقتران الحزمة الرئيسية بالفص الجانبي، بل إن حدوث هذا الاقتران يصبح أكثر ندرة عن طريق اقتران حزمة رئيسية بحزمة رئيسية أخرى.

أهم من ذلك، أن الفروق بين معدلات المسح لرادارات التحديد الراديوي للموقع ورادارات الملاحة الراديوية تحول دون تكرار حدوث تداخل عن طريق الحزمة الرئيسية للمصدر في نفس اتجاه الجهاز المتضرر، فتخفف من أي احتمال لخطر مقارنة مسحة بمسحة فيما بين ما قد يحدث من إنذارات خاطئة بحدوث تداخل. ويتحقق قدر كبير من التخفيف الإضافي بسبب اختلاف الأشكال الموجية لنوعي الرادارات وما يصاحب ذلك من استبعاد للنبضات غير المرغوب فيها عن طريق الترشيح بواسطة المستقبِل، ومعالجة الإشارة. وفي بعض الرادارات، تشمل الأخيرة معالجة متماسكة (قبل الكشف) ومعالجة غير متماسكة (بعد الكشف). وفي رادارات ملاحية أخرى، تكون المعالجة المتماسكة غائية إلى حد كبير أو غائية تماماً ولكن المعالجة غير المتماسكة قد تكون فعالة إلى حد كبير في تعزيز التوافق بين رادارات التحديد الراديوي للموقع ورادارات الملاحة الراديوية.

وقليل من هذه الآليات، إن وجد، ينطبق على التداخل من مرسلات الاتصالات المتصلة الموجات والتي لا تعمل بالمسح باستخدام أشكال موجية مشابهة للتصحيح في الرادارات من أي نوع.

المراجع

SKOLNIK, M.I. (Ed.) [1990] *Radar Handbook*, McGraw-Hill.

MAISEL, L. [March 1968] Performance of sidelobe blanking systems. *IEEE Trans. on Aerospace and Electron. Systems*, Vol. AES-4, **2**, p. 174-180.

TRUNK, G.V. [1990] *Automatic detection, tracking and sensor integration*, Chapter 8 in M.I/ Skolnik (Ed.) *Radar Handbook*, 2nd edition, McGraw-Hill.

CRONEY, J. [April 1956] Clutter on radar displays. *Wireless Engineer*, Vol. 33, p. 83-96.