

التوصية ITU-R M.1314-1\*

## تخفيض البث غير المطلوب لأنظمة الرادار

العاملة فوق 400 MHz

(المسألة 202/8 (ITU-R))

(1997-2005)

### مجال التطبيق

تقدم هذه التوصية معلومات عن عوامل التصميم المؤثرة على البث غير المطلوب لمرسلات الرادارات التي يجب أن تؤخذ في الاعتبار في تصميم الرادارات. وتوصي باستعمال بعض أنواع أجهزة خرج المرسل عندما يكون ذلك ممكناً عملياً لتقليل البث غير المطلوب إلى أدنى حد ممكن.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

- أ) أن الطيف الراديوي المتيسر للاستعمال في الاستدلال الراديوي محدود؛
- ب) أن خدمة الملاحة الراديوية هي خدمة للسلامة كما ينص على ذلك الرقم 10.4 من لوائح الراديو، وأنه بالإضافة إلى ذلك هناك أنماط أخرى من أنظمة الرادار مثل رادارات المناخ يمكنها أن تقوم بوظائف سلامة الحياة البشرية؛
- ج) أن عرض النطاق اللازم للبث من محطات الرادار في خدمة الاستدلال الراديوي كبير بحيث تتمكن هذه المحطات من أداء وظائفها بشكل فعال؛
- د) أن الأنظمة التكنولوجية الجديدة يمكن أن تستعمل تكنولوجيا رقمية أو تكنولوجيات أخرى تكون أكثر عرضة للتأثر بالتداخل من البث غير المطلوب للرادارات بسبب ارتفاع قدرة ذروات غلافها؛
- هـ) أن قطاع الاتصالات الراديوية (ITU-R) يدرس مسألة الاستعمال الفعال لأنظمة الرادار للطيف الراديوي؛
- و) أن البث غير المطلوب الصادر من أنظمة الرادار يمكن في بعض الحالات أن يتسبب في تداخلات في أنظمة خدمات راديوية أخرى تعمل في النطاقات المجاورة أو في نطاقات ذات علاقة توافقية؛
- ز) أن التذييل 3 من لوائح الراديو يحدد سويات القدرة القصوى المسموح بها للبث الهامشي أو الإرسالات في مجال البث الهامشي، وأن التوصية ITU-R SM.1514، تعين الحدود خارج النطاق لرادارات التحديد الراديوي للموقع؛

\* ينبغي أن ترفع هذه التوصية إلى عناية المنظمة البحرية الدولية (IMO) ومنظمة الطيران المدني الدولي (ICAO) واللجنة الدولي للراديو البحري (CIRM) والمنظمة العالمية للأرصاد الجوية (WOM) ولجنتي الدراسات 1 و9 التابعتين لقطاع الاتصالات الراديوية.

## توصي

- 1 باستعمال المعلومات المتعلقة بعوامل تصميم مرسلات الرادار المؤثرة على خصائص البث غير المطلوب للرادارات الواردة في الملحق 1 لتخفيض البث غير المطلوب.
- 2 باستعمال أفضل تكنولوجيا متيسرة لتجهيزات الخرج، بقدر ما يكون ذلك ممكناً عملياً، لتخفيض سويات البث الهامشي غير التوافقية؛
- 3 باستخدام مرشحي خرج رادارية، حينما يكون ذلك لازماً وممكناً، لتخفيض البث غير المطلوب للرادارات.

## الملحق 1

### تخفيض البث غير المطلوب في أنظمة الرادار

#### 1 مقدمة

لتحقيق أقصى فعالية في استعمال الطيف، يجب انتقاء مرسلات الرادار وتصميمها وتصنيعها بحيث ينقص طيف البث بأسرع ما يمكن نظراً للقيود على أداء الرادار وحجمه وتكلفته ووزنه وموثوقيته وقابليته للصيانة، إلخ. ويجدد معدل تنقيص حافة طيف البث (خصائص البث خارج النطاق) والسوية الدنيا للبث (البث الهامشي) بواسطة برمجية ومعمارية المرسل وبواسطة الموجة المرسل. وتجري مناقشة هذه التأثيرات فيما يلي.

#### 2 عوامل تصميم الرادار

تحدد وظيفة الرادار أو مهمته إلى حد بعيد تصميم الرادار. ومهام الرادارات عديدة ومتنوعة (مثل: الملاحاة والرصد الجوي وتحديد سرعة الريح والمراقبة والعرض الصوري ووضع الخرائط ومتابعة التضاريس الأرضية وقياس الارتفاع، إلخ). وتتطلب عموماً مواصفات أداء فريدة. وتحدد هذه المهام بعض المعلومات التي لا يتحكم فيها مصمم الرادار بحيث تؤثر بشكل مباشر على عوامل تصميم الرادار مثل: قدرة الإرسال المطلوبة، وانتقاء موجة المرسل، وانتقاء تجهيز خرج المرسل، وكسب الهوائي وحساسية المستقبل، واستبانة المدى والسمت والتغطية الدوبلرية. ومن الأساسي التوصل إلى حل وسط حكيم فيما بين عوامل تصميم الرادار، لتحسين مراقبة طيف البث، بحيث يمكن تعزيز الملائمة بين أنظمة الرادار والخدمات الأخرى.

#### 3 انتقاء وقولية الإشارة

يمكن أن يكون لانتقاء نمط نبضة الإشارة وأسلوب قولبتها آثار هامة على مراقبة الطيف وبالتالي على الملائمة. تواجه معظم الرادارات، وخاصة الرادارات التي تستعمل مذئذب أو مضخم بقدرة أحادية، اعتبارات فعالية الطاقة وتبذير الحرارة الناجمين عن استعمال نبضات ذات اتساع منتظم أساساً، باستثناء أثناء فترات انتقال وجيزة بين النبضات الفرعية. ويحد ذلك من أنماط الإشارة التي يمكن انتقائها. وحتى في هذه الحالة يظل الانتقاء قائماً ويمكن أن تكون له آثار هامة على طيف إرسال الرادارات.

ويمكن تصنيف إشارات الرادار إلى فئات، على السوية الأولى، إلى إشارات نبضية، أو إشارات غير مشكلة (يحدد البث بتعبير "P0") وإشارات مشكلة في نبضات. ويفيد تشكيل في نبضات كوسيلة لتنفيذ انضغاط النبضات، وإن كان هناك استثناء في حالة الإشارات المستعملة لاستخلاص ضعيف موجه إلى التردد. ويمكن بالتالي تقسيم التشكيلات بين النبضات إلى الفئات الفرعية التالية:

- نبضات بتشكيل تردد مستعر أو نبضات "زرقية"؛
- نبضات زرقية (مضغوطة) متدرجة؛
- نبضات بترددات متدرجة تستعمل في الرادارات الموجهة بالتردد؛
- نبضات بتشفير منفصل.

ومن منظور مراقبة طيف البث، من المبادئ التي يمكن الاسترشاد بها في انتقاء وقولبة الإشارة، إزالة الانقطاع في أكبر عدد ممكن من مشتقات الإشارة، لأنه يحدد ميل تنقيص طيف البث، المعبر عنه بمقدار عشري/ dB لتخالف التردد المنجز. ويمكن بالتالي التمييز بين مختلف الإشارات استناداً إلى الاختلاف الملحوظ بين الانتقال الاتساعي والطوري والتردد ضمن النبضة.

ومن الواضح أن جميع الإشارات النبضية تشتمل على منحدرات صاعدة وهابطة على الغلاف برتمته. وفي حالة تساوي جميع الاعتبارات، من المفضل وجود منحدرات صاعدة وهابطة تدريجية وسلسة. غير أنه في حال عدم تساوي جميع الاعتبارات، تستلزم النبضات المولدة في أجهزة المجالات المتقطعة بشكل خاص منحدرات صاعدة سريعة لتفادي إثارة أساليب المذبذب الهامشي التي من شأنها أن تتسبب في انحطاط الطيف. وحينما تستعمل مضخمات خلاف أجهزة المجالات المتقطعة، تسهل مراقبة الطيف بواسطة منحدرات صاعدة سلسة ومتدرجة، عندما يكون تنفيذها ممكناً. وقد يكون هذا التنفيذ صعباً نظراً لأن سوية تشتت مضخمات القدرة تكون مرتفعة عادة حينما تكون المضخمات قريبة من التشبع؛ وهنا يمكن استعمال منحدرات صاعدة وهابطة حتى عندما لا يشكل التذبذب الهامشي شاغلاً.

وتتميز الإشارات المشكلة في ترددات مستمرة، أو زرقية، بمعدل انضغاط نبضي مرتفع، إنتاج عرض نطاق - عرض النبضة، بمعدلات تنقيص طيف شديد الانحدار. وينطبق ذلك على كل من إشارات تشكيل التردد (FM) الخطي واللاخطي على السواء. وينشأ الإسهام الرئيسي لهذه الإشارات في المكونات الطيفية غير المطلوبة من استعمال منحدرات صاعدة قصيرة على النبضات.

والإشارات الزرقية المتدرجة يمكن اعتبارها تجميع فرعي للإشارات الزرقية بتشكيل تردد مستمر، تزيد أو تقل بنغمة أحادية طوال النبضة. ويمكن اعتبارها مجموعة فرعية من تردد مستمر بتشكيل زرقية. غير أنه، وعلى غرار الإشارات بتردد متدرج بنغمة لا أحادية المستعملة في صيف هوائي موجه بالتردد، لهذه الإشارات طيف بث أقل من الإشارات الزرقية بتشكيل تردد مستمرة والسبب في ذلك هو التقطعات في الإشارات. وقد يكون من الممكن عملياً إزالة هذه التقطعات بتنفيذ زرقية متدرجة بطريقة تحفظ استمرار الطور في التوصيلات بين تدرجات التردد. وحتى في هذه الحالة، ستبقى التقطعات في المشتق الأول، التي لا تحدث في إشارة تشكيل بتردد مستمر حقيقي، بحيث لا يكون الطيف بنفس جودة نبضة تشكيل تردد مستمر تتميز بمعدل انضغاط نبضات مماثل.

وتوجد من ناحية أخرى الإشارات المشفرة متعددة الطور، ومنها النموذج الأول لإشارة فرانك المشفرة متعددة الطور، التي تعتبر قريبة من الإشارات الزرقية بالفعل؛ أي أنها تقترب من الإشارات "ذات التشفير المستمر"<sup>1</sup>. غير أن هذه الإشارات تتضمن من طورها خطوات شديدة الانحدار، بحيث لا يتناقص طيفها بنفس سرعة الإشارات الزرقية بتشكيل تردد مستمر.

وهكذا، لا تشبه إشارات الرادار المشفرة بشكل منفصل بأي حال إشارات التردد الراديوي المشكلة بتردد مستمر. ولأن ذلك يستبعد التشفير متعدد الطور، يمكن تجزئة معظم إشارات الرادار المشفرة بشكل منفصل من نمط تشفير بطورين أو بإشارة من

<sup>1</sup> يطلق على الإشارات الزرقية أحياناً الإشارات المشفرة حتى وإن كان تشفيرها ليس منفصلاً.

نمط تردد مشفر. والإشارات التي تنتمي إلى أي فئة من الفئتين يمكنها استعمال تشفيرات باركر أو تشفيرات تردد اثيني شبه عشوائي.

وفي غيبة أي عمليات توزيع، تمثل الإشارات المنفصلة المشكلة طورياً انتقالات شديدة الانحدار فيما بين "الرقاقات" بطور ثابت. (وينطبق الأمر ذاته بالنسبة لتشفيرات فرانك وعلى سائر التشفيرات متعددة الطور). ونتيجة لذلك، يتناقص طيفها بزهاء 20 dB/عشري. غير أنه تيسر بعض الخيارات التي يمكن أن تحسن طيف الإشارات بتشفير طوري.

ومن حيث المبدأ، من الممكن تنقيص طيف دافع إشارة (إثارة) RF بسرعة وذلك بترشيح إشارات التشكيل أو إشارات الإثارة المشكلة بمستوى منخفض (إما IF أو RF) نفسها. غير أن هذا الكسب يمكن أن يتآكل عملياً بنمو طيفي جديد ينتج من مضخم قوي المرسل أو في المستقبلات المجاورة. وحينما يستعمل الترشيح بتشكيل مسبق، لا يكون الانتقال بين الرقائق بانحدار شديد بل تدريجي، أما فيما يتعلق بالإشارات ثنائية الطور وكذلك الإشارات متعددة الطور التي تتضمن طور انتقال من 180°، تبقى الأصفار أو النقرات في غلاف الإشارة لأن هذا الغلاف يمر عبر الصفر أثناء انتقاله من طور إلى آخر. وهذه ليست مشكلة في حد ذاتها، لكن المزايا المستمدة تنخفض بسبب عاملين. والعامل الأول هو تحويل AM إلى PM الذي يحدث في أجهزة مضخمات القدرة. ويوسع تشكيل الطور الغريب الناتج الطيف. ومن المثالب الأخرى أن أي قيود تحدث إما في مراحل المرسل بمضخم قدرة، أو في المستقبلات المضطربة تميل إلى إعادة إدخال انتقالات شديدة الانحدار في الإشارات المنقررة. وتحول هذه الخطوات شديدة الانحدار إلى نطاقات طيفية جانبية غير مطلوبة في شكل حافة طيف ينخفض من جديد بمقدار 20 dB/عشري.

ويمكن تخفيف حدة هذا النمو الطيفي إلى حد كبير. ويمكن إنجاز ذلك بإشارات إثارة (دافع، سوية منخفضة) تحفظ الغلاف بشكل منتظم تقريباً ليس أثناء الفترات الفاصلة لحفظ النبضات الفرعية فحسب، بل أيضاً أثناء انتقال الطور. ويشمل انتقال الطور بمقدار 180°، في هذه الإشارات، دوران الطور الحامل باتباع نصف دائرة في المخطط I-Q، أو مستوى حقيقي-تخيلي، بدلاً من الحركة في موازاة المحور I أو Q الذي يمر عبر الأصل. ويمكن تنفيذ ذلك بواسطة مشكلات تربيعية ودارة مكيفة لتشكيل الإشارة.

والفئة الأخرى للإشارة بتشفير منفصل هي التردد مستمر الطور لإبراق بزحزة الطور. وهذه الإشارات هي نفسها الإشارات التي يطلق عليها تشكيل بزحزة دنيا (MSK) المستعمل في أنظمة الاتصالات. وإن كان يشار إليها أحياناً بإشارات إبراق بزحزة الطور، وهي في الحقيقة مشفرة الترددات لأن طورها يتغير باستمرار، في حين أن تشكيلها الأساسي غير المرشح، يغير التردد الآني بشكل مفاجئ ويبقى منتظماً طوال كل نبضة فرعية. ولا توجد تقطعات في الإشارة نفسها، ولكن توجد تقطعات في المشتق الأول. وبناء على ذلك، يتقارب بهم الطيف الذي يهبط إلى معدل قدره 40 dB/عشري. بالإضافة إلى ذلك، فلهذه الإشارات أغلفة منتظمة حتى أثناء انتقالها كنبضات فرعية، ولذلك فهي محمية حقيقة من مشاكل إعادة نحو الطيف الذي يحدث في حالة الإشارة ذات الطور الشفري (وحيث أن إشارات كنس التردد ليس لديها نبضات فرعية، فهي أيضاً محمية من إعادة نمو الطيف الناجم عن حدها أو من تحويل AM إلى PM). ويستعمل في أنظمة الاتصالات على نطاق واسع الترشيح بواسطة التشكيل المسبق لتشكيل بزحزة دنيا MSK. ومن المتوقع إمكانية استعمال هذا الترشيح في الرادارات، وفي هذه الحالة سيتم تنقيص طيف البث بصورة أسرع نظرياً وسيكون مقداره أعلى من 40 dB/عشري.

وإذا كان من المفضل أن ينخفض طيف البث بسرعة، فلا يمكن تجاهل النتائج على مستوى استبانة المدى والتغطية الدوبلرية، التي يعبر عنهما عادة بعبارة "الوظيفة المهمة". وتمثل هذه الوظيفة حجم إشارة الخرج الحولة بعودة هدف نقطة والناجحة عن مرشح مكيف للإشارة المرسل، والوظيفة المهمة هي وظيفة لكل من المدى (وقت الانتشار) والإزاحة الدوبلرية لعودة الهدف. وكمثال غير نمطي، إشارة بنبضة مستطيلة FM خطية زائد ناتج وقت عرض نطاق لا نهائي (أي معدل انضغاط لا نهائي) باستثناء ما يتعلق بإسهام منحدرات صاعدة وهابطة. غير أن استجابة مرشح مكيف لهذا النوع من الإشارات يكون في شكل استجابة  $\text{Sin}(t)/t$  لعودة الهدف تحت تأثير الإزاحة الدوبلرية. ولهذا الاستجابة فصوص جانبية وقتية (أي مدى) فقط قدرها 13 dB تحت الاستجابة الرئيسية، وهي غير ملائمة في بعض التطبيقات التي تتطلب درجة عالية من استبانة أهداف

متعددة. واستجابة المرشاح المكيف ليست مجرد تحويل فورييه لطيف الإرسال. غير أن هناك اتجاه من أن يصحب التنقيص شديد الانحدار لطيف الإرسال-الاستجابة من الفصوص الجانبية الطويلة، وكذلك الأمر في حالة الخطوات شديدة الانحدار في وقت الإشارة التي تصحب طيف الإرسال فصوص جانبية عالية في طيف الإرسال. ويمكن إلى حد ما تحسين كبت هذه الفصوص الجانبية بفك معالج إشارات المستقبل والنبضات المرسل، لكن هذه العملية يترتب عليها ضياع في الحساسية مقارنة بحساسية المرشاح المكيف. ولذلك فإن من الضروري انتقاء إشارة تمثل حلاً مقبولاً بين مراقبة الطيف، أو كبت الفصوص الجانبية أو الحساسية. (ولذلك يعتبر الإرسال مع كنس التردد باستعمال مظهر جانبي بتشكيل تردد (FM) لا خطي طفيف حلاً مقبولاً لبعض التطبيقات). بيد أن الحاجة إلى استبانة وحساسية جيدتين تضيق خيارات المصمم. بالإضافة إلى ذلك، تتطلب العديد من التطبيقات الرادارية استجابة شبه موحدة لطائفة كبيرة من الترددات الدوبلرية؛ أي أنها ضرورية للحصول على "حساسية دوبلرية" منخفضة. ويفرض ذلك قيوداً أخرى بالنسبة للمصممين وحيد من اختيارهم.

وفي أنظمة الاتصالات، يمكن تحسين تنقيص طيف البث بواسطة ترشيح بتشكيل مسبق، ويكون ذلك على حساب التداخل بين الرموز. ورغم ذلك، يمكن في حالات كثيرة إدخال تحسينات ملموسة في مراقبة الطيف قبل أن يصبح التداخل بين الرموز غير مقبول. وفي رادار معين، يكون تحسين الطيف الذي يمكن كسبه باستعمال ترشيح التشكيل المسبق على حساب انخراط استبانة الرادار. ويمكن توقع حدوث خسارة طفيفة في حساسية الكشف تنجم عن صعوبة بناء مرشاح مكيف تماماً (أو عملية الترابط) مع إشارات تمثل زوايا مدورة (ناشئة عن الترشيح بتشكيل مسبق) بدلاً من التقطعات الحادة. غير أنه، كما في حالة نظام الاتصالات التماثلي، من المتوقع تحقيق تحسينات ملموسة في مراقبة الطيف قبل انخراط الوظيفة المهمة أو وظيفة الحساسية انخراطاً كبيراً. وكما أشير إليه أعلاه، فإن إزالة التقطعات في أكبر عدد ممكن من مشتقات الإشارة هي التي تحدد ميل التنقيص في الطيف المحقق في تحالف التردد الكبير. وهذا لا يتطلب بالضرورة أن يكون الترشيح بعرض نطاق ضيق، وإن كان عرض النطاق يحدد تحالف التردد الذي يحصل عنده على الميل النهائي لتنقيص الطيف.

تنطبق المناقشة السابقة عندما تكون الإشارة باتساع منتظم في إطار الإبقاء على نبضاتها الفرعية. واستعمال وحدات متعددة لتضخيم القدرة (المزودة عادة بأشبه الموصلات) من معمارية دليل - مجمع تربط القدرة بالمكان، تتيح إمكانية استعمال إشارات منتظمة، مشكلة في الاتساع. ولا نعرف ما إذا كان هذا النمط من الإشارة يستعمل في الرادارات في الوقت الراهن، ولكن يحتمل استعمالها في المستقبل، مما يمكن أن يتيح للمصممين قدراً من الحرية يمكنهم استغلالها جزئياً في مراقبة طيف بث الرادارات.

#### 4 انتقاء تجهيزات خرج الرادارات

يؤثر انتقاء جهاز خرج مرسل الرادار لا على تصميم المرسل فحسب، بل أيضاً على مستقبل الرادار وأنظمة الهوائي. ويمكن لتصميم أنظمة رادار متعددة الوظائف أن تزيد من تعقيد انتقاء جهاز خرج الرادار. ومن العوامل الهامة الأخرى في التصميم: كفاءة الطاقة (تحويل الطاقة (DC) إلى تشكيل تردد (RF))، عرض النطاق الآني (عرض نطاق التوليف المتاح بدون تعديل) والتماسك بين النبضات (الطور النسبي لكل نبضة الذي يعتبر هاماً للمعالجة الدوبلرية)، الوزن، الحجم، والمتانة الميكانيكية، والعمر الافتراضي للجهاز وتكلفته.

يبين الجدول 1 أداء تجهيزات الخرج المقابلة لعوامل التصميم الرئيسية في تصميم أنظمة الرادار. وكما يلاحظ من الجدول 1، ثمة اختلافات واسعة في خصائص جهاز الخرج بالنسبة للعوامل الرئيسية في التصميم وهي: قدرة الذرة وعرض النطاق الآني وكفاءة الطاقة. ويجدر ملاحظة أن عوامل التصميم المذكورة أعلاه يجب أن تولى عناية أولية في انتقاء جهاز الرادار لضمان تحقيق مهمة (مهام) الرادار. ولا يتم تفحص خصائص البث الهامشية لجهاز خرج الرادار إلا بعد استيفاء جميع أهداف هذه المهمة.

## الجدول 1

## خصائص جهاز خرج الرادار التي تؤخذ في الاعتبار في تصميم أنظمة الرادار

جهاز الخرج	مدى قدرة خرج الذروة (kW)	كفاءة الطاقة (%)	عرض النطاق الآبي عند dB 1 % من التردد (الحامل)	التماسك من نبضة إلى نبضة	الوزن (kg)	القد	المئات الميكانيكية	العمر الافتراضي (1) النسبي	التكلفة النسبية(2)
المجالات المتقاطعة: (3) مضخمات المجالات المتقاطعة مغنيطرونات (غير مرتجة) مغنيطرونات (مرتجة) مغنيطرونات متحدة المحور	5 000-60	65-40	12-5	نعم	65-25	صغير	جيد	1,0	منخفضة
	1 000-20	75-35	(4)	لا	25-1			1,0	
	1 000-20	75-35	(4)	نعم	25-1			1,0	
	3 000-10	50-35	(4)	لا	55-2			5,4	
الحزمة الخطية: أنبوب الموجة المتقلبة ذو التحويل المقترن كلايسترون توايسترون	200-25	40-20	15-10	نعم	135-10	كبير	جيد	7,4	عالية
	10 000-20	50-30	12-1	نعم	270-25			13,5	متوسطة
	5 000-2 000	40-30	12-1	نعم	65-55			10,4	عالية
ترانزستورات بالحالة الصلبة (وحدات متوازية من الصنف C): ثنائي القطب من السيليكون ترانزستور بتأثير المجال GaAs (5)	90-10 5,0-0,5	30-20 25-10	30-10 30-10	نعم	2,5-0,5 لكل وحدة	صغير	ممتاز	15	عالية

(1) يقيس العمر الافتراضي بالنسبة إلى مغنيطرون تقليدي في السبعينات؛ لا يعكس عمر افتراضي أطول للمغنيطرونات من الجيل الأحدث عهداً.

(2) تتوقف على حجم الإنتاج.

(3) الأرجح أن تختفي أجهزة خرج المجالات المتقاطعة في تصميم الرادارات في المستقبل؛ غير أنه من المتوقع استمرار استعمالها في أنظمة الملاحة الراديوية البحرية.

(4) على الرغم من عدم وجود قدرة عرض نطاق آبي للمغنيطرونات، يمكن الحصول على معدلات تردد توليف تصل إلى 10% من تردد التشغيل.

(5) تستخدم الوحدات ثنائية القطب من السيليكون (Si) عموماً تحت 3,5 GHz وتستخدم الوحدات من زرنيخات الجاليوم (GaAs) في النطاق 5 GHz.

(6) تتوقف على عدد الوحدات المختلطة في مرحلة الخرج.

تتوقف سويات البث الهامشي من مرسل الرادار على جهاز الخرج المستعمل في مرسل الرادار. والدراية بخصائص البث الهامشي الملازمة لمختلف أجهزة الخرج المستعملة في مرسلات الرادار ضرورية لاستعمال الطيف بكفاءة أكبر لتقليل التداخل في الخدمات التي تشغل في نطاقات مجاورة إلى أدنى حد ممكن.

ويورد الجدول 2 قائمة بخصائص البث الهامشي (التوافقي وغير التوافقي) لأجهزة الخرج المستعملة في أنظمة الرادار. ويوجد في أنظمة الرادار التي تستعمل أجهزة خرج ذات مجالات متقاطعة سويات بث هامشي غير توافقي ملازمة قد تتطلب ترشيحاً إذا زاد البث الهامشي عن -60 dBc تقريباً. ويوجد في كل من أنابيب الحزمة الخطية وأجهزة الخرج الراداري بالحالة الصلبة بث هامشي غير توافقي ملازم يبلغ أقل من -100 dBc. وتحتوي جميع أجهزة خرج الرادار على بث هامشي توافقي يتراوح مداه بين -15 و -55 dBc لذا فهي تحتاج إلى ترشيح لكبت البث الهامشي التوافقي. أما في حالة الرادارات التي تستعمل أجهزة خرج موزعة (صفييف مطاور) قد يكون الترشيح غير عملي.

## الجدول 2

خصائص البث الهامشي لأجهزة الاستدلال الراديوي النبضية  
العامة في النطاقين 3 و 5 GHz

سوية البث الهامشي			جهاز الخرج <sup>(1)</sup>
توافقي <sup>(2)</sup> ، <sup>(3)</sup> (dBc)			
الرابعة	الثالثة	الثانية	
<i>المجالات المتقاطعة:</i>			
45-	30-	25-	35- إلى 50- <sup>(5)</sup>
45-	20-	40-	65- إلى 80- <sup>(5)</sup>
45-	20-	40-	75- إلى 90- <sup>(5)</sup>
45-	20-	40-	60- إلى 75- <sup>(5)</sup>
<i>الحزمة الخطية:</i>			
			<sup>(6)</sup>
35-	25-	20-	105- إلى 115-
35-	25-	20-	110- إلى 120-
35-	25-	20-	105- إلى 115-
<i>ترانزستورات بالحالة الصلبة (وحدات متوازية من الصنف C):</i>			
65-	55-	45-	100- إلى 110-
55-	45-	35-	100- إلى 110-

- (1) يمكن تكيف أجهزة الخرج الأخرى على نحو أفضل بأنظمة تشغيل تعمل فوق 5 GHz. وتشمل هذه الخيارات، ولا تقتصر على، أنابيب بصنف مروحي أو قضيب بموجات متنقلة ومغنيطرونات تكنولوجيا أحدث.
- (2) إن سويات البث الهامشي المدرجة في القائمة هي قيم اسمية. ويكون مدى البث الهامشي التوافقي نمطياً بين +5 و -10 dB من القيمة الاسمية.
- (3) يمكن خفض سوية البث الهامشي لأقل من -100 dBc بواسطة مرشاح (تمرير منخفض) توافقي.
- (4) يكون لأجهزة الخرج المغنيطرونية الأقدم عهداً أساليب  $\pi - 1$  ملازمة لا تقل عن 40 dB بالنسبة إلى الموجة الحاملة. وهذه الأساليب متقطعة وقصيرة المدة وهي تحدث فقط أثناء انطلاق الذبذبات وتصمم المغنيطرونات الأحدث عهداً لكبت هذا البث.
- (5) يمكن خفض سويات البث غير التوافقي في أجهزة المجالات المتقاطعة إلى أقل من -100 dBc باستخدام مرشاح تمرير نطاق الدليل الموجي. وتبلغ عموماً خسارة الإدراج لهذه المرشاح بضعة أعشار dB.
- (6) قد يكون لأجهزة خرج الحزمة الخطية بث هامشي غير توافقي قريب من الموجة الحاملة يتراوح بين -80 و -90 dBc حسب خصائص الانتقائية الإجمالية للتجويف.

## 5 مرادشيع خرج الرادار

يمكن أن تكون مرادشيع التردد الراديوي (RF) مفيدة للغاية في كبت البث التوافقي. كما يمكن استعمال مرادشيع التردد الراديوي في كبت البث خارج النطاق والبث الهامشي غير التوافقي الواقع قريباً من البث الرئيسي أكثر مما يمكن أن يفعله البث التوافقي. غير أن فائدتهما تقتصر على مراقبة الأجزاء القريبة نسبياً من طيف البث. ويرجع ذلك جزئياً إلى التكلفة الإضافية، والثقل، والحجم، وكذلك إلى واقع أن العديد من الرادارات قابلة للضبط و/أو تستعمل إشارات متعددة، ولدى بعضها عرض نطاق أكبر بكثير من غيرها. نادراً ما يكون من الممكن عملياً تنفيذ مرادشيع تردد راديوي عالية القدرة ويمكن تشكيلها بحيث تتكيف مع التغييرات في تردد الموجة الحاملة أو إشارة النبضة، خاصة وأن مثل هذه التغييرات يمكن أن تحدث خلال جزء من الألف من الثانية.

ومعمارية المرسل هامة أيضاً في تحديد درجة مراقبة الطيف الممكن تحقيقها. وفي الحالات التي تستعمل فيها مضخمات قدرة متعددة، تتأثر سرعة وسوية تناقص طيف الإرسال بتركيبة من المنتجات الناشئة عن مضخمات القدرة هذه إما داخل الدليل الموجي أو داخل الحيز بعد التشكل. والواقع أن التركيبة داخل أدلة موجات المرسل ينشأ عنها عدم مواءمة شديدة في المقاومة بالنسبة للمكونات غير المتماسكة على التبادل لإشارات الخرج الناجمة عن مضخمات القدرة، التي يمكن أن تخفض بشدة قدرة الضوضاء المشعة بالنسبة لمجموع قدرة الضوضاء المتاحة للمضخمات. وعلى عكس ذلك، في حالة استعمال الرادارات بصيف التي تغذيها مضخمات متعددة، يعتبر ترتيب القدرة الفضائية معمارية جذابة، لكنها تشع كل قدرة ضوضاء المضخمات. ومن ناحية أخرى، تكون إمكانات ترشيع التردد الراديوي محدودة في هذه الحالة، ويعزى ذلك جزئياً إلى ضرورة وجود مرشاح منفصل لكل مضخم، في حين أنه يمكن أن تكون هناك مئات بل آلاف منها. ويعزى ذلك جزئياً أيضاً إلى ضرورة وجود حيز قدره نصف طول موجة، لأن العناصر المشعة تكون عادة قريبة من بعضها بعضاً لتجنب ظهور فصوص غير مقبولة في نمط كسب الهوائي. والحيز الموجود غير كافي من أجل الترشيع شديد الفعالية.

وكما هو مبين في الجدول 2، يؤثر انتقاء جهاز خرج الرادار بشكل ملموس على متطلبات ترشيع البث الهامشي غير التوافقي. غير أن اختيار جهاز خرج الرادار لا يمكن أن يتم بشكل كامل بناءً على خصائص البث الهامشي، كما ذكر أعلاه. وبسبب سويات البث الهامشي التوافقي العالية الملازمة لجميع أجهزة الخرج، يتم كبت البث الهامشي التوافقي عموماً باستعمال مرادشيع (تمرير منخفض) توافقي، كلما كان ذلك عملياً. لتخفيف حدة نطاقات البث الهامشي للرادار غير التوافقي الصادرة عن الرادارات ذات القدرة المتوسطة والعالية في نطاقات مجاورة لنطاقات تحديد الموقع الراديوي، تكون هناك حاجة لمرادشيع تمرير النطاق مرسل الرادار لبعض أجهزة خرج الرادار. وبالطبع يجب أن تكون هذه المرادشيع منفصلة عن المرشاح التوافقي نمطياً، إذ إن خصائص نطاق التوقف العريض لمرادشيع الكبت التوافقي لا تلائم عادة خاصية القطع الحاد لمرادشيع كبت النطاق المجاور. وقد يزيد عدد المرادشيع المطلوبة عن اثنين بكثير؛ ومع ذلك، في حالة الرادارات ذات الصيف النشط، يجب وضع مرشاح أو اثنين بين كل جهاز خرج قدرة وعنصر الهوائي أو الصيف الذي يغذيه. وستكون هناك حاجة إلى آلاف المرادشيع.

ويمكن أن تكون تكلفة هذه المرادشيع كبيرة، فقد تكون هناك حاجة لأنماط مرادشيع غير تقليدية، تحتاج في بعض الحالات إلى تكييف الضغط أو الإخلاء لتحمل القدرات العالية والحفاظ على الكبت المرغوب لنطاق كبت عريض. ويفرض استعمال مثل هذه المرادشيع اللجوء إلى حلول وسط بالنسبة لأداء نظام الرادار. وتتراوح خسارة الإدراج للمرادشيع التوافقية للمرسل ولمرادشيع تمرير النطاق للرادارات بين 0,1 و 0,7 dB. فإذا كانت هناك حاجة لكل من المرشاح التوافقي ومرشاح تمرير النطاق تصل خسارة الإدراج إلى الضعف تقريباً. ونظراً للتغيرات العديدة في تشغيل الرادار، لا يلاحظ عادة التناقص في كشف وتتبع الأداء، مع ذلك فإن 0,2 dB تمثل خسارة كبيرة في قدرة التردد الراديوي (RF) (على سبيل المثال، 47 kW من قدرة الذروة لرادار 1 MW). ويجب أن يكون المرسل أكثر قوة لكي يتمكن من تعويض هذه الخسارة في الأداء، إذ يفترض أن وسائل أخرى أكثر فعالية في التكاليف لتحسين الأداء قد استنفدت بالفعل. إن خسارة قدرها 0,4 dB على سبيل المثال تقابل خفض قدره 2,3% في مدى الكشف، مما قد لا تكون له عواقب على معظم الرادارات ولكنه قد يكون هاماً للبعض الآخر. ويتراوح مدى التوتّر في نسبة الموجات المستقرة لهذين النمطين من المرادشيع بين 1,1 و 1,3.



إن تحمل القدرة وقد ووزن المرشاح عوامل يجب أن تؤخذ في الاعتبار عند تقرير جدوى استعمال مرشاح خرجي للرادار خاصة في الرادارات المتنقلة. قد يكون القدر والوزن عاملين مؤثرين في حالة الرادارات المتنقلة ذات الصفييف النشط. وتحتاج بطاقات الترشيح القريبة من نطاق تشغيل الرادار إلى حواف انتقائية حادة وقدرة عالية على تخزين الطاقة مما يزيد من خطر الأعطال (أو يقلل من مقدرة تحمل القدرة) وقد يؤدي إلى تشوه الطور في نطاق التمرير - وهو اعتبار آخر هام للرادارات ذات الصفييف النشط. وكلما زادت قدرة الرادار زادت الحاجة إلى التوهين لكبت الخرج الهامشي إلى سوية ما، وكلما زاد عدد المقاطع التي يحتاجها المرشاح زادت الخسارة في الإدراج وزاد القدر والوزن.

وأفضل وسيلة لتصنيع مرشاح على مستوى المرسل هي اتخاذ جميع الإجراءات اللازمة في مرحلة تصميم الرادار نفسه. وفي حالات عديدة أمكن إضافة مرشاح إلى رادارات بأقل تأثير ممكن على أداء النظام، لكن هناك حالات أخرى حدثت فيها أعطال بعد إضافة مرشاح تمرير النطاق لكبت البث في النطاق المجاور.

## 6 تطور الرادارات

إن التقدم في مجالين هامين أصبح يوجه اختيار أجهزة خرج الرادار وهما:

- معالجة إشارات الرادار الرقمية التي تؤدي إلى تطور سريع في رادارات Doppler التي تتطلب تماسكاً عالياً من نبضة إلى نبضة (الأجهزة ذات الحزمة الخطية و بالحالة الصلبة)،
- تطوير أجهزة إرسال بالحالة الصلبة ذات قدرة أعلى (تشكيلة منسقة/ bottled وموزعة (صفييف مطاور)،
- تطوير مغنيطرونات تكنولوجيا جديدة المصممة خصيصاً لتخفيض البث غير المطلوب والتي توفر عمر افتراضي أكبر بكثير من الأمامط التقليدية الأقدم عهداً.

وستؤثر هذه التطورات على تخفيض سويات البث الهامشي للجيل الجديد من الرادارات.