

الجمهورية العربية السورية  
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا  
قسم الاتصالات

أطروحة ماجستير

## دراسة ومحاكاة رادارات الفتحة التركيبية وطرق التشويش عليها

تقديم

م. هاني الندى

إشراف

د. رضوان قسطنطين

دمشق 2016

## إهداء

إلى من جرع الكأس فارغاً ليستقيني قطرة حب  
إلى من كلت أنامله ليقدّم لنا لحظة سعادة  
إلى من حصد الأشواك عن دربي ليمهد لي طريق العلم ..... أبي

إلى من أرضعتني الحب والحنان  
إلى رمز الحب ويلسم الشفاء  
إلى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي ..... أمي

إلى الأجل والأعلى في هذه الحياة ..... سماح، أسمى، وسام

هاني الندى

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

{ وَقُلْ اَعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ }

صدق الله العظيم

## كلمة شكر

أتقدم بالشكر إلى الدكتور رضوان قسطنطين على المتابعة الحثيثة لإتمام هذا العمل، وإلى الدكتور غسان عبد السلام على ملاحظاته القيمة، وأشمل بالشكر جميع الأخوة الزملاء الذين كانوا معي خلال هذا العمل وساندوني لإتمامه.

وختاماً، هذا جهدي أتقدم به فإن كنت قد وفقت فمن الله عز وجل وتوجيه مشرفي، وإن كنت قد قصرت فحسبي أنني اجتهدت، والكمال لله وحده.

هاني الندى

## الملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة إمكانية التشويش على رادارات الفتحة التركيبية الشرائطية. يعرض هذا العمل دراسة ومحاكاة لرادار الفتحة التركيبية الشرائطية وخصائص النبضات المعدلة ترددياً المستخدمة عموماً في هذا النوع من الرادارات. ومن ثم يعرض بعض إجراءات المعاكسة الإلكترونية المستخدمة للتشويش على الرادارات مع التركيز على المشوشات التكرارية. تبين نتائج الدراسة والمحاكاة أنه يمكن للمشوشات التكرارية تشويه الصورة الرادارية من خلال توليد أهداف خداعية عن طريق تعديل إشارة الرادار ترددياً أو طورياً.

## Abstract

The purpose of this thesis is to study SAR jamming techniques, we present a study and simulation of a stripmap SAR, and the properties of LFM chirps used in this type of SAR. Besides, we present some of ECM techniques for Radar systems with focus on repeater jammer. The simulation results show that we can jam the radar image by generating fake targets, which can be achieved by modulating the radar signal in frequency and phase.

## المحتويات

i	..... الملخص
ii	..... المحتويات
iv	..... قائمة الأشكال
vii	..... قائمة الجداول
viii	..... الإختصارات
ix	..... الرموز
x	..... مقدمة عامة
١	..... الفصل الأول: مدخل إلى رادار الفتحة التركيبية
١	..... ١.١. مقدمة
١	..... ٢.١. تعريف أساسية
٤	..... ٣.١. مبدا رادار الفتحة التركيبية
٦	..... ٤.١. أنماط عمل رادار الفتحة التركيبية
٧	..... ١.٤.١. رادار الفتحة التركيبية ذو المسح الشرائطي
٨	..... ٢.٤.١. رادار الفتحة التركيبية ذو المسح البععي
٩	..... ٣.٤.١. رادار الفتحة التركيبية ذو المسح المتعدد
٩	..... ٥.١. تطبيقات رادارات الفتحة التركيبية
١٠	..... ٦.١. الخاتمة
١١	..... الفصل الثاني: رادارات ضغط النبضة
١١	..... ١.٢. مقدمة
١١	..... ٢.٢. مبدا عمل رادارات ضغط النبضة
١٣	..... ٣.٢. المرشحات المتوافقة وتابع الغموض
١٥	..... ٤.٢. خصائص تابع الغموض
١٩	..... ٥.٢. التعديل الترددي الخطي
٢٣	..... ٦.٢. قياس المدى في رادار الفتحة التركيبية
٢٣	..... ١.٦.٢. نموذج نظام قياس المدى
٢٥	..... ٢.٦.٢. الضغط باستخدام مرشح متوافق
٢٧	..... ٣.٦.٢. الضغط باستخدام الترشيح المتوافق بالإشارة المرجعية
٣٠	..... ٧.٢. الخاتمة

٣١	..... الفصل الثالث: المعالجة الرقمية لإشارات رادارات الفتحة التركيبية .....
٣١	..... ١.٣ مقدمة .....
٣١	..... ٢.٣ النموذج الهندسي .....
٣٥	..... ٣.٣ الخوارزمية مدى-دوبلر .....
٣٨	..... ٤.٣ محاكاة رادار stripmap SAR .....
٤٤	..... ٥.٣ الخاتمة .....
٤٥	..... الفصل الرابع: الخداع والتشويش الراداري .....
٤٥	..... ١.٤ مقدمة .....
٤٦	..... ٢.٤ التشويش الميكانيكي (التشويش غير الفعال) .....
٤٦	..... ١.٢.٤ الديبولات .....
٤٧	..... ٢.٢.٤ العواكس الزاوية .....
٤٧	..... ٣.٢.٤ الأفخاخ .....
٤٨	..... ٣.٤ التشويش الإلكتروني (التشويش الفعال) .....
٤٨	..... ١.٣.٤ التشويش الضحيجي .....
٥٠	..... ٢.٣.٤ التشويش التكراري .....
٥١	..... ١.٢.٣.٤ المشوش التكراري المعتمد على الذاكرة الرقمية .....
٥٣	..... ٢.٢.٣.٤ المشوش التكراري اللحظي .....
٥٦	..... ٤.٤ محاكاة التشويش على رادارات الفتحة التركيبية .....
٥٧	..... ١.٤.٤ تطبيق تعديل ترددي في حالة هدف نقطي .....
٦٣	..... ٢.٤.٤ تطبيق تعديل طوري في حالة مركبة عسكرية .....
٦٦	..... ٥.٤ الخاتمة .....
٦٧	..... الخاتمة .....
٦٨	..... المراجع .....

## قائمة الأشكال

- الشكل ١-١: رسماً توضيحياً يبين المدى والمدى الأفقي للرادار ..... ٢
- الشكل ١-٢: مثال نمطي يوضح التمييزية في المدى المتعامد ..... ٣
- الشكل ٣-١: مبدأ رادار الفتحة التركيبية ..... ٤
- الشكل ٤-١: هندسية هوائي مصفوفاتي مركبي ..... ٥
- الشكل ٥-١: الدقة في المدى المتعامد عند استخدام هوائي مصفوفاتي مركبي ..... ٦
- الشكل ٦-١: طريقة عمل الرادار Stripmap SAR ..... ٧
- الشكل ٧-١: طريقة عمل الرادار Spotlight SAR ..... ٨
- الشكل ٨-١: طريقة عمل الرادار Scan SAR ..... ٩
- الشكل ١-٢: نبضة رادار عريضة باستطاعة منخفضة وأخرى ضيقة باستطاعة عالية لهما الطاقة نفسها ..... ١٢
- الشكل ٢-٢: مثال توضيحي على تقنية ضغط النبضة ..... ١٣
- الشكل ٣-٢: نمذجة مستقبل راداري بوجود ضجيج أبيض جمعي ..... ١٤
- الشكل ٤-٢: مخطط الغموض المثالي ..... ١٦
- الشكل ٥-٢: تقريب واقعي لتابع الغموض المثالي ..... ١٧
- الشكل ٦-٢: مخطط الغموض لنبضة مستطيلة غير معدلة ..... ١٧
- الشكل ٧-٢: مقطع عرضي لمخطط الغموض لنبضة مستطيلة غير معدلة. (أ) نبضة عريضة. (ب) نبضة ضيقة ..... ١٨
- الشكل ٨-٢: نبضة معدلة تعديلاً ترددياً خطياً ..... ٢٠
- الشكل ٩-٢: التوزين بحالة التعديل الترددي الخطي ..... ٢١
- الشكل ١٠-٢: خرج المرشح المتوافق بدون توزين استجابته (المنحني المتقطع) وخرج المرشح المتوافق بعد توزين استجابته بنافاذة تايلور (الخط المتصل)، في حال إشارة LFM ..... ٢١
- الشكل ١١-٢: رسماً ثنائي البعد لمخطط الغموض لإشارة LFM متزايدة في التردد ..... ٢٣
- الشكل ١٢-٢: نموذج هندسي لقياس المدى ..... ٢٤
- الشكل ١٣-٢: (a) مثال عن تابع الهدف المثالي  $f_0(t)$ . (b) خرج المرشح المتوافق  $S_M(t)$  وتابع الهدف  $f(t)$  الناتج ..... ٢٦
- الشكل ١٤-٢: تنجيز عملية الترشيح في المستوي الزمني وفي المستوي الترددي ..... ٢٦
- الشكل ١٥-٢: التردد المرجعي والترددات الناتجة عن هدفين ..... ٢٨
- الشكل ١٦-٢: الجزء الحقيقي للإشارة المنعكسة عن الأهداف في الحزمة القاعدية ..... ٢٩

- الشكل ٢-١٧: الجزء الحقيقي للإشارة المرجعية للمرشح المتوافق في الحزمة القاعدية ..... ٣٠
- الشكل ٢-١٨: خرج المرشح المتوافق وأمدية الأهداف ..... ٣٠
- الشكل ٣-١: النموذج الرياضي لمنطقة الأهداف ..... ٣٢
- الشكل ٣-٢: شدة الإشارة المستقبلية عن هدف واحد كتابع للزمن البطيء ..... ٣٣
- الشكل ٣-٣: شكل توضيحي لكل من  $R_m(\eta)$  و  $R_{mo}$  و  $\theta_{sq}$  ..... ٣٤
- الشكل ٣-٤: الإشارات المستقبلية من قبل رادار SAR stripmap بتمثيل بياني ..... ٣٥
- الشكل ٣-٥: المخطط الصندوقي لخوارزمية مدى-دوبلر ..... ٣٦
- الشكل ٣-٦: صورة تحتوي على هدف نقطي واحد ..... ٣٨
- الشكل ٣-٧: صورة تحتوي على مركبة عسكرية ..... ٣٩
- الشكل ٣-٨: الإشارة المنعكسة عن منطقة تحتوي هدفاً نقطياً ..... ٣٩
- الشكل ٣-٩: خرج عملية الضغط بالمدى من أجل هدف نقطي ..... ٤٠
- الشكل ٣-١٠: خرج عملية تصحيح خلايا المدى ..... ٤١
- الشكل ٣-١١: خرج عملية الضغط بالمدى المتعامد من أجل هدف نقطي ..... ٤١
- الشكل ٣-١٢: الإشارة المنعكسة عن منطقة المركبة العسكرية ..... ٤٢
- الشكل ٣-١٣: خرج عملية الضغط بالمدى من أجل مركبة عسكرية ..... ٤٢
- الشكل ٣-١٤: خرج عملية تصحيح خلايا المدى ..... ٤٣
- الشكل ٣-١٥: خرج عملية الضغط بالسمت من أجل مركبة عسكرية ..... ٤٣
- الشكل ٤-١: طلقات تحتوي على شرائط معدنية من الألمنيوم ..... ٤٧
- الشكل ٤-٢: شكل نمطي لعاكس زاوي ..... ٤٧
- الشكل ٤-٣: فخ مربوط بطائرة مقاتلة ..... ٤٨
- الشكل ٤-٤: شكلاً نمطياً للتشويش البؤري ..... ٤٩
- الشكل ٤-٥: طريقة عمل التشويش المنزلق ..... ٤٩
- الشكل ٤-٦: شكلاً نمطياً للتشويش السدي ..... ٥٠
- الشكل ٤-٧: مبدأ عمل المشوش التكراري ..... ٥١
- الشكل ٤-٨: المخطط الصندوقي للمشوش المكرر المعتمد على الذاكرة الرقمية ..... ٥٢
- الشكل ٤-٩: الإشارة على دخل مستقبل رادار SAR حال هدف نقطي و  $f_j = 50 \text{ MHz}$  ..... ٥٧
- الشكل ٤-١٠: خرج عملية الضغط بالمدى في حال هدف نقطي ..... ٥٨
- الشكل ٤-١١: خرج عملية تصحيح الخلايا بالمدى ..... ٥٨
- الشكل ٤-١٢: خرج عملية الضغط بالمدى المتعامد في حال هدف نقطي ..... ٥٩
- الشكل ٤-١٣: الإشارة على دخل مستقبل رادار SAR حال هدف نقطي و  $f_j = 50 \text{ MHz}$  ..... ٦٠
- الشكل ٤-١٤: خرج عملية الضغط بالمدى في حال هدف نقطي ..... ٦٠

- الشكل ٤-١٥: خرج عملية تصحيح الخلايا بالمدى ..... ٦١
- الشكل ٤-١٦: خرج عملية الضغط بالمدى المتعامد في حال هدف نقطي ..... ٦١
- الشكل ٤-١٧: الإشارة على دخل مستقبل رادار SAR في حال هدف نقطي و  $f_j = 300 \text{ MHz}$  ..... ٦٢
- الشكل ٤-١٨: خرج عملية الضغط بالمدى في حال هدف نقطي ..... ٦٢
- الشكل ٤-١٩: خرج عملية تصحيح الخلايا بالمدى ..... ٦٣
- الشكل ٤-٢٠: خرج عملية الضغط بالسمت في حال هدف نقطي ..... ٦٣
- الشكل ٤-٢١: الإشارة على دخل مستقبل رادار SAR في حال هدف عبارة عن مركبة عسكرية و ..... ٦٣
- .....  $T_m = 0.08 \mu s$  ..... ٦٤
- الشكل ٤-٢٢: خرج عملية الضغط بالمدى في حال هدف عبارة عن آلية عسكرية ..... ٦٥
- الشكل ٤-٢٣: خرج عملية تصحيح الخلايا بالمدى ..... ٦٥
- الشكل ٤-٢٤: خرج عملية الضغط بالمدى المتعامد في حال هدف عبارة عن آلية عسكرية ..... ٦٦
- الشكل ٤-٢٥: مقارنة بين شكل الأهداف الخداعية وشكل الهدف الحقيقي ..... ٦٦

## قائمة الجداول

٢٨	..... الجدول (١-٢): معاملات الأهداف
٢٩	..... الجدول (٢-٢): معاملات منطقة الأهداف
٢٩	..... الجدول (٣-٢): معاملات النبضة المرسللة
٣٨	..... الجدول (١-٣): معاملات الرادار

## الاختصارات

AF	Ambiguity Function
DRFM	Digital Radio Frequency Memory
ECCM	Electronic Counter-counter Measurements
ECM	Electronic Counter Measurements
EMC	Electromagnetic Compatibility
LFM	Liner Frequency Modulation
NLFM	Non Linear Frequency Modulation
RCMC	Range Cell Migration correction
SAR	Synthetic Aperture Radar
SNR	Signal to Noise Ratio

## الرموز

$\tau$	عرض النبضة المرسله
$T_0$	الدور التكراري النبضي
$R$	مدى الهدف
$c$	سرعة الضوء
$\Delta t$	الفرق الزمني بين لحظة إرسال النبضة الرادارية واستقبال النبضة المنعكسة عن الهدف
$\delta_r$	تمييزية الرادار في المدى
$\delta_{cr}$	تمييزية الرادار في المدى المتعامد
$B$	عرض المجال الترددي للنبضة المرسله
$\theta_B$	عرض حزمة الهوائي
$\lambda$	طول الموجة
$D$	قطر فتحة الهوائي
$D_{SAR}$	الطول الكلي للهوائي المصفوفاتي التركيب
$\theta_{sq}$	زاوية الانحراف
$N_0$	الكثافة الطيفية للاستطاعة للضجيج الأبيض.
$f_d$	هو تردد انزياح دوبلر للهدف
$f_0$	تردد عمل الرادار المركزي
$\alpha$	ثابت التعديل
$X_c$	مركز منطقة الأهداف في المدى
$Y_c$	مركز منطقة الأهداف في المدى المتعامد
$\delta(\cdot)$	نبضة دلتا لديراك
$t_n$	الفاصل الزمني بين لحظة إرسال النبضة ولحظة استقبال النبضة المنعكسة عن الهدف $n$
$\sigma_n$	انعكاسية الأهداف
$\eta$	الزمن البطيء
$L_a$	الطول الفيزيائي للهوائي
$V_p$	سرعة المنصة الحاملة للرادار
$f_j$	تردد التشويش

## مقدمة عامة

الرادار هو عبارة عن نظام راديوي يتألف من مرسل ومستقبل وهوائي، يقوم بكشف الأهداف من خلال إرسال موجة كهرومغناطيسية باتجاه محدد، وفي حال وجود هدف في هذا الاتجاه فإن جزءاً من الموجة المرسله سوف ينعكس باتجاه الرادار. يُجمّع هوائي الاستقبال الأمواج المنعكسة ويمريرها إلى المستقبل الذي يعمل على معالجتها واستخلاص إشارة الأهداف وتحديد المعاملات الأساسية لها مثل: المدى والسرعة والاتجاه. كما يمكن أن يقوم الرادار بتحديد طبيعة الأهداف المكتشفة وذلك حسب درجة تعقيد الرادار المستخدم.

تختلف أنواع الرادارات حسب تطبيقاتها واستخداماتها، فمنها ما يستخدم لتطبيقات مدنية كرادارات المرور ورادارات الأرصاد الجوية، ومنها يستخدم لتطبيقات عسكرية كرادارات الكشف ورادارات الملاحقة. كما تستخدم بعض أنواع الرادارات في تطبيقات مدنية وعسكرية مثل رادارات التصوير بشكل عام ورادارات الفتحة التركيبية بشكل خاص.

يعتبر رادار الفتحة التركيبية من أهم رادارات التصوير حيث يستخدم لتصوير مشاهد أرضية لأغراض مدنية و/أو عسكرية وتحديد أماكن المواقع الهامة للعدو ومواقع تركز قواتها أثناء فترات السلم والحرب. تتميز رادارات التصوير عن أنظمة التصوير الفوتوغرافية بقدرته على العمل ليلاً ونهاراً وفي كافة الظروف المناخية. تُصنف رادارات الفتحة التركيبية ضمن الأنظمة الرادارية عالية الدقة (التمييزية). تستخدم هذه الرادارات تقنية ضغط النبضات الرادارية للحصول على صورة رادارية عالية الدقة. تعتمد هذه التقنية على إرسال نبضة عريضة معدلة طورياً و/أو ترددياً، وفي المستقبل يجري ضغط هذه النبضة العريضة إلى نبضة ضيقة زمنياً من خلال ترشيحها بمرشح متوافق مع النبضة المرسله، والذي يمكننا من الحصول على تمييزية عالية للرادار.

تعتبر الرادارات من أهم الأنظمة الإلكترونية العسكرية في الحرب الحديثة، حيث مكّنت من التغلب على عنصر المفاجأة لطائرات العدو وساعدت في حشد وسائل الدفاع الجوي والطائرات المقاتلة باكراً لمواجهةها. يلجأ العدو عادة إلى استخدام إجراءات معاكسة إلكترونية (ECM) *Electronic Counter Measurements* للتشويش على هذه الرادارات أو خداعها بأهداف كاذبة من أجل إبطال فعاليتها. لَمَّا كانت رادارات الـ SAR هي رادارات ذات تطبيقات خاصة فيمكن استخدام إجراءات المعاكسة الإلكترونية نفسها المستخدمة لإبطال فعالية الرادارات عموماً مع الأخذ بعين الاعتبار خصائص إشاراتها من حيث عرض المجال وغيره.

يهدف هذا العمل إلى دراسة بعض إجراءات المعاكسة الإلكترونية المستخدمة عموماً للتشويش على الرادارات وإمكانية استخدام المكررات للتشويش على رادارات الفتحة التركيبية الشرائطية. يمكن لهذه المشوشات التكرارية تشويه الصورة الرادارية من خلال توليد أهداف خداعية عن طريق تعديل إشارة الرادار ترددياً أو طورياً.

نظراً لعدم وجود خبرة أو أعمال سابقة حول رادارات الفتحة التركيبية كان لزاماً علينا بدايةً دراسة مبدأ عملها على نحو عام مع التركيز على دراسة ومحاكاة رادارات المسح الشرائطي. لما كانت هذه الرادارات تستخدم تقنية ضغط النبضات للحصول على صور عالية الدقة فقد قمنا بدراسة مبدأ عمل هذه التقنية وميزاتها بالمقارنة مع الرادارات التقليدية.

تتكون الأطروحة من أربعة فصول. يعرض الفصل الأول مدخلاً إلى رادارات الفتحة التركيبية ومفاهيمه الأساسية وأنماط عمله وتطبيقاته المختلفة. يقدم الفصل الثاني دراسة مرجعية عن رادارات ضغط النبضات عموماً وميزاتها بالمقارنة مع الرادارات التقليدية، مع التركيز على الرادارات التي ترسل نبضات معدلة تعديلاً ترددياً خطياً LFM. كما يعرض هذا الفصل خصائص تابع الغموض المستخدم في تقويم الإشارات الرادارية المختلفة. وأخيراً، يعرض هذا الفصل طريقتين لتنفيذ عملية ضغط النبضات: باستخدام مرشح متوافق وباستخدام المرشح المتوافق بالإشارة المرجعية. يقدم الفصل الثالث دراسة نظرية لرادار الفتحة التركيبية من النوع stripmap، تتضمن الإشارات المرسل والمستقبل والمعالجة الرقمية لهذه الإشارات باستخدام الخوارزمية مدى-دوبلر، وإجراء محاكاة لها ضمن بيئة ماتلاب. وأخيراً، يعرض الفصل الرابع بعض أنواع التشويش الفعالة وغير الفعالة المستخدمة للتشويش على الرادارات عموماً مع التركيز على المشوشات التكرارية. ومن ثم يقدم الفصل طريقة للتشويش على رادار stripmap مفترض باستخدام مشوش تكراري آني يُعدل إشارة الرادار ترددياً أو طورياً، وإجراء محاكاة لعمل هذا المشوش ضمن بيئة ماتلاب. تنتهي الأطروحة بخاتمة تتضمن أهم النتائج التي تم عرضها في الأطروحة وأفاق مستقبلية لمتابعة العمل في هذا المجال.

# الفصل الأول

## مدخل إلى رادار الفتحة التركيبية

يتضمن هذا الفصل مقدمة ومدخل إلى رادارات الفتحة التركيبية ومفاهيمه الأساسية وأتماط عمله وتطبيقاته المختلفة

### ١.١.١ مقدمة

رادار الفتحة التركيبية (Synthetic Aperture Radar) هو أحد أنواع رادارات التصوير (Imaging Radars) تركيب على طائرة أو قمر صناعي. وتستخدم على نحو أساسي في تصوير أهداف أو مناطق لأغراض متنوعة مدنية وعسكرية. ويتميز هذا النوع من الرادارات بإمكانية العمل في الليل والنهار وفي كافة الظروف المناخية على عكس أنظمة التصوير الفوتوغرافية التي لا تستطيع العمل ليلاً ولا في المناخ الغائم.

تم تطوير رادار الفتحة التركيبية في الخمسينيات من القرن العشرين (1950's) لأغراض عسكرية، وفي السبعينيات من القرن نفسه (1970's) أصبحت تستخدم أيضاً في التطبيقات المدنية.

### ٢.١.١ تعاريف أساسية

#### الرادار النبضي

يعمل الرادار النبضي على إرسال إشارة كهروطيسية خلال نبضة بعرض  $\tau$ ، وذلك خلال دور  $T_0$  يسمى الدور النبضي التكراري، كما نسمي مقلوبه التردد التكراري النبضي، وبعد الانتهاء من إرسال النبضة يبدأ المستقبل بالعمل حتى بداية إرسال نبضة جديدة. [٤]

تكون أغلب الإشارات المستقبلية ناتجة عن الضجيج بالإضافة إلى الإشارات المنعكسة عن الأهداف، أو الأجسام الثابتة كالتضاريس الطبيعية وأمواج البحار وغيرها، نسمي هذه الإشارات بالأصداء.

يعطى مدى الهدف،  $R$  بالعلاقة التالية:

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2}$$

حيث:  $\Delta t$  الفرق الزمني بين لحظة إرسال النبضة الرادارية واستقبال النبضة المنعكسة عن الهدف.  
 $c$  سرعة الضوء.

**الدقة (التمييزية) في المدى (Range Resolution):** هي قدرة الرادار على التمييز (الفصل) بين هدفين يقعان على خط النظر نفسه الواصل بين هوائي الرادار ومنطقة الهدف. [١]

تعطى تمييزية الرادار في المدى من العلاقة:

$$\delta_r = \frac{c\tau}{2}$$

حيث:  $\tau$  عرض النبضة المرسلة.

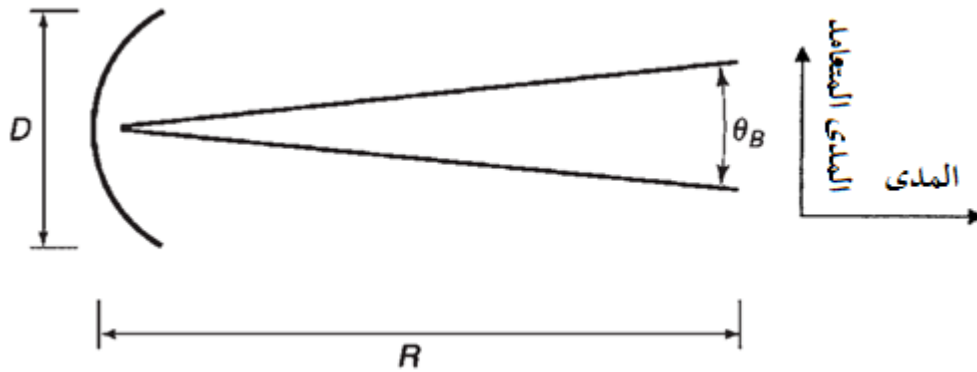
وبالتالي لتحقيق تمييزية عالية في الرادار النبضي التقليدي يجب إرسال نبضات ضيقة، ولكن إرسال نبضات ضيقة باستطاعة عالية لها مساوئ عدة، يتم التخلص منها بإرسال نبضات عريضة باستطاعة منخفضة بعد تعديلها ترددياً أو طورياً -تقنية ضغط النبضة الرادارية، سنناقشها لاحقاً- حيث تعطى التمييزية في المدى عند استخدام تقنية ضغط النبضات بالعلاقة التالية:

$$\delta_r = \frac{c}{2B}$$

حيث:  $B$  عرض المجال الترددي للنبضة المرسلة.

من العلاقة السابقة نلاحظ أننا نستطيع تحقيق تمييزية عالية بزيادة عرض المجال الترددي للنبضة المرسلة. [٤]

يبين الشكل ١-١ رسماً توضيحياً لكل من المدى والمدى المتعامد، تتطلب الرادارات المحمولة على الطائرات أو الأقمار الصناعية والمخصصة لأغراض التصوير الأرضية دقة عالية (تمييزية عالية) وذلك للحصول على صور عالية الدقة.



الشكل ١-١: رسماً توضيحياً يبين المدى والمدى الأفقي للرادار

**الدقة (التمييزية) في المدى المتعامد (Cross Range Resolution):** هي قدرة الرادار على التمييز (الفصل) بين هدفين يقعان في نفس المستوي الأفقي المتعامد مع خط النظر الواصل بين هوائي الرادار ومنطقة الهدف. [١]

تعطى تمييزية الرادار في المدى المتعامد بالعلاقة التالية:

$$CR = R \cdot \theta_B$$

حيث:  $\theta_B$  عرض حزمة الهوائي.

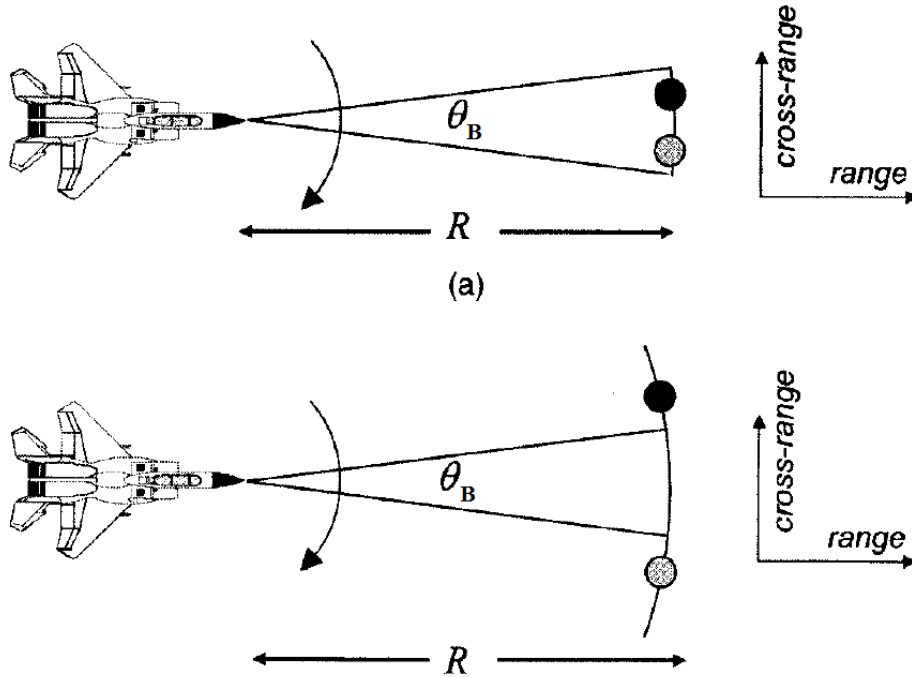
في حال هوائي قطر فتحة  $D$ ، فإن عرض حزمة هذا الهوائي بالرادبان عند طول موجة  $\lambda$  يعطى بالعلاقة التالية:

$$\theta_B \approx \frac{\lambda}{D}$$

وبالتالي يمكن إعادة كتابة التمييزية في المدى المتعامد على النحو التالي:

$$\delta_{cr} \approx \frac{\lambda \cdot R}{D}$$

يبين الشكل ١-٢ حالتين: الأولى (a) الرادار غير قادر على التمييز بين الهدفين في المدى المتعامد، والثانية (b) الرادار قادر على التمييز بين الهدفين.



الشكل ١-٢: مثال نمطي يوضح التمييزية في المدى المتعامد

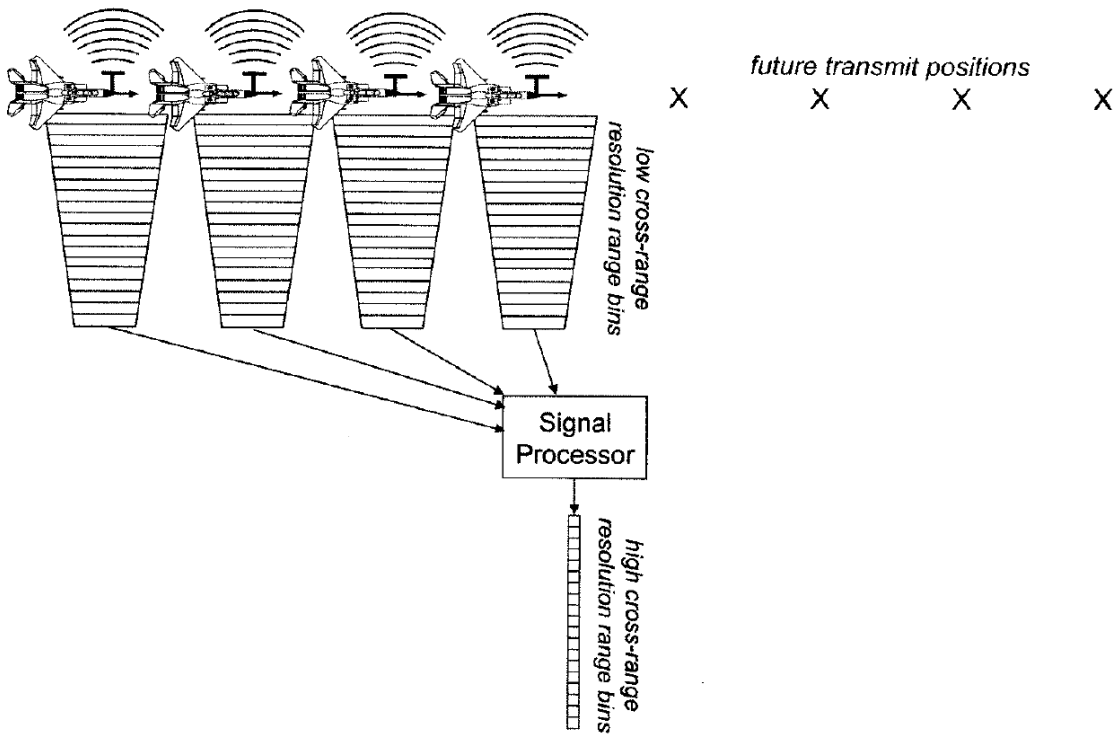
ملاحظة: عموماً نطلق على التمييزية العالية بالدقة الناعمة وعلى التمييزية المنخفضة بالدقة الخشنة.

على سبيل المثال: في حال رادار يعمل بطول موجة  $\lambda = 3 \text{ cm}$  (X Band) وكان قطر هوائي الرادار  $D = 2 \text{ m}$  وكان الهدف على بعد  $R = 100 \text{ Km}$  فإن تمييزية الرادار في المدى المتعامد تساوي  $\delta_{cr} = 1.5 \text{ Km}$ . وهذه التمييزية سيئة وغير

مقبولة في أنظمة التصوير الراداري. [٢]

### ٣.١. مبدأ رادار الفتحة التركيبية

للحصول على تمييزية عالية في المدى المتعامد يجب أن يكون عرض حزمة الهوائي صغير جداً (أي أن  $\theta_B$  صغيرة جداً)، وبالتالي يجب أن تكون أبعاد الهوائي كبيرة جداً. لما كانت رادارات التصوير تكون عادة محمولة على منصة (طائرة أو قمر صناعي) فإن أبعاد الهوائي الفيزيائية لهذه الرادارات تكون محدودة بأبعاد المنصة. عملياً يمكن الاستفادة من حركة المنصة وتشكيل هوائي ضيق الحزمة، تبعاً من حركة المنصة باعتبار أن الهوائي المحمول في موقع معين يشكل عنصر من مصفوفة هوائيات، كما في الشكل ٣-١. [١]



الشكل ٣-١: مبدأ رادار الفتحة التركيبية

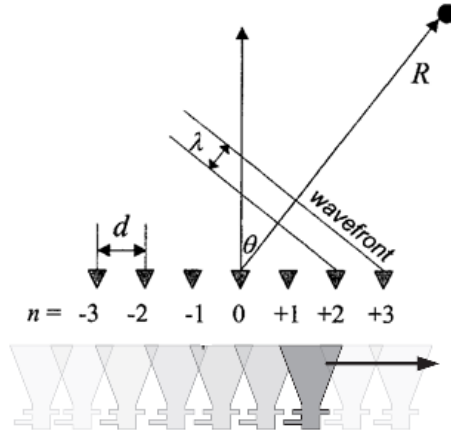
تطلق صفة "التركيبية" على هذا النوع من الرادارات لكونه يشكل مصفوفة هوائيات من هوائي وحيد عند عدة مواقع من مسار المنصة. عند كل موقع يتم إرسال واستقبال النبضات وعند نهاية المسار يقوم معالج بتجميع الإشارات المستقبلية على نحو متماسك للحصول على دقة عالية في المدى المتعامد.

إن جميع العناصر في الهوائيات المصفوفاتية التقليدية تعمل في الوقت نفسه في الإرسال والاستقبال، لذلك يكون مركز حزمة الاشعاع في منتصف البنية الفيزيائية للهوائي المصفوفاتي. أما في الهوائيات المصفوفاتية التركيبية فالأمر مختلف حيث في لحظة

معينة يعمل هوائي عنصري واحد، وبالتالي يكون مركز حزمة الاشعاع في منتصف الهوائي العنصري ومنه يختلف مخططه الإشعاعي عن المخطط الإشعاعي للهوائيات المصفوفاتية التقليدية.

بفرض أن لدينا مصفوفة هوائيات خطية منتظمة، كما في الشكل ١-٤، البعد بين عنصرين متجاورين فيها يساوي  $d$ . وبافتراض أن لدينا هدف بعده  $R$  عن مركز هذه المصفوفة، وهو كبير جداً مقارنة مع حجم الهوائي، فإن بُعد الهدف عن العنصر  $n$  في المصفوفة يساوي بتقريب جيد:

$$R_n = R - nd \sin(\theta)$$



الشكل ١-٤: هندسية هوائي مصفوفاتي تركيب

نفترض أن الإشارة المرسله من الهوائي العنصري رقم  $n$  هي  $exp(j\Omega t)$ ، فإن الإشارة المستقبله من نفس الهوائي العنصري هي:

$$y_n(t) = \exp \left\{ j\Omega \left[ t - \frac{2}{c} (R - nd \sin(\theta)) \right] \right\}$$

في حال جرى تجميع الإشارات المستقبله على مخارج عناصر الهوائي أمكن كتابة إشارة الخرج كما يلي:

$$y(t) = \sum_{n=-M}^{+M} y_n(t) = \sum_{n=-M}^{+M} \exp \left\{ j\Omega \left[ t - \frac{2}{c} (R - nd \sin(\theta)) \right] \right\}$$

$$y(t) = e^{j\Omega t} e^{-j4\pi R/\lambda} \sum_{n=-M}^{+M} \exp[-j\Omega(R - nd \sin(\theta))]$$

$$y(t) = e^{j\Omega t} e^{-j4\pi R/\lambda} \left\{ \frac{1}{2M+1} \frac{\sin[(2M+1)\Omega d \sin(\theta/c)]}{\sin(\Omega d \sin(\theta/c))} \right\}$$

في حال اعتبرنا أن عرض حزمة الهوائي هو عرض الفص الرئيسي لنخطط إشعاع الهوائي (null-to-null)، فيمكننا حساب الزاوية الأولى التي ينعدم عندها مخطط الإشعاع بجعل زاوية تابع الجيب في العلاقة السابقة مساوياً لـ  $\pi$ ، وبالتالي:

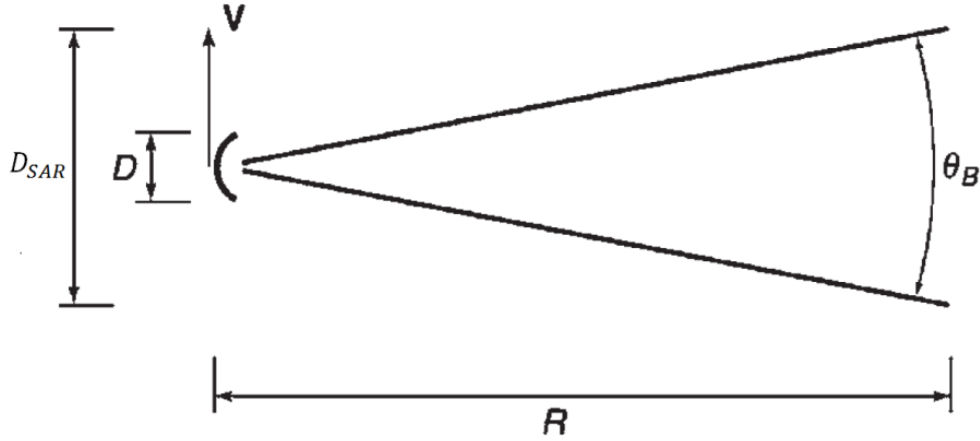
$$\sin(\theta_{SAR}) \approx \theta_{SAR} = \frac{\lambda}{2D_{SAR}}$$

حيث:  $D_{SAR} = (2M + 1)d$  يمثل الطول الكلي للهوائي المصفوفاتي التركيبي وعملياً يساوي طول مسار المنصة. أي أن عرض حزمة الهوائي المصفوفاتي التركيبي يساوي نصف عرض حزمة الهوائي المصفوفاتي التقليدي.

بالنتيجة، فإن الدقة في المدى المتعامد في حال هوائي مصفوفاتي تركيبي، الشكل ١-٥، تساوي:

$$\delta_{cr} = R \cdot \theta_{SAR}$$

$$\delta_{cr} = \frac{R\lambda}{2D_{SAR}}$$



الشكل ١-٥: الدقة في المدى المتعامد عند استخدام هوائي مصفوفاتي تركيبي.

على سبيل المثال، في حال رادار يعمل بطول موجة  $\lambda = 3 \text{ cm}$  (X Band) وكان طول الهوائي التركيبي  $D_{SAR} = 5 \text{ Km}$  ويبعد هذا الهوائي  $R = 100 \text{ Km}$  عن منطقة الهدف، فإن تمييزية هذا الرادار في المدى المتعامد تساوي  $\delta_{cr} = 30 \text{ cm}$ ، وهي التمييزية تعتبر جيدة جداً! [٢]

#### ٤.١. أنماط عمل رادار الفتحة التركيبية

يمكن أن يعمل رادار الفتحة التركيبية وفق عدة أنماط تختلف عن بعضها البعض باتجاه المخطط الإشعاعي لهوائي الرادار أثناء عملية التصوير. يمكن أن يكون الهوائي عبارة عن هوائي وحيد يتم التحكم باتجاه مخططه الإشعاعي ميكانيكياً، أو ممكن أن يكون الهوائي عبارة عن مصفوفة هوائيات يتم التحكم باتجاه مخططها الإشعاعي كهربائياً.

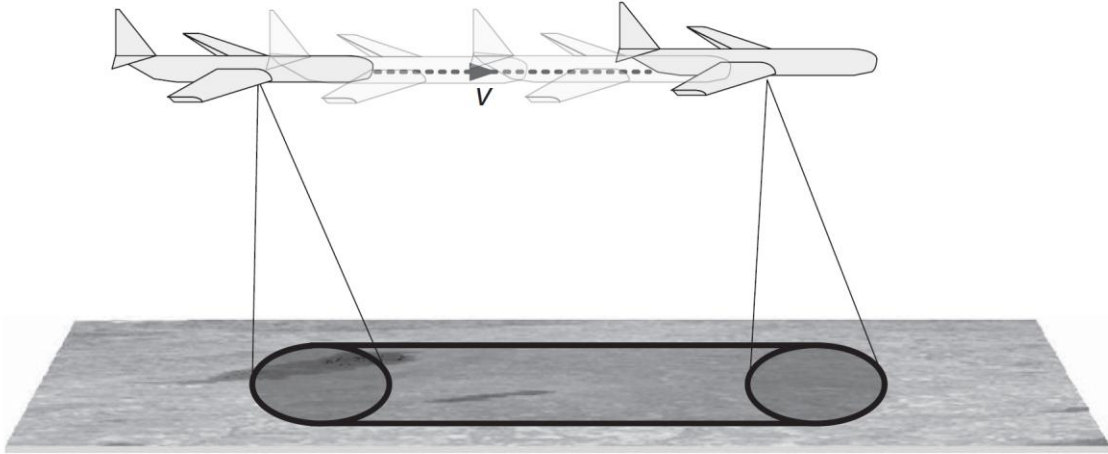
نبين فيما يلي أشهر أنواع (أنماط عمل) رادارات الفتحة التركيبية:

### ١.٤.١. رادار الفتحة التركيبية ذو المسح الشرائطي Stripmap

يسمى أيضاً "Search SAR" في هذا النوع من الرادارات تكون حزمة الهوائي دوماً عمودية على مسار الرحلة، ويمسح الهوائي منطقة جغرافية من سطح الأرض على شكل شريط مواز لمسار الرحلة، كما هو مبين في الشكل ١-٦. هذا النوع من الرادارات مفيد في الحالات التي تتطلب تصوير مساحات كبيرة من الأرض بدقة خشنة نسبياً في المدى المتعامد، تساوي

نصف قطر الهوائي، ضمن شروط مثالية:  $D \gg \lambda$  و  $SNR \gg 1$ : [٣]

$$\delta_{cr,stripmap} = \frac{D}{2}$$



الشكل ١-٦: طريقة عمل الرادار Stripmap SAR

في حال كانت حزمة الهوائي غير عمودية على مسار الرحلة عندها يسمى رادار الفتحة التركيبية بـ "Squinted Stripmap SAR" في هذه الحالة يصنع الناظم على مسار الرحلة مع حزمة الهوائي زاوية تدعى زاوية الانحراف ( $\theta_{sq}$ ).

تعطى التمييزية في المدى المتعامد في هذه الحالة بالعلاقة التالية: [٢]

$$\delta_{cr,squinted\ stripmap} = \frac{D \cos(\theta_{sq})}{2}$$

بافتراض أن  $R \gg D_{SAR}$  وزاوية الانحراف ثابتة خلال مرحلة تجميع المعطيات، وهذا محقق إذا كانت زاوية الانحراف أقل من 45 درجة.

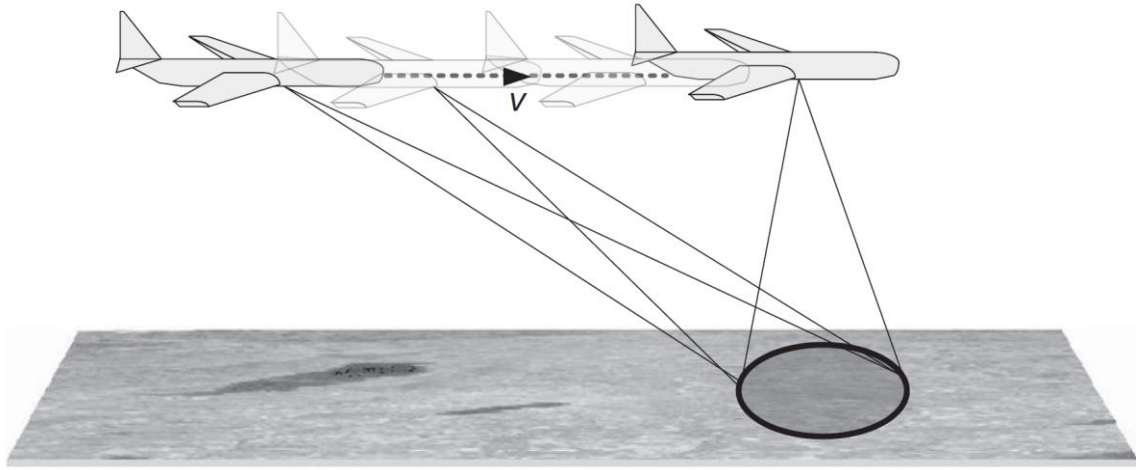
يعتبر رادار Stripmap SAR حالة خاصة من رادار Squinted Stripmap SAR عندما تكون فيه زاوية الانحراف معدومة أي أن:

$$\theta_{sq} = 0$$

### ٢.٤.١. رادار الفتحة التركيبية ذو المسح البقعي Spotlight

يطلق على هذا النوع أيضاً اسم "Spot SAR" وفيه يتم تغيير اتجاه حزمة الهوائي بحيث تبقى تغطي الهدف المراد تصويره أثناء مرور المنصة فوقها. يمكن تغيير اتجاه هوائي الرادار إما كهربائياً أو ميكانيكياً كما ذكرنا سابقاً. يستخدم هذا النوع من الرادارات من أجل الحصول على صور ذات دقة عالية نسبياً لأهداف أو مناطق محددة ومعروفة مسبقاً. انظر الشكل ٧-١.

[٣]



الشكل ٧-١: طريقة عمل الرادار Spotlight SAR

تعطى الدقة في المدى الأفقي في هذه الحالة بالعلاقة التالية: [٢]

$$\delta_{cr,spotlight} = \frac{R\lambda}{2D_{SAR}\cos(\theta_{sq})}$$

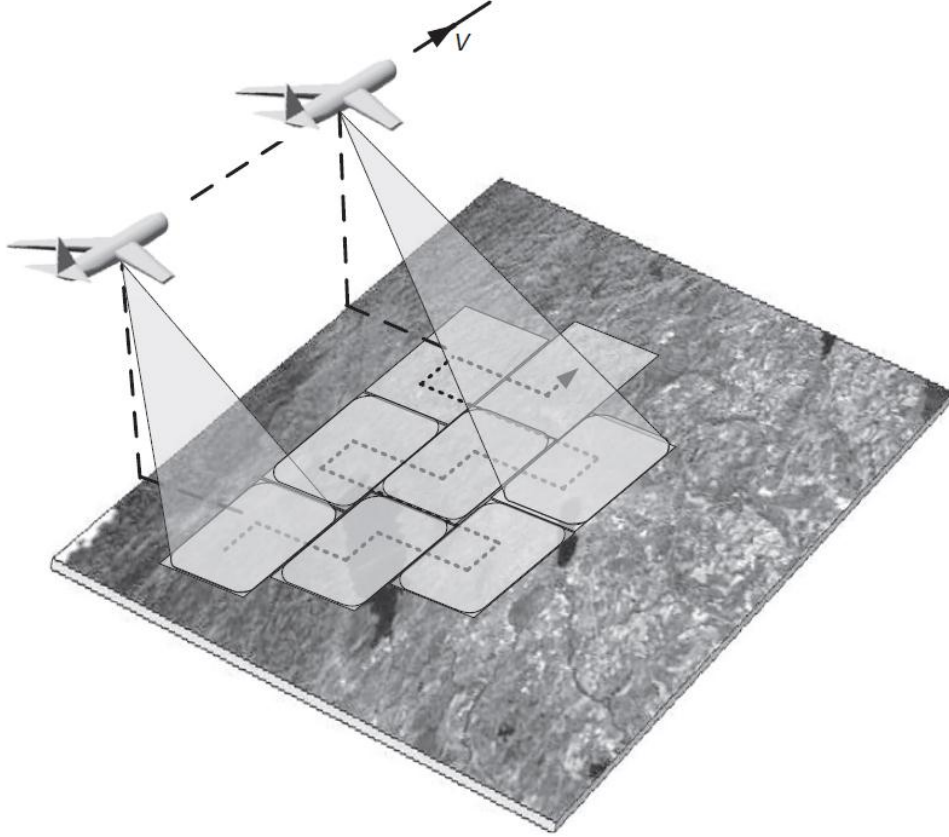
يبين المثال التالي تفوق أداء Spotlight على Stripmap من حيث التمييزية في المدى المتعامد. بافتراض أن لدينا رادار يعمل بطول موجة  $\lambda = 3 \text{ cm}$  (X Band) وطول الهوائي التركيبي  $D_{SAR} = 5 \text{ Km}$  وبعد منطقة الهدف عن الرادار تساوي  $R = 100 \text{ Km}$  وزاوية الانحراف معدومة  $\theta_{sq} = 0$  فإن التمييزية في المدى المتعامد في حالة Spotlight و Stripmap هي:

$$\delta_{cr,stripmap} = \frac{2 \text{ m}}{2} = 1 \text{ m}$$

$$\delta_{cr,spotlight} = \frac{100 \times 10^3 \times 0.03}{2 \times 5 \times 10^3 \times \cos(0)} = 0.3 \text{ m}$$

### ٣.٤.١. رادار الفتحة التركيبية ذو المسح المتعدد Scan

يستخدم هذا النوع من الرادارات عندما يكون ارتفاع المنصة كبيراً من أجل تغطية مساحة واسعة، يتم تقسيم المنطقة المراد تصويرها في هذه الحالة إلى عدة قطاعات حيث تقوم المنصة بتصوير القطاعات أثناء حركتها على نحو متتالي بطريقة تضمن عدم ترك فراغات بينها كما هو موضح في الشكل ١-٨. [٣]



الشكل ١-٨: طريقة عمل الرادار Scan SAR

إن اتساع المساحة المراد تصويرها يكون على حساب التمييزية في المدى المتعامد حيث أنها تسوء بزيادة المدى  $R$ .

### ٥.١. تطبيقات رادارات الفتحة التركيبية

تستخدم رادارات الفتحة التركيبية في العديد من التطبيقات المدنية نذكر منها [٥]:

✓ الكشف عن التسريبات التي تحدث في المحيطات وتتبع السفن التي أحدثتها، أو الكشف عن التسريبات الطبيعية من حقول النفط.

- ✓ دراسة الأصداء المنعكسة عن سطح البحر والمرتبطة بالرياح والأمواج والدوامات والأمواج الداخلية.
- ✓ استنتاج تضاريس قاع المحيطات في المياه الضحلة.
- ✓ مراقبة أمواج البحار واتجاهاتها من أجل التنبؤ بحال البحر ومناخه.
- ✓ رصد ومراقبة الكتل الجليدية بالقرب من قطبي الكرة الأرضية وتوفير تلك المعلومات للسفن التي تسير في تلك المناطق.
- ✓ مراقبة استخدام الأراضي الزراعية والغابات وخاصة في المناطق المدارية. نتيجة قدرة رادارات الفتحة التركيبية على العمل في المناخ الغائم.
- ✓ الاستفادة من المعلومات التي تقدمها رادارات الفتحة التركيبية في تحديث صور الأقمار الصناعية للأرض.
- ✓ رصد وتقييم الأضرار الناتجة عن الفيضانات والزلازل والكوارث الأخرى، وتحسين الاستجابة لنداءات الاستغاثة.
- ✓ المساعدة في تخطيط العمراني للمدن.

كما تستخدم في العديد من التطبيقات العسكرية نذكر منها:

- ✓ جمع المعلومات الاستخباراتية عن مواقع وعتاد العدو في حالة السلم، ورصد تحركات العدو في زمن الحرب.
- ✓ مراقبة أرض المعركة وتوجيه القوات البرية والبحرية.
- ✓ مراقبة تحركات القوات الصديقة بهدف التنسيق معها.
- ✓ تزويد أنظمة الصواريخ وغيرها من الأسلحة بمواقع العدو.

## ٦.١. خاتمة

تعرفنا من خلال هذا الفصل على رادارات الفتحة التركيبية بشكل عام، من حيث مبدأ عمل هذا النوع من الرادارات، وأنماط عملها وتطبيقاتها.

## الفصل الثاني

### رادارات ضغط النبضة

يتضمن هذا الفصل دراسة نظرية لرادارات ضغط النبضات المعدلة تعديلاً ترددياً خطياً LFM.

#### ١.٢ . مقدمة

يمكن لرادار الفتحة التركيبية SAR تحسين الدقة في المدى المتعامد فقط دون أن يؤثر ذلك على دقة الرادار في المدى. يجب عملياً أن تمتلك رادارات SAR دقة عالية في المدى من أجل الحصول على صور عالية الدقة. يمكن للرادار أن يحقق دقة عالية في المدى من خلال إرسال نبضات ذات عرض زمني صغير، ولكن هذا يتطلب منه إرسال نبضات باستطاعة عالية حتى يزيد من طاقة النبضات المرسله، وبالتالي تمكين الرادار من كشف أهداف ذات مقاطع رادارية صغيرة. لحسن الحظ، فإن تمييزية الرادار في المدى ترتبط بعرض المجال الترددي للنبضات المرسله وليس بعرضها الزمني. ومنه، يمكن تحقيق إمكانية كشف جيدة للأهداف الصغيرة وتمييزية عالية في المدى عن طريق إرسال نبضات عريضة بالزمن مُعدلة ترددياً أو طورياً باستطاعة منخفضة نسبياً. عملياً، نحصل على نبضات ضيقة على خرج المستقبل بعد تمرير النبضات المنعكسة عن الأهداف عبر مرشح متوافق مع النبضات المرسله. تُسمى الرادارات التي تستخدم هذه التقنية برادارات ضغط النبضة.

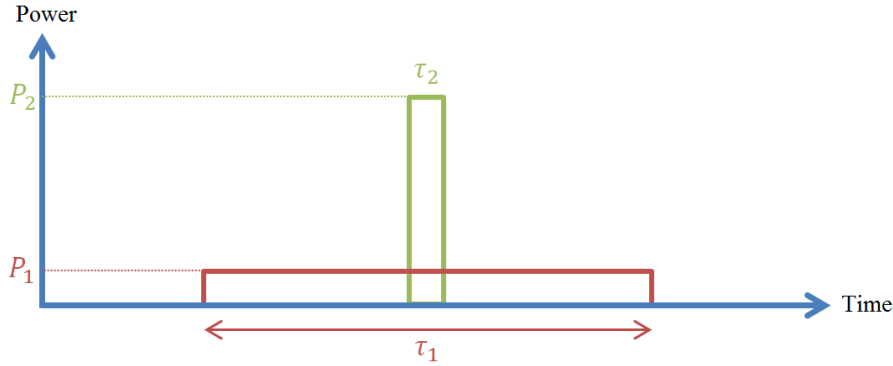
#### ٢.٢ . مبدأ عمل رادارات ضغط النبضة

تُرسل الرادارات النبضية التقليدية نبضات ضيقة (غير مُعدلة) باستطاعة عالية. عملياً، كلما كانت النبضات المرسله أضيق كلما ازدادت تمييزية الرادار في المدى، وكلما ازدادت استطاعة هذه النبضات كلما ازداد مدى كشف الرادار. من ناحية أخرى، يسمح إرسال نبضات ضيقة برفع نسبة الأهداف إلى الأصداء، وذلك نظراً لتناقص نسبة الأصداء المحتواة ضمن خلية التمييزية مقارنة مع إشارة الهدف. فضلاً عن ذلك، فإن الرادار يكون أكثر مقاومة ضد حدوث تعدد المسارات، تسمح التمييزية العالية في المدى للرادار بإمكانية الفصل بين إشارة الصدى للهدف عن باقي الإشارات المرتدة عن العواكس الأخرى والمسارات المتعددة.

عادةً ما تستخدم هذه الرادارات صمامات لتوليد نبضات باستطاعة عالية [٦]. إن عملية استخدام الصمامات في الرادارات النبضية له العديد من المساوئ نذكر منها على سبيل المثال:

- ثمنها الباهظ وصعوبة تأمينها وقصر عمرها التشغيلي.
- احتياجها إلى دارات تغذية عالية الجهد، والذي يزيد من تعقيد مسائل الوثوقية والأمان وزيادة التكلفة والحجم والوزن.

يرتبط مدى كشف الرادار بطاقة النبضات المرسله وليس فقط باستطاعتها. لذلك يمكننا تأمين مدى كشف كبير للرادار عن طريق إرسال نبضات عريضة باستطاعة منخفضة نسبياً عوضاً عن إرسال نبضات ضيقة باستطاعة عالية، انظر الشكل ١-٢.

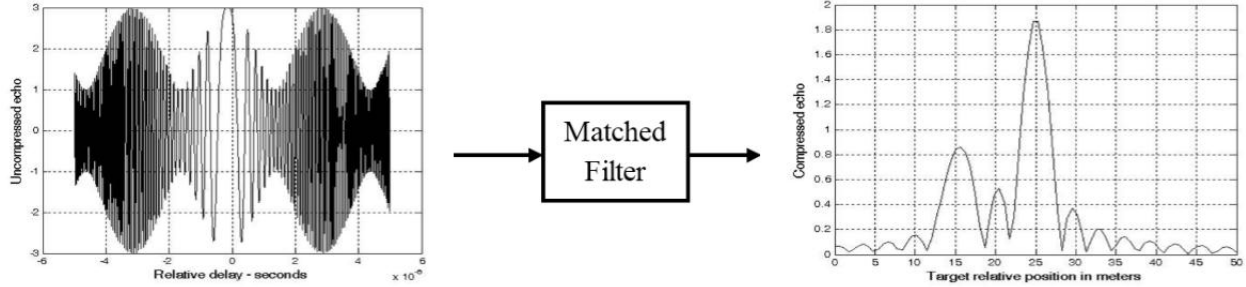


الشكل ١-٢: نبضة رادار عريضة باستطاعة منخفضة وأخرى ضيقة باستطاعة عالية لهما الطاقة نفسها.

إن تمييزية رادار تقليدي - كما ذكرنا في الفصل الأول - في المدى يرسل نبضات بعرض  $\tau$  تساوي  $\delta_r = \frac{c\tau}{2}$ ، حيث  $c$  سرعة الضوء. وبالتالي، فإن إرسال نبضات عريضة يؤدي إلى تقليل تمييزية الرادار بالمدى. ولكن لحسن الحظ، تُحدّد تمييزية الرادار في المدى من خلال عرض النبضة على خرج المستقبل وليس من خلال عرض النبضة المرسله. أكثر من ذلك، إن عرض النبضة على خرج المستقبل الأمثل يتناسب عكساً مع عرض المحتوى الترددي للنبضات المرسله وليس مع عرضها الزمني. تستفيد الرادارات الحديثة من هذه الخاصية، وتعرف هذه الرادارات برادارات ضغط النبضة [٦].

تجمع تقنية ضغط النبضة بين ميزات النبضات الضيقة (تمييزية عالية في المدى) وميزات النبضات العريضة (مدى الكشف الكبير)، إضافة إلى تفاديها إرسال نبضات باستطاعات عالية جداً. في هذه التقنية يجري إرسال نبضات عريضة باستطاعة منخفضة نسبياً ولكنها مُعدّلة من أجل زيادة عرض مجالها الترددي. وفي المستقبل يتم ضغط النبضات المستقبله بعد تمريرها عبر مرشح متوافق مع النبضات المعدّلة المرسله، الأمر الذي يؤدي إلى ضغط النبضات المستقبله إلى نبضات ضيقة جداً ذات استطاعة عالية [1]. إن عرض النبضة الرادارية على خرج المرشح المتوافق تساوي  $\frac{1}{B}$ ، حيث  $B$  عرض المجال الترددي للنبضات المرسله. نسمي نسبة عرض النبضة  $\tau$  المرسله إلى عرض النبضة المضغوطة  $\frac{1}{B}$  بنسبة ضغط النبضة [٦]. تقدم رادارات ضغط

النبضة ربح معالجة تساوي النسبة السابقة؛ أي  $B\tau$ . كلما كانت هذه النسبة كبيرة كلما كان أداء الرادار أفضل. يبين الشكل ٢-٢ مثالاً توضيحياً على شكل النبضات المرسله والمستقبله في رادار ضغط نبضة وشكل النبضة المضغوطة على خرج المرشح المتوافق.



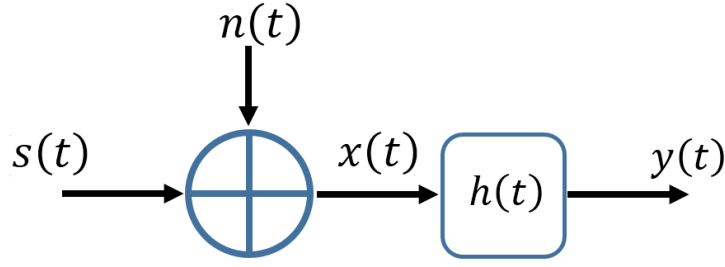
الشكل ٢-٢: مثال توضيحي على تقنية ضغط النبضة.

تسمح رادارات ضغط النبضة بالحصول على أغلب ميزات النبضة القصيرة والتخلص من القيود العملية والتي تقضي بتحديد الاستطاعة العظمى. بالإضافة لذلك، فإن رادارات ضغط النبضات تتمتع بتوافقية كهرومغناطيسية *Electromagnetic compatibility (EMC)* عالية فيما بينها ومقاوماً للتداخلات البينية ومناعة عالية ضد المشوشات الضجيجية، نظراً لكون المرشح المتوافق في المستقبل الراداري يمرر الإشارات المتوافقة معه فقط.

### ٣.٢. المرشحات المتوافقة وتابع الغموض

يُستخدم المرشح المتوافق *Matched Filter* على نحو واسع في نظم الاتصالات والرادارات من أجل تعظيم نسبة استطاعة الإشارة إلى استطاعة الضجيج *SNR* (Signal to Noise Ratio) على خرج المستقبل. يحقق المرشح المتوافق أعلى نسبة *SNR* على خرجه بوجود ضجيج أبيض يتم إضافته إلى إشارة الدخل، وذلك بالمقارنة مع أي مرشح خطي آخر [٧].

عادة، يتم نمذجة الإشارة على دخل مستقبل راداري،  $x(t)$ ، على أنها الإشارة الرادارية المنعكسة عن الأهداف، مضافاً إليها ضجيجاً أبيضاً  $n(t)$ ؛ أي:  $x(t) = s(t) + n(t)$ . سنفترض للتبسيط أن الإشارة المنعكسة عن هدف ما هي نسخة مؤخرة (هدف ثابت) ومخمدة عن الإشارة الرادارية المرسله،  $s(t)$ ؛ أي  $r(t) = as(t - t_d)$ . وللتبسيط سنفترض أن  $t_d = 0$  و  $a = 1$ ، انظر الشكل ٣-٢.



الشكل ٢-٣: نموذج مستقبل راداري بوجود ضجيج أبيض جمعي

تُعطى الاستجابة النبضية للمرشح المتوافق مع الإشارة الرادارية المرسل بالعلاقة التالية:

$$h(t) = s^*(-t)$$

وبالتالي، يمكن كتابة خرج المرشح المتوافق،  $y(t)$ ، على النحو التالي:

$$y(t) = x(t) * h(t) = (s(t) + n(t)) * s^*(-t)$$

حيث يشير الرمز \* إلى جداء الطي (التلاف) convolution.

تُعطى نسبة استطاعة الإشارة إلى استطاعة الضجيج العظمى اللحظية بالعلاقة التالية:

$$SNR = \frac{2E}{N_0}$$

حيث  $N_0$  الكثافة الطيفية للاستطاعة للضجيج الأبيض.

ربح المعالجة الذي يضيفه المرشح المتوافق، والذي يُسمى أيضاً بربح الضغط compression gain، يساوي نسبة

استطاعة الإشارة إلى استطاعة الضجيج على خرج المرشح،  $SNR_0$ ، إلى نسبة استطاعة الإشارة إلى استطاعة

الضجيج على دخل المرشح،  $SNR_i$ ، ويساوي:

$$\frac{SNR_0}{SNR_i} = \frac{\frac{2E}{N_0}}{\frac{E}{N_0BT}} = 2BT$$

يُسمى المقدار  $BT$  بالجداء زمن-عرض الحزمة. في حال أرسل الرادار نبضات غير معدلة فإن  $B \approx 1/T$ ،

وبالتالي:  $BT \approx 1$ . من أجل زيادة ربح المعالجة تقوم رادارات ضغط النبضة بزيادة عرض مجال الإشارة المرسل

عن طريق تعديلها تعديلاً ترددياً أو طورياً.

في حال كانت استطاعة الإشارة أكبر بكثير من استطاعة الضجيج وكان دوبلر الهدف معدوماً فإن خرج المرشح

يساوي تابع الترابط الذاتي للإشارة المرسله؛ أي:

$$y(t) = R_{SS}(t)$$

يُحدد هذا التابع خصائص إشارة الرادار المرسله وتمييزته في المدى. يختلف شكل الإشارة على خرج المرشح تبعاً للنبضة المرسله. نرغب، عملياً، بأن يقترب خرج المرشح المتوافق من شكل النبضة الواحديه (نبضة ديراك). ولكن لسوء الحظ فإن شكل الإشارة على خرج المرشح المتوافق يبدي عموماً نبضة رئيسية إضافة إلى فصوص جانبية زمنية. تؤثر هذه الفصوص الجانبية سلباً على أداء الرادار. إضافة إلى ذلك، فإن الإشارة المنعكسة عن الأهداف تكون مزاحة ترددياً عن الإشارات الرادارية المرسله في حال كانت هذه الأهداف متحركة، لذا فإن المرشح لن يكون في هذه الحالة متوافقاً تماماً مع إشارات دخله، وهذا سيسبب فقداناً في SNR وتشوهاً في شكل الإشارة على خرج المرشح. نستخدم عموماً تابع الغموض، لدراسة وتقييم شكل الإشارة على خرج المرشح المتوافق بوجود انزياح دوبلر، ولمقارنة أداء وخواص مختلف الإشارات الرادارية المستخدمة في رادارات ضغط النبضة [٤].

يُستخدم تابع الغموض (AF) Ambiguity Function على نحوٍ أساسي من قِبَل مصممي الرادار لتقييم أداء الإشارات الرادارية المختلفة. يُساعد هذا التابع في معرفة خواص هذه الإشارة ومدى ملائمتها لتطبيق معين، كما أنه يُستخدم أيضاً لتحديد تمييزي دوبلر والمدى للرادار. وهو بطبيعته تابع للتأخير الزمني ولا انزياح دوبلر [٤].

يُعرّف تابع الغموض لإشارة  $s(t)$  بأنه مربع طوليلة تابع الترابط المتبادل ثنائي البعد  $|\chi(\tau, f_d)|^2$  بين إشارة ونسخة عنها مزاحة ترددياً بتردد دوبلر، أي:

$$|\chi(\tau, f_d)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) s^*(t - \tau) e^{j2\pi f_d t} dt \right|^2$$

حيث  $f_d$  هو تردد انزياح دوبلر للهدف. في هذه الحالة نفترض أن الهدف يقع عند مبدأ الاحداثيات.

## ٤.٢ . خصائص تابع الغموض

يتمتع تابع الغموض بالخواص الرئيسية التالية:

- القيمة الأعظمية لتابع الغموض تقع عند المبدأ؛ أي عندما  $(\tau, f_d) = (0,0)$ ، وتساوي  $4E^2$  لأن

$$\max[|\chi(\tau, f_d)|^2] = \max[|\chi(0,0)|^2] = (2E)^2$$

لذا فإن:

$$|\chi(\tau, f_d)|^2 \leq |\chi(0,0)|^2$$

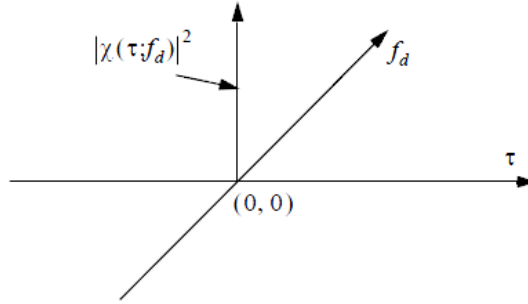
• تابع الغموض متناظر حول مبدأ الإحداثيات  $(0,0) = (\tau, f_d)$ ؛ أي:

$$|\chi(\tau, f_d)|^2 = |\chi(-\tau, -f_d)|^2$$

الحجم الكلي الذي يحصره تابع الغموض ثابت [2] ويساوي:

$$\iint |\chi(\tau, f_d)|^2 d\tau df_d = 4E^2$$

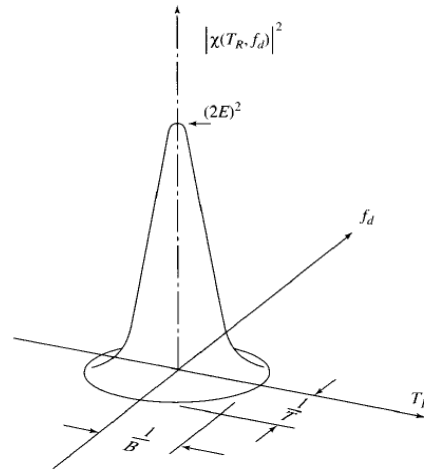
نسمي التمثيل ثلاثي الأبعاد لتابع الغموض كتابياً للتأخير الزمني ولتردد دوبلر بمخطط الغموض ambiguity diagram. يمكن تمثيل مخطط الغموض المثالي بمسار، عرضه متناهي بالصغر، أي له قمة وحيدة عند مبدأ الإحداثيات وقيمته معدومة عند غير ذلك [٦]، كما هو مبين في الشكل ٢-٤.



الشكل ٢-٤: مخطط الغموض المثالي.

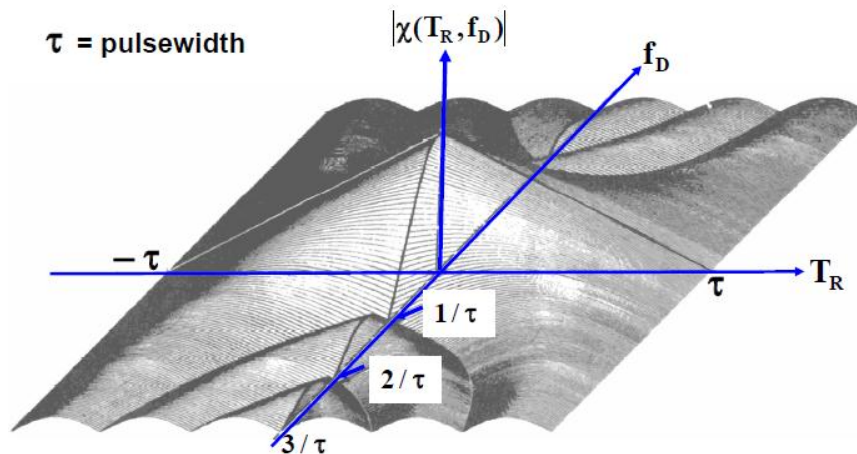
يُعطي تابع الغموض المثالي تمييزية تامة بين الأهداف القريبة جداً من بعضها البعض بالمسافة أو بتردد دوبلر، ولا يبدي غموضاً في قياس مدى أو دوبلر الهدف نظراً لكون تابع الغموض في هذه الحالة يحوي على قمة وحيدة عند المبدأ. ولكن لسوء الحظ، فإن تابع الغموض المثالي غير موجود عملياً، وذلك بسبب أنه ينبغي أن يكون لهذا التابع قمة منتهية تساوي  $4E^2$  ويحصر حجماً منتهياً يساوي أيضاً  $4E^2$ ، وتابع الغموض المثالي غير قادر على تحقيق هذين المتطلبين معاً [٦]. يبين الشكل ٢-٥ تقريباً لتابع الغموض الجيد. في هذه الحالة لا تبدي الإشارات غموضاً لكونها تحتوي على قمة وحيدة. عموماً، عندما يبدي تابع الغموض قمة وحيدة، كما في الشكل ٢-٤، فإن هذا القمة يمكن أن تكون عريضة على المحورين الزمني والتردد. يحدد عرض الفص الرئيسي لتابع الغموض على المحور الزمني التمييزية ودقة القياس في المدى في حين يحدد عرض الفص الرئيسي على المحور

الترددية تمييزية ودقة القياس في دوبلر. لذا فإن تابع الغموض في الشكل ٥-٢ له دقة وتمييزية ضعيفتين. عملياً، تبدي الإشارات عموماً استجابة غير مهملة لتابع الغموض خارج المنطقة القريبة من المبدأ. باختصار، إن الإشارات العملية ليس لها مخطط غموض قريب من المثالي أو حتى ذلك المبين في الشكل ٥-٢.



الشكل ٥-٢: تقريب واقعي لتابع الغموض المثالي.

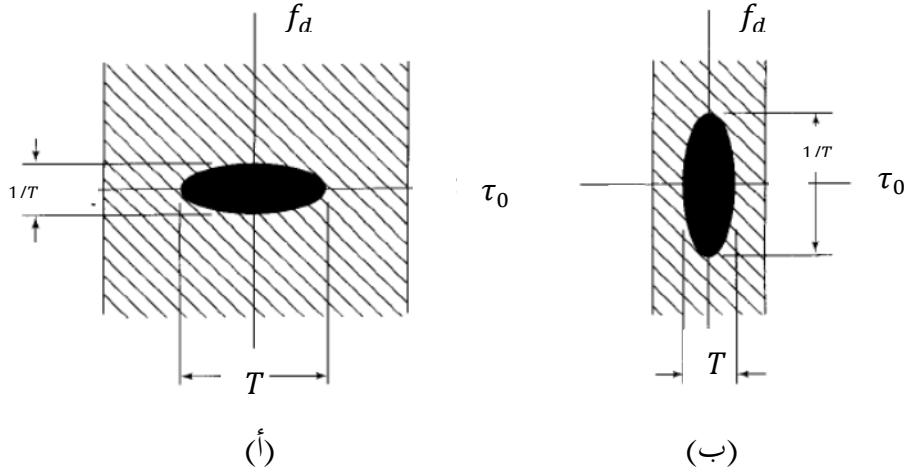
يبين الشكل (٦.٢) مخطط الغموض لبضبة مستطيلة غير معدلة. يمكن أن نلاحظ من هذا الشكل المثالي الخرج المرشح المتوافق على المحور الزمني، أي عندما  $f_d = 0$ . كما يمكن ملاحظة شكل تابع الـ  $\text{sinc } x = \sin x/x$  على المحور الترددي؛ أي عندما  $\tau = 0$ .



الشكل ٦-٢: مخطط الغموض لبضبة مستطيلة غير معدلة.

يمكن إيجاد المعلومات الأساسية في مخطط الغموض ببساطة من رسم ثنائي البعد له، أو من رسم حواف مقطع

عرضي contour لهذا المخطط. يبين الشكل ٦-٢ مقطع عرضي لمخطط الغموض لنبضة مستطيلة غير معدلة عند -3dB من قمته. تبين المساحات المهرشة بشدة ، في هذا الشكل، المناطق التي يكون فيها لتابع الغموض قيم عالية في حين تبين المساحات أقل تهريشاً المناطق التي يكون فيها لتابع الغموض قيم منخفضة.



الشكل ٦-٢: مقطع عرضي لمخطط الغموض لنبضة مستطيلة غير معدلة. (أ) نبضة عريضة. (ب) نبضة ضيقة.

كما هو واضح من الشكل ٧-٢ فإن المقطع العرضي لتابع الغموض لنبضة مستطيلة يأخذ شكلاً بيضوياً (قطع ناقص). يتناسب العرض الزمني لهذا المقطع مع عرض النبضة المرسل  $T$  في حين يتناسب اتساعها على المحور الترددي عكساً مع عرض النبضة. لذلك، فإن خطأ قياس زمن التأخير في هذه الحالة يتناسب مع عرض النبضة  $T$  في حين يتناسب خطأ قياس دوبلر مع  $1/T$ . وبالتالي، فإن النبضة العريضة، الشكل ٧-٢-أ، تبدي دقة قياس جيدة لتردد دوبلر الهدف ودقة قياس سيئة للتأخير الزمني على عكس النبضة الضيقة، ٧-٢-ب.

إن تمييزية الرادار في المدى، في حال نبضة مستطيلة غير معدلة، تتعلق بعرض نبضة الإرسال [٦]. يستطيع الرادار التمييز بين هدفين يصل صداهما إلى الرادار بتأخير من رتبة عرض نبضة الإرسال، لذا فإن تمييزية الرادار في المدى أفضل كلما كانت النبضات المرسل أضيق. من ناحية أخرى، فإن النبضات الضيقة تبدي سماحية أكثر لتردد دوبلر doppler tolerance بالمقارنة مع النبضات العريضة؛ أي يمكن باستخدام مرشح متوافق وحيد الحصول على خرج جيد في حال كانت قيم انزياح دوبلر كبيرة، في حين سيكون خرج المرشح المتوافق مخمداً في حال نبضة عريضة.

نستنتج مما سبق، أنه في حال إرسال نبضات مستطيلة غير معدلة فإن هناك ارتباطاً وثيقاً بين تمييزية الرادار في

المدى وفي دوبلر. يمكن بتعديل هذه النبضات فك هذا الارتباط. نتيجةً لتعديل النبضات الرادارية، فإن تمييزية الرادار في المدى ترتبط بعرض المجال الترددي للنبضات المرسله في حين أن تمييزيته في دوبلر ترتبط بالعرض الزمني لهذه النبضات.

إن من أكثر التعديلات استخداماً للنبضات الرادارية هي التعديل الترددي والتعديل الطوري. يجري في التعديل الترددي تغيير تردد النبضات الرادارية المرسله مع الزمن وفق قانون معين، وغالباً ما يتم زيادة تردد النبضة على نحوٍ خطي مع الزمن. يجري في التعديل الطوري تقسيم النبضة الرادارية إلى عدة نبضات جزئية، ومن ثم يجري تعديل كل نبضة جزئية، وفق سلسلة معينة، تعديلاً طورياً اثنائياً أو تعديل متعدد الصفحة. لما كانت أغلب رادارات الفتحة الرادارية ترسل نبضات معدلة تعديلاً ترددياً خطياً (Linear Frequency Modulation (LFM)، فسوف نعرض في الفقرة التالية خصائص وميزات هذا النوع من التعديل.

## ٥.٢. التعديل الترددي الخطي

يجري في هذا التعديل إرسال نبضة رادارية ترددها يتغير، ضمن النبضة، على نحو خطي مع الزمن. تُسمى النبضة المعدلة ترددياً خطياً بنبضة chirp. يمكن أن يزداد التردد (up-chrip) أو يتناقص (down-chrip) خطياً ضمن النبضة، يبين الشكل ٢-٨ مثالاً نمطياً عن نبضة up-chrip LFM، حيث  $T$  العرض الزمني للنبضة و  $B$  عرض التعديل الترددي للنبضة المرسله ويساوي  $B = f_2 - f_1$ ، حيث أن  $f_1$  هو تردد الإشارة عند بداية النبضة، و  $f_2$  هو تردد الإشارة عند نهايتها. نسمي  $BT$  بجداء زمن-عرض حزمة النبضة. تزداد كفاءة الطيف في الإشارة LFM بزيادة هذا الجداء. يمتاز هذا التعديل بسهولة توليده [٨]، إضافة إلى أنه غير حساس لوجود انزياح دوبلر الأمر، لذلك نجده شائع الاستخدام في رادارات البحث.

يمكن تحليلياً كتابة نبضة LFM ذات الامتداد الزمني  $T_p$  بالشكل التالي:

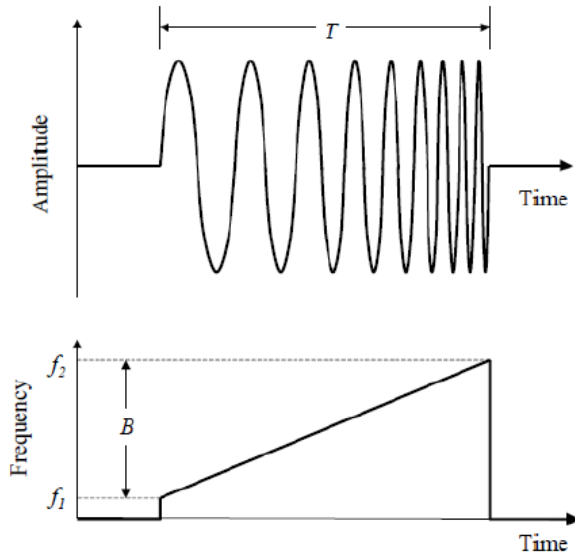
$$p(t) = \exp(j2\pi f_0 t + j\pi \alpha t^2) \quad 0 \leq t \leq T_p$$

و  $f_0$  تردد عمل الرادار المركزي، و  $\alpha$  ثابت التعديل ويساوي  $\alpha = \frac{B}{T_p}$ .

يُعطى التردد اللحظي لنبضة LFM بالعلاقة التالية:

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} (2\pi f_0 t + \pi \alpha t^2) \quad 0 \leq t \leq T_p$$

$$f_i(t) = f_0 + \alpha t \quad 0 \leq t \leq T_p$$

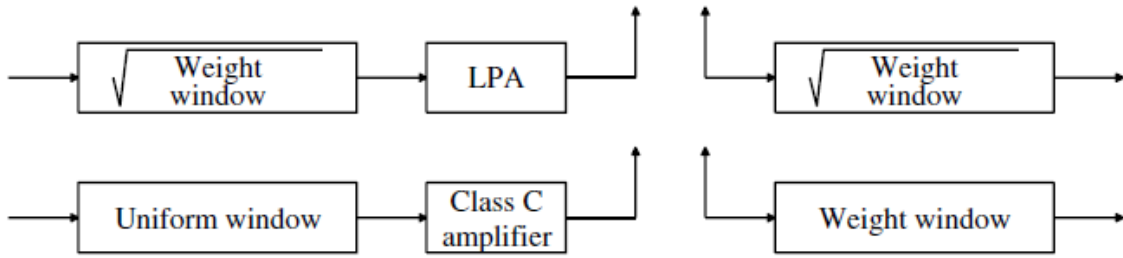


الشكل ٢-٨: نبضة معدلة تعديلاً ترددياً خطياً

يملك تابع الترابط الذاتي لإشارة LFM فصوص جانبية مرتفعة نسبياً، الأمر الذي يمكن أن يؤدي إلى طمس إشارة هدف صغير بجوار هدف كبير وإلى حصول إنذارات كاذبة نتيجة تجاوز هذه الفصوص عتبة القرار. إن مستوى أعلى فص زمني جانبي بالنسبة لمستوى الفص الرئيسي يساوي  $-13.2$  dB. يمكن خفض مستوى هذه الفصوص عن طريق توزيع إشارة ال LFM (حيث يُقصد بالتوزيع استخدام النوافذ) [10].

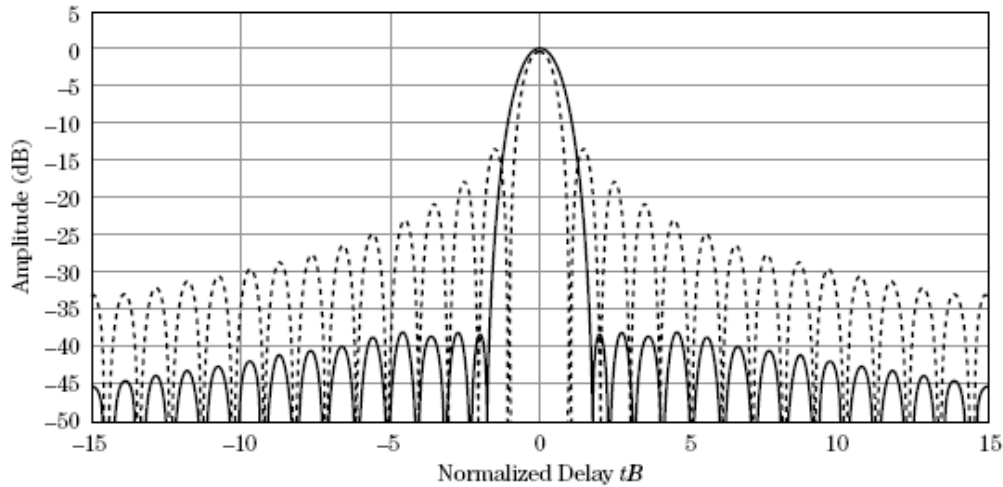
يمكننا إجراء عملية التوزيع إما في المستوى الزمني (توزيع مطالي) أو في المستوى الترددي (توزيع ترددي). اهتمامنا في عملنا بالتوزيع المطالي نظراً لكون نتائج التوزيع في كلتا الحالتين متقاربة. حتى يكون المرشح في المستقبل متوافقاً مع النبضة المرسله فإنه يجب توزيع كل من مطال النبضة المرسله ومطال الاستجابة النبضية للمرشح المتوافق، كما في أعلى الشكل ٢-٩. ولكن توزيع النبضة المرسله غير مرغوب به عملياً في الرادارات لكونه يسبب ضياع في طاقة النبضة المرسله ولكون أغلب المكبرات المستخدمة في الرادارات هي من الصنف C والتي تنتج إشارات بمطالات ثابتة [٩][٤]. عملياً، نقوم فقط بتوزيع الاستجابة النبضية للمرشح المتوافق، كما هو مبين في أسفل

الشكل ٢-٩.



الشكل ٢-٩: التوزين بحالة التعديل الترددي الخطي.

يبين الشكل ٢-١٠ خرج المرشح المتوافق بدون توزين استجابته (المنحني المتقطع) وخرج المرشح المتوافق بعد توزين استجابته بنافذة تايلور (الخط المتصل). يبين هذا الشكل انخفاض مستوى الفصوص الجانبية إلى أقل من -38dB، ولكن ذلك على حساب زيادة عرض الفص الرئيسي لخرج المرشح.



الشكل ٢-١٠: خرج المرشح المتوافق بدون توزين استجابته (المنحني المتقطع) وخرج المرشح المتوافق بعد توزين استجابته بنافذة تايلور (الخط المتصل)، في حال إشارة LFM.

يُمكن بتغير التردد مع الزمن تغيراً غير خطياً (Non Linear Frequency Modulation) NLFM خفض مستوى الفصوص الجانبية الزمنية لخرج المرشح المتوافق على نحو كبير، وبالتالي لا نحتاج في هذه الحالة إلى توزين استجابة المرشح المتوافق كما في حال إشارة LFM [١٠][١١]. رغم أن تابع الترابط الذاتي (خرج المرشح المتوافق) لإشارات NLFM له مستوى فصوص جانبية منخفض مقارنة بمستوى الفصوص الجانبية في إشارات LFM، فإنها تبدي حساسية أكبر لانزياح دوبلر من إشارات LFM، مما يؤدي إلى تشوه خرج المرشح من أجل قيم لدوبلر غير مهمة. من ناحية أخرى، إن توليد إشارات NLFM أكثر تعقيداً من إشارات LFM، وإن كانت مشاكل التعقيدات أصبحت أقل أهمية بتقدم تكنولوجيا المعالجات

ودارات ال FPGA والمركبات الترددية. من الجدير بالملاحظة أن التعديل NLFM يُعد الطريقة الأعتد من بين الطرائق المتبعة في ضغط النبضة.

يمكن كتابة تابع الغموض لإشارة LFM تحليلاً على الشكل التالي:

$$\chi(\tau, f_d) = \left| \left(1 - \frac{|\tau|}{T_p}\right) \frac{\sin \left[ \pi T_p (f_d + \alpha \tau) \left(1 - \frac{|\tau|}{T_p}\right) \right]}{\left[ \pi T_p (f_d + \alpha \tau) \left(1 - \frac{|\tau|}{T_p}\right) \right]} \right| ; |\tau| < T_p, \text{ zero otherwise}$$

نجد من العلاقة السابقة أن القيم العظمى لتابع الغموض - الذي له شكل تابع sinc يحدث عندما  $f_d + \alpha \tau = 0$ ، أي أنها تقع على المستقيم  $\tau = \pm \frac{f_d T_p}{B}$ . لذا في حال  $f_d \neq 0$  نقول أنه هناك عدم توافق في دوبلر (Doppler mismatch) بين إشارة LFM المستقبلية من هدف متحرك والمرشح المتوافق. إن قمة التابع في العلاقة السابقة لن تحدث عند  $\tau = 0$  (في حال كان دوبلر الهدف معدوماً) بل ستزاح بمقدار  $\tau_s$  يتناسب مع دوبلر الهدف  $f_d$ ، أي:

$$\tau_s = \pm \frac{f_d T}{B}$$

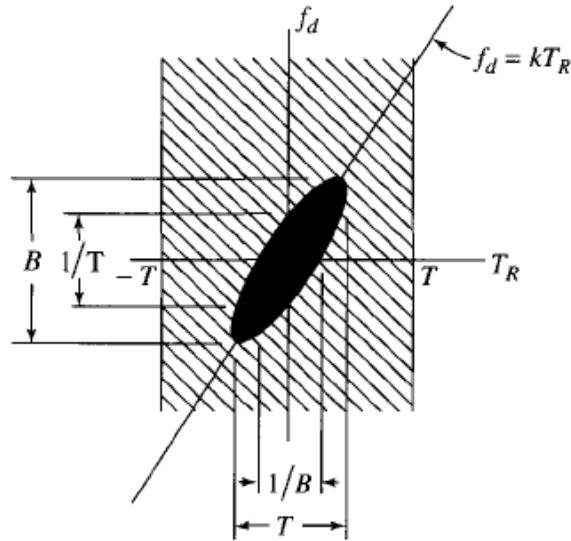
نسمي هذه الظاهرة بازدواجية مدى-دوبلر Range-Doppler coupling. يعتمد قياس مدى الهدف على مكان هذه القمة على المحور الزمني، لذلك فإنه في الحالة التي لا يكون فيها دوبلر الهدف للإشارة LFM معدوماً فإنه يوجد خطأ في قياس المدى يتناسب مع الانزياح الزمني المحدد في العلاقة السابقة. من ناحية أخرى، فإن مطال القمة على خرج المرشح المتوافق في هذه الحالة، سيتناقص بمعامل  $\delta$  يساوي:

$$\delta = 1 - \frac{|\tau_s|}{T} = 1 - \frac{|f_d T|}{B}$$

رغم أن وجود خطأ في قياس مدى و/أو دوبلر الهدف في إشارة LFM فإن سماحية دوبلر ميزة هامة في بعض التطبيقات مثل رادارات الكشف التي تتطلب كشف أهداف غير معروفة السرعة مسبقاً، وهذا يبسط معالجة الإشارة وعتاديات الكشف في المستقبل الراداري. في الحالة المغايرة، أي في حال عدم وجود سماحية بدوبلر، يتطلب كشف أهداف مجهولة السرعة استخدام مجموعة من المرشحات المتوافقة كل واحد منها متوافق مع انزياح دوبلر محدد كما هو الحال في إشارة التعديل الطوري الإثنائي (bi-phased-coded signal).

يبين الشكل ٢-١١ رسماً ثنائي البعد لمخطط الغموض لإشارة LFM متزايدة. كما هو واضح من هذا الشكل

فإن تمييزية ودقة قياس المدى باستخدام هذه الإشارة تتناسب مع  $1/B$ ، في حين أن دقة قياس دوبلر الهدف تتناسب مع  $T$ . ولما كان بالإمكان اختيار قيمة  $B$  و  $T$  على نحو مستقل، فإن دقة قياس المدى و دقة قياس دوبلر الهدف في هذه الحالة مستقلتان عن بعضهما البعض على عكس حالة نبضة مستطيلة غير معدلة (انظر الشكل ٦.٢).



الشكل ١١-٢ رسماً ثنائي البعد لمخطط الغموض لإشارة LFM متزايدة في التردد

## ٦.٢. قياس المدى في رادار الفتحة التركيبية

### ١.٦.٢. نموذج نظام قياس المدى

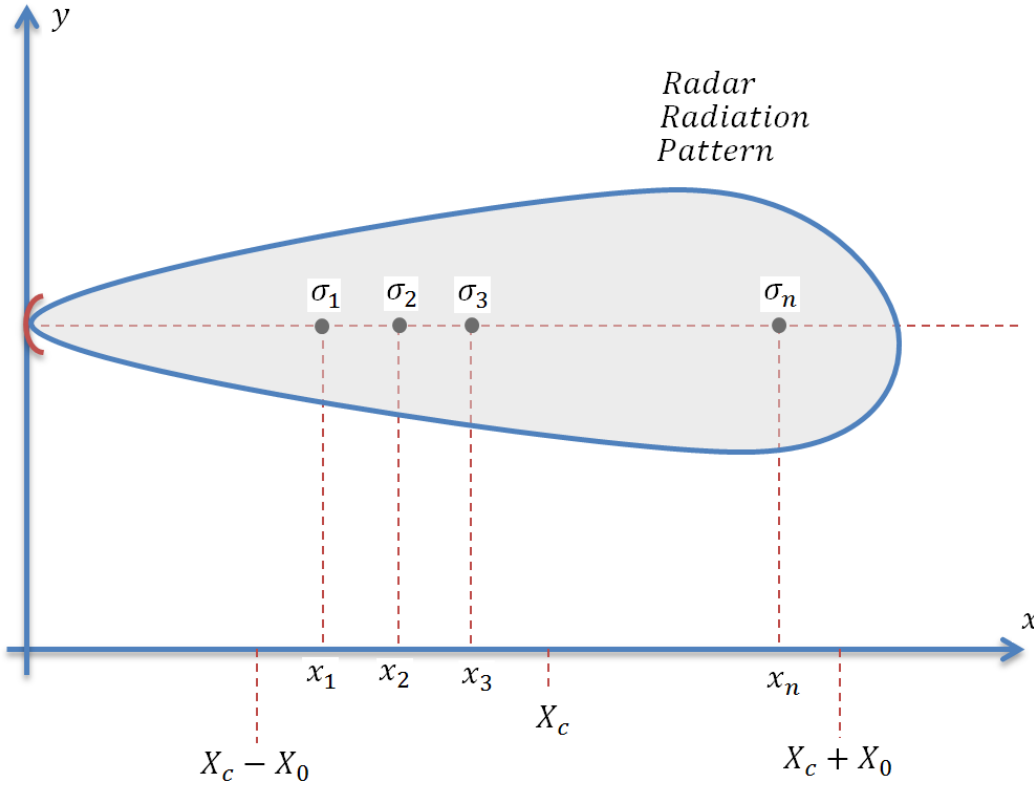
إن الخطوة الأولى في خوارزمية مدى-دوبلر المستخدمة في رادارات الفتحة التركيبية هي خوارزمية، كما سنبين ذلك في الفصل القادم، هي عملية ضغط الإشارة الرادارية في المدى. يمكن تنحيز عملية الضغط هذه إما برمجياً باستخدام مرشح متوافق مع الإشارة المرسله أو عتادياً hardware [١٢] من خلال ضرب الإشارة المستقبلية مع إشارة مرجعية. قبل شرح هاتين الطريقتين، سنعرض بداية نموذج لمنطقة هدف تحتوي على عدة أهداف.

بفرض أنه لدينا مجموعة أهداف تقع ضمن فضاء مكاني ثنائي البعد، عند مدى متعامد معلوم، وليكن  $y$ ، كما هو مبين في الشكل ١٢-٢. سنفترض إن مدى  $x_n$  وانعكاسيته (المقطع الراداري)  $\sigma_n$  كل هدف مجهولين. أخيراً، سنفترض أن الأهداف تقع ضمن منطقة محدودة في المدى،  $x_n \in [X_c - X_0, X_c + X_0]$  حيث  $X_c$  مركز المنطقة و  $2X_0$  عرضها، وأن الرادار يقع عند المدى المتعامد للأهداف نفسه،  $y$ .

تُعرف تابع الأهداف المثالي في المجال المكاني (المدى) كما يلي:

$$f_0(x) = \sum_n \sigma_n \delta(x - x_n) \dots (2-1)$$

حيث:  $\delta(x)$  هو نبضة دلتا لديراك



الشكل ٢-١٢: نموذج هندسي لقياس المدى

بافتراض أن الرادار يُرسل نبضة  $p(t)$  ذات الامتداد الزمني  $T_p$  باتجاه منطقة الأهداف، فيمكن كتابة الإشارة المستقبلة المنعكسة عن الأهداف  $s(t)$ ، على النحو التالي:

$$s(t) = \sum_n \sigma_n p(t - t_n) \dots (2-3)$$

حيث:  $t_n = \frac{2x_n}{c}$  هو الفاصل الزمني بين لحظة إرسال النبضة ولحظة استقبال النبضة المنعكسة عن الهدف  $n$  و  $c$  سرعة الضوء.

باستخدام التحويل الخطي بين المحور  $x$  (المدى) والزمن  $t$ :

$$x = \frac{ct}{2}$$

يمكن باستخدام تابع الهدف المثالي كتابة الإشارة المستقبلية كما يلي:

$$s(t) = f_0(x) * p(t)$$

$$s(t) = f_0\left(\frac{ct}{2}\right) * p(t)$$

النموذج السابق هو تبسيط للحالة الحقيقية حيث يفترض أن منطقة الهدف تحتوي على عدد محدود من الأجسام العاكسة المنفصلة، في حين أن منطقة الهدف تحتوي عملياً على منطقة متصلة من العواكس.

### ٢.٦.٢. الضغط باستخدام مرشح متوافق

يُعطى المرشح المتوافق مع النبضة الرادارية المرسله  $p(t)$  بالعلاقة التالية:

$$h(t) = p^*(-t)$$

ومنه، يمكن كتابة خرج المرشح المتوافق بإهمال الضجيج،  $s_M(t)$ ، على النحو التالي:

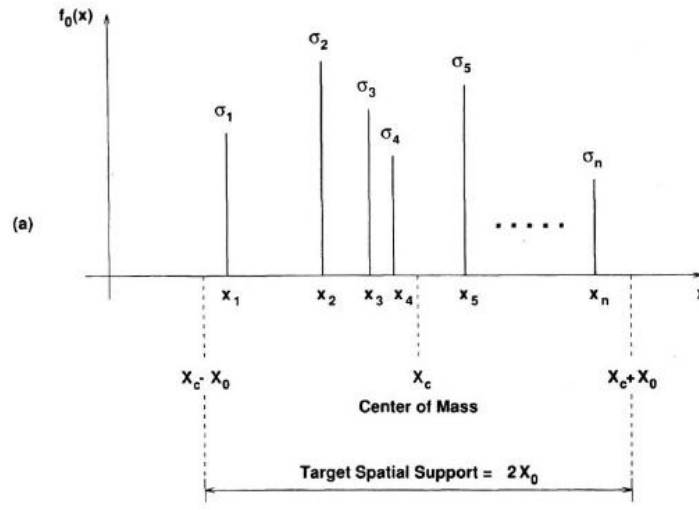
$$s_M(t) = s(t) * p^*(-t)$$

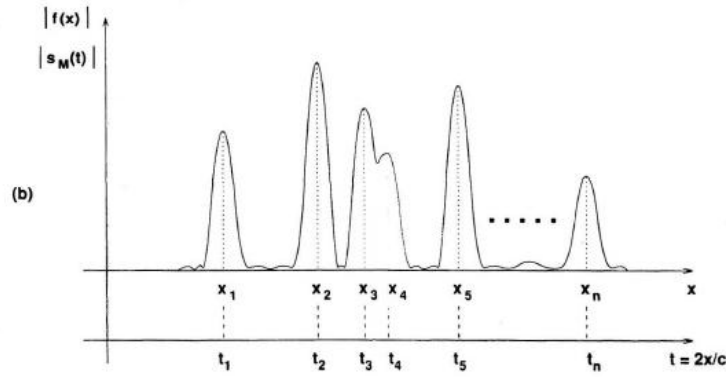
$$s_M(t) = f\left(\frac{ct}{2}\right) * R(t)$$

حيث  $R(t) = p(t) * p^*(-t)$  تابع الترابط الذاتي للإشارة  $p(t)$ . يمكن التعبير عن هذا التابع في المدى  $R(x)$ . في حال كانت  $p(t)$  نبضة LFM، فإن  $R(x)$  يأخذ شكل تابع sinc. يمكن الحصول على استعادة تابع الهدف  $f(x)$  من  $s_M(t)$  بإجراء تحويل  $x = ct/2$ ، فتحصل على:

$$f(x) = \sum_n \sigma_n R[(x - x_n)]$$

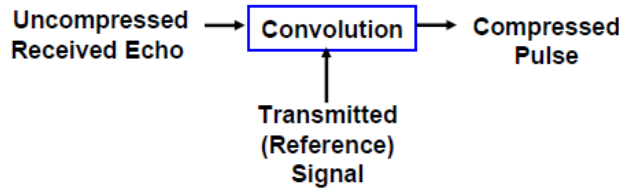
يبين الشكل ٢-١٣ مثال عن تابع الهدف المثالي  $f_0(t)$ ، وخرج المرشح المتوافق  $s_M(t)$  وتابع الهدف  $f(t)$  الناتج.



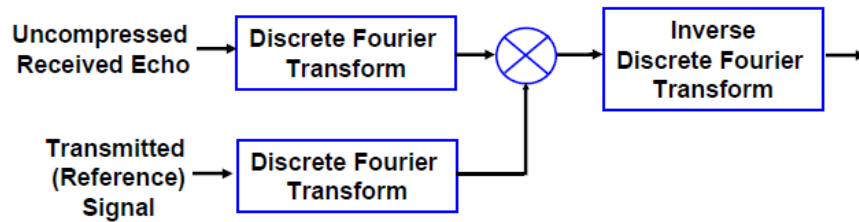


الشكل ٢-١٣: (a) مثال عن تابع الهدف المثالي  $f_0(t)$ . (b) خرج المرشح المتوافق  $s_M(t)$  وتابع الهدف  $f(t)$  الناتج. تسمح المبدلات التماثلية-الرقمية، في حال قيم صغيرة نسبياً لـ  $B$ ، بتقطيع الإشارة الرادارية المنعكسة عن الأهداف وتمثيلها رقمياً. في هذه الحالة، يمكن حساب خرج المرشح المتوافق إما في المستوي الزمني أو في المستوي الترددي، انظر الشكل ٢-١٤.

#### • Direct Convolution in Time Domain



#### • Frequency Domain Implementation



الشكل ٢-١٤: تنجيز عملية الترشيح في المستوي الزمني وفي المستوي الترددي.

يتطلب الحساب في المستوي الزمني حساب جداء التلاف بين الاستجابة النبضية للمرشح المتوافق  $h[n]$  والإشارة المستقبلية  $x[n]$ ، والتي تُعطى بالعلاقة التالية:

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{m=0}^{N-1} x[m]h[n-m]$$

حيث  $N$  طول  $h[n]$ . في حال قيم كبيرة لـ  $BT$  فإن طول الاستجابة النبضية للمرشح المتوافق يكون كبيراً، وبالتالي ستعرق

تنجيز عملية الترشيح المباشر في المستوى الزمني زمنياً كبيراً. يمكن تسريع هذه العملية عبر الانتقال إلى المستوى الترددي، في هذه الحالة نحتاج، مسبقاً ولمرة واحدة، إلى إجراء تحويل فورييه للاستجابة النبضية للمرشح وتخزينها في الذاكرة، ومن ثم لترشيح الإشارة المستقبلية  $x(t)$  نحسب تحويل فورييه له ونضربه بالاستجابة الترددية للمرشح. وأخيراً نحسب تحويل فورييه العكسي لنتائج الضرب فنحصل على خرج المرشح  $y(t)$ . يمكن استخدام تحويل فورييه السريع لتسريع تنجيز هذه التحويلات.

في حال قيم كبيرة لـ  $B$  تصبح العمليات السابقة صعبة التحقيق، لذلك تستخدم رادارات ضغط النبضة، في هذا الحالة، تقنية الاتساع stretch. يجري في هذه التقنية توليد إشارة الرادار المرسل عن طريق مزج إشارة LFM ضيقة المجال مع إشارة LFM عريضة المجال، وفي المستقبل يجري مزج الإشارة المستقبلية مع إشارة LFM عريضة المجال نفسها للحصول على إشارة ضيقة المجال. تفترض هذه التقنية معرفة مسبقة لمكان الهدف، وبالتالي فهي تناسب رادارات الملاحقة أو رادارات الدقة العالية المستخدمة لتصنيف الأهداف ولا تناسب رادارات الكشف المطلوب منها البحث عن أهداف ضمن أمدية كبيرة [٤].

### ٣.٦.٢. الضغط باستخدام الترشيح المتوافق بالإشارة المرجعية

على الرغم من أن عملية الضغط باستخدام المرشح المتوافق مع الإشارة المرسله صحيحة تماماً، فيمكن استخدام طريقة أخرى تدعى الترشيح المتوافق بالإشارة المرجعية *reference signal matched filtering* [١٢]. تنسجم هذه الطريقة مع النموذج الهندسي المبين أعلاه لقياس المدى.

في حال إرسال نبضة معدلة تعديلاً ترددياً خطياً LFM Chirp فإن الإشارة المنعكسة عن الأهداف وفق النموذج الرياضي المبين أعلاه تعطى بالعلاقة التالية:

$$s(t) = \sum_n \sigma_n a(t - t_n) \exp(j2\pi f_0(t - t_n) + j\alpha(t - t_n)^2)$$

$$s(t) = \sum_n \sigma_n a(t - t_n) \exp[j2\pi f_0(t - t_n)] \exp[j(\alpha t^2 - 2\alpha t_n t + \alpha t_n^2)]$$

بعد استقبال الإشارة المنعكسة عن الأهداف يتم ضرب مرافقها العقدي بطور النبضة المرسله، فنحصل على:

$$s_c(t) = s^*(t) \exp(j2\pi f_0 t + j\alpha t^2)$$

$$s_c(t) = \sum_n \sigma_n a^*(t - t_n) \exp(j2\pi f_0 t_n - j\alpha t_n^2) \exp(j2\alpha t_n t)$$

حيث تدعى  $s_c(t)$  بالإشارة المضغوطة (Compressed signal)، ونلاحظ من العلاقة الأخيرة وجود مركبات ترددية هي  $\exp(j2\alpha t_n t)$  تردداتها الحاملة هي  $2\alpha t_n$ . ترتبط  $t_n$  مع مدى الهدف  $n$  بالعلاقة  $t_n = \frac{2x_n}{c}$ . وبالتالي نلاحظ وجود علاقة تربط بين التردد المركبة الترددية ومدى الهدف الموافق، وبالتالي يمكن استنتاج مدى الهدف من طيف الإشارة المضغوطة

حيث يعطى تحويل فورييه للإشارة المضغوطة بالعلاقة:

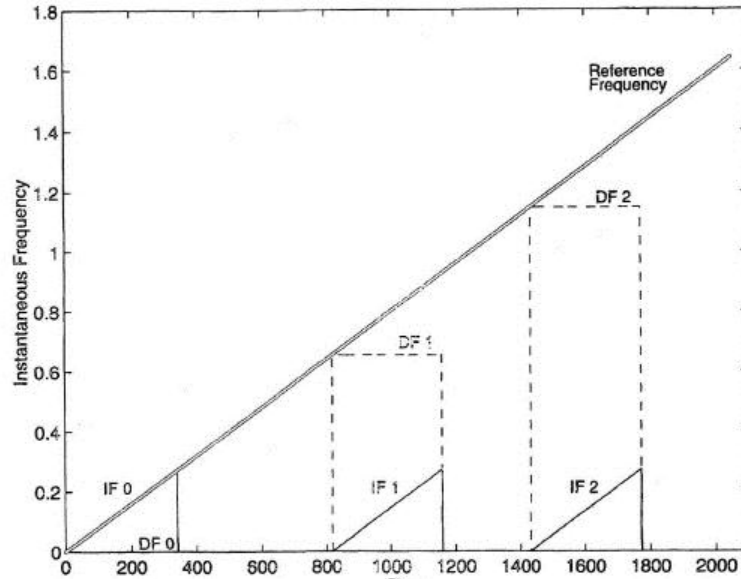
$$S_c(w) = \sum_n \sigma_n \exp(j2\pi f_0 t_n + jat_n^2 - jwt_n) psf_w(w - 2at_n)$$

$$S_c(w) = \sum_n \sigma_n \exp(j2\pi f_0 t_n + jat_n^2 - jwt_n) psf_w\left(w - \frac{4\alpha x_n}{c}\right) \dots (2-17)$$

حيث:  $psf_w(w)$  تحويل فورييه للمرافق العقدي للإشارة  $a(t)$ ، أي أن:

$$psf_w(w) = \mathcal{F}_t[a^*(t)]$$

من علاقة تحويل فورييه للإشارة المضغوطة نجد أن أثر الهدف  $n$  يظهر عند التردد  $w = \frac{4\alpha x_n}{c}$  وهي علاقة خطية تربط بين التردد والمدى وبالتالي كلما زاد مدى الهدف ظهر أثره عند تردد أعلى، وكلما نقص مدى الهدف ظهر أثره عند تردد أخفض. يبين الشكل ٢-١٥ التردد المرجعي والترددات الناتجة عن هدفين والفرق الترددي بين التردد المرجعي وترددات الأهداف.



الشكل ٢-١٥ التردد المرجعي والترددات الناتجة عن هدفين.

نفترض مجموعة من الأهداف لها أمدية نسبية بالنسبة لمركز المنطقة ومقاطع رادارية مختلفة مبينة في الجدول (٢-١).

Range	reflectivity
0	0.50
$0.25X_0$	0.60
$0.5X_0$	0.70
$-0.5X_0$	0.80
الجدول (٢-١): معاملات الأهداف	

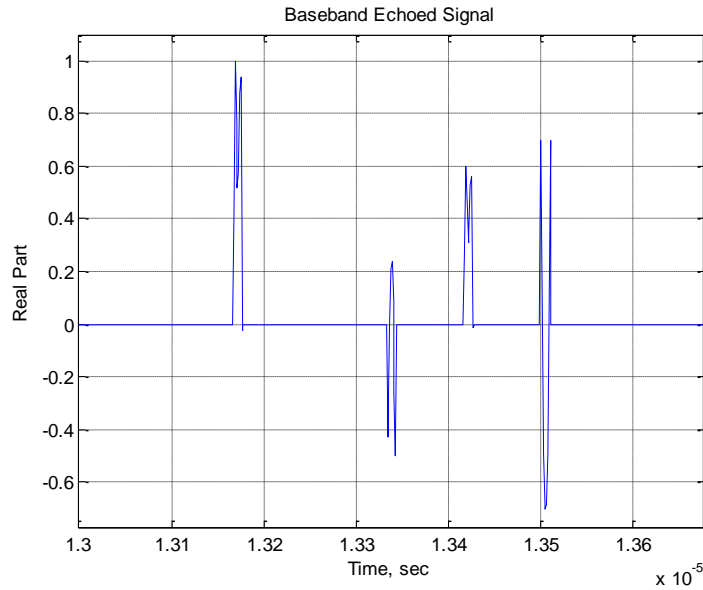
وتوضع هذه الأهداف ضمن منطقة محدودة المدى بمعاملاتها موضحة بالجدول (٢-٢):

$X_c$	<b>2000 m</b>
$X_0$	<b>50 m</b>
الجدول (٢-٢): معاملات منطقة الأهداف	

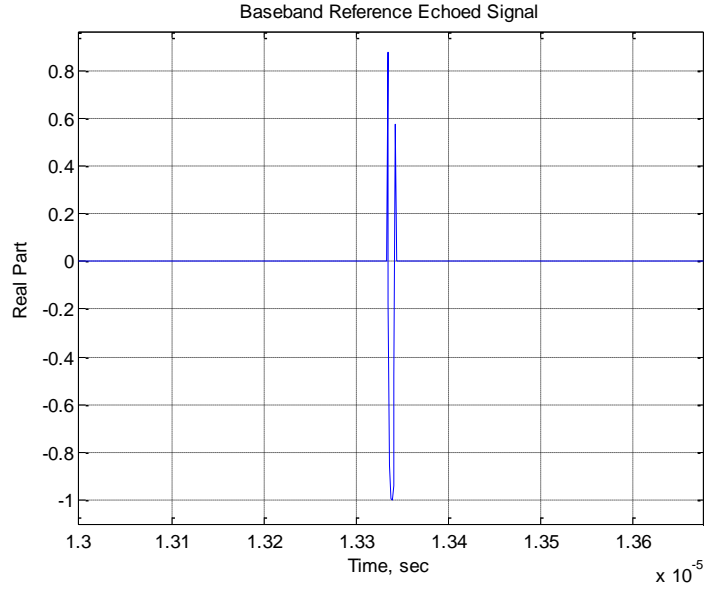
سنفترض أن نبضة LFM المرسله تتمتع بالمواصفات المبينة في الجدول (٣-٢):

Carrier frequency	<b>1 GHz</b>
Baseband bandwidth	<b>200 MHz</b>
Chirp pulse duration	<b>10 nsec</b>
الجدول (٣-٢): معاملات النبضة المرسله	

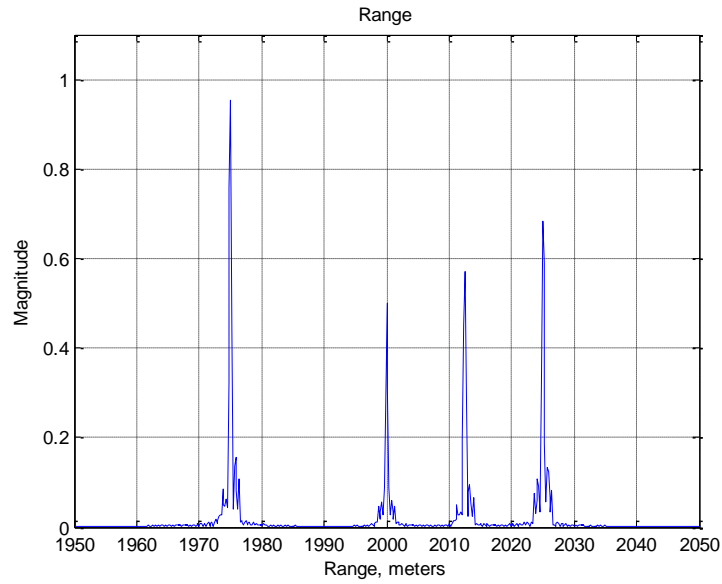
يبين الشكل ١٦-٢ الجزء الحقيقي للإشارة المنعكسة في الحزمة القاعدية. ويبين الشكل ١٧-٢ الجزء الحقيقي للإشارة المرجعية للمرشح المتوافق في الحزمة القاعدية، ويبين الشكل ١٨-٢ خرج المرشح المتوافق وأمدية الأهداف.



على الشكل ١٦-٢: الجزء الحقيقي للإشارة المنعكسة عن الأهداف في الحزمة القاعدية



الشكل ٢-١٧: الجزء الحقيقي للإشارة المرجعية للمرشح المتوافق في الحزمة القاعدية



الشكل ٢-١٨: خرج المرشح المتوافق وأمدية الأهداف.

## ٧.٢. الخاتمة

جرى من خلال الفصل عرض دراسة مرجعية عن تقنية ضغط النبضات، من حيث التعديل المستخدم في النبضة المرسله وتابع الغموض له، وطرق الترشيح المتوافق وأمثلة عن كل منها وبينت الدراسة ان الترشيح المتوافق التقليدي انسب لرادارات الفتحة التركيبية، كون ان الترشيح بالإشارة المرجعية يصبح غير فعال من اجل مدى هدف كبير.

## الفصل الثالث

### المعالجة الرقمية لإشارات رادارات الفتحة التركيبية

يتضمن هذا الفصل دراسة نظرية لرادار الفتحة التركيبية من النوع stripmap، تتضمن الإشارات المرسله والمستقبلة والمعالجة الرقمية لهذه الإشارات، وإجراء محاكاة لها ضمن بيئة ماتلاب

#### ١.٣ . مقدمة

للحصول على دقة عالية في المدى المتعامد لابد من الاستفادة من حركة المنصة الحاملة للرادار، حيث يتم الإرسال والاستقبال في مواضع معينة على طول مسار المنصة دون أن تتوقف. يساهم في نجاح هذا النوع من الرادارات كون سرعة المنصة الحاملة للرادار (طائرة أو قمر صناعي) مهملة أمام سرعة انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية ( $c = 3 \times 10^8 m/s$ ).

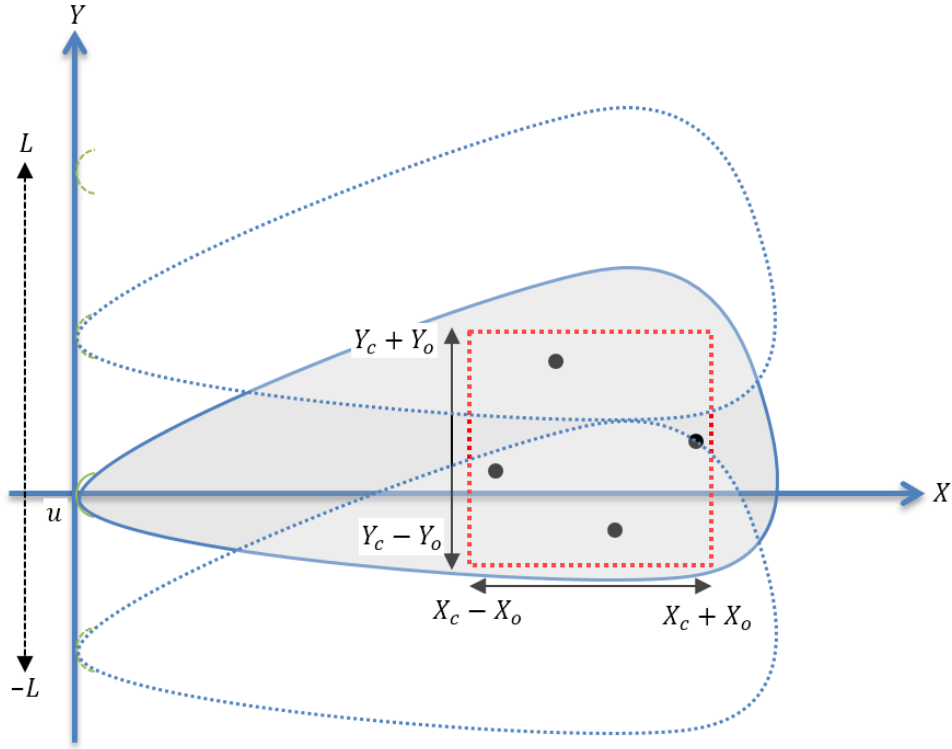
مراحل المعالجة التي تتعلق بقياس المدى تدعى بالمعالجة بالزمن السريع (Fast Time Processing) لأنها تتعلق بالإشارة المرسله والمستقبلة، أما مراحل المعالجة التي تتعلق بقياس المدى الأفقي تدعى بالمعالجة بالزمن البطيء ( Slow Time Processing) لأنها تتعلق بمواضع المنصة الحاملة للرادار [١].

أجرينا الدراسة على رادار SAR ذو المسح الشرائطي stripmap SAR، لكونه من أبسط أنواع رادارات SAR، بهدف تبسيط الدراسة للحصول على النتائج اللازمة للجزء الثاني من الدراسة هو التشويش على هذا النوع من الرادارات.

#### ٣.٢ . النموذج الهندسي

نفترض أن المنطقة المستهدفة تتكون من مجموعة من الأهداف النقطية تقع في المستوي نفسه، إحداثياتها  $(x_n, y_n)$   $n = 1, 2, \dots$  كما هو موضح في الشكل ٣-١. وبالتالي يتم يتميز كل هدف عن الآخر بمداه  $x_n$  ومداه الأفقي  $y_n$  وانعكاسيته  $\sigma_n$ . كما نفترض أن الأهداف تقع ضمن منطقة محدودة في المدى أي أن  $x_n \in [X_c - X_0, X_c + X_0]$  حيث  $X_c$  مركز المنطقة بالمدى و  $2X_0$  طول المنطقة بالمدى، ومحدودة في المدى المتعامد أي أن  $y_n \in [Y_c - Y_0, Y_c + Y_0]$  حيث  $Y_c$  مركز المنطقة بالمدى الأفقي و  $2Y_0$  طول المنطقة بالمدى المتعامد.

بحسب النموذج الرياضي الموضح في الشكل (٣-١)، أحداثيات المرسل/المستقبل الراداري هي  $(0, u)$  في مستوي الأحداثيات  $(x, y)$ ، وهذا الموقع يتغير مع الزمن نظراً لكون أن المركبة الحاملة للرادار تتحرك على المحور  $\vec{Oy}$  (يدعى محور المدى المتعامد). عند كل موقع للرادار يتم إرسال النبضة  $p(t)$  إلى منطقة الأهداف، ومن ثم يتم استقبال وتخزين الإشارة المنعكسة عن هذه الأهداف لمعالجتها. [١٢]



الشكل ٣-١: النموذج الرياضي لمنطقة الأهداف

ذكرنا سابقاً أن رادارات الفتحة التركيبية تستخدم تقنية ضغط النبضات الرادارية للحصول على تمييزية عالية في المدى، حيث يتم إرسال نبضة معدلة تعديلاً ترددياً خطياً LFM Chirp، تعطى نبضة LFM بالعلاقة التالية:

$$p(t) = \exp(j(2\pi f_0 t + \pi \alpha t^2)) \quad 0 \leq t \leq T_p$$

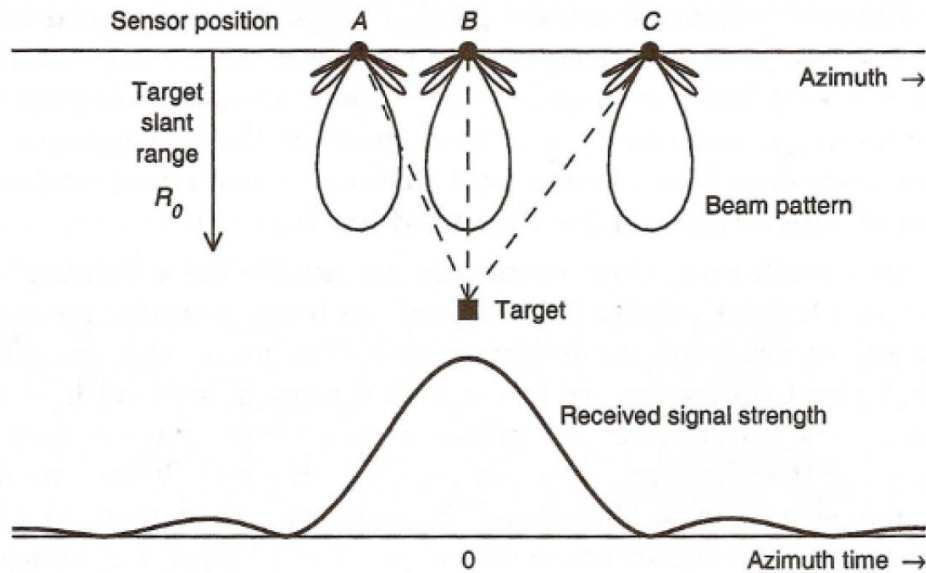
عند إرسال النبضة  $p(t)$  ذات الامتداد الزمني  $T_p$  باتجاه منطقة الأهداف فإن الإشارة المنعكسة عن الهدف رقم  $n$  الذي يقع في الموقع  $(x_n, y_n)$ ، والمستقبلة من قبل الرادار. تعطى بالعلاقة التالية:

$$s_n(t, \eta) = \sigma_n w_r \left( t - \frac{2R_m(\eta)}{c} \right) w_a(\eta - \eta) \exp \left( j2\pi f_0 \left( t - \frac{2R_m(\eta)}{c} \right) + j\pi \alpha \left( t - \frac{2R_m(\eta)}{c} \right)^2 \right)$$

وبالتالي، الإشارة المستقبلية عن كل الأهداف هي مجموع الإشارات المنعكسة عن جميع الأهداف، وتعطى هذه الإشارة بالعلاقة التالية:

$$s_r(t, \eta) = \sum_n \sigma_n w_r \left( t - \frac{2R_m(\eta)}{c} \right) w_a(\eta - \eta_c) \exp \left( j2\pi f_o \left( t - \frac{2R_m(\eta)}{c} \right) + j\pi \alpha \left( t - \frac{2R_m(\eta)}{c} \right)^2 \right)$$

حيث نلاحظ أن الإشارة المستقبلية تابعة لمتحولين زمنيين الأول:  $t$  يدعى بالزمن السريع أو الزمن المتعلق بقياس المدى، والثاني:  $\eta$  يدعى بالزمن البطيء أو الزمن المتعلق بقياس المدى الأفقي. نلاحظ وجود اختلافين أساسيين بين الإشارة المستقبلية في رادار SAR عن غيره من الرادارات التقليدية، الأول: هو أن المدى تابع لمتحول زمني مرتبط بموقع المنصة الحاملة للرادار  $R_m(\eta)$ ، والثاني: هو أن شدة الإشارة المستقبلية لا تتعلق بانعكاسية الهدف فقط وإنما باتجاه المخطط الإشعاعي للهوائي المستخدم  $w_a(\eta)$ . لتوضيح ذلك، سنفترض أنه لدينا هدف نقطي واحد وأن المنصة الحاملة للرادار سوف تسمح للمنطقة حول هذا الهدف كما في الشكل (٢-٣). [١٣]



الشكل ٢-٣: شدة الإشارة المستقبلية عن هدف واحد كتابع للزمن البطيء

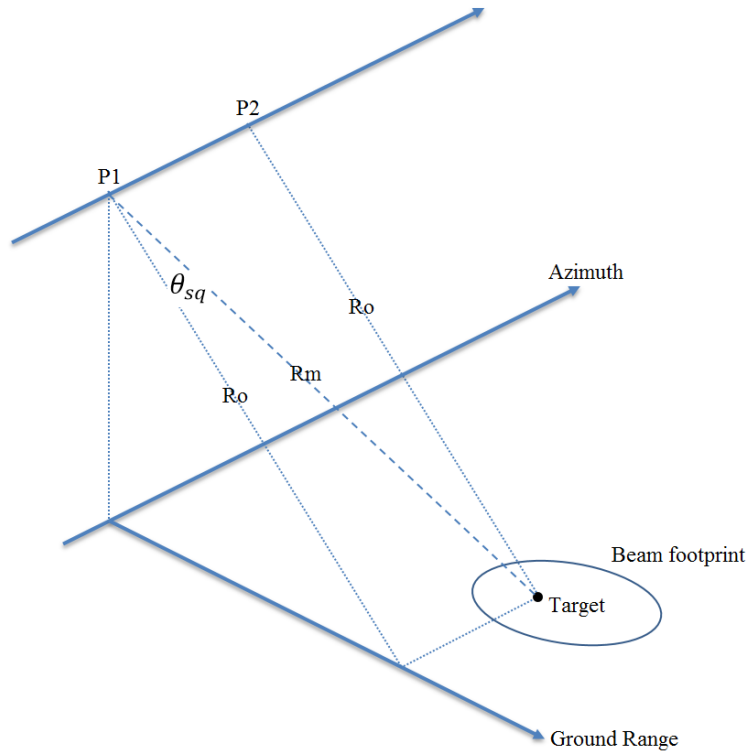
نلاحظ من هذا الشكل أن المدى يكون أقصر ما يمكن عندما يتوضع الهدف مع المنصة الحاملة على نفس الشاقول وتكون شدة الإشارة المستقبلية أعظمية لأن ربح الهوائي يكون أعظمية (الحزمة الرئيسية)، ويزداد المدى كلما ابتعدت المنصة الحاملة عن الشاقول المار بالهدف. وتكون شدة الإشارة المستقبلية أقل لأن الهوائي سيستقبلها من خلال الحزم الجانبية. وبالتالي تتعدل الإشارة المستقبلية مطاليماً بالنسبة للزمن البطيء بتابع يشبه تابع  $sinc^2$ ، لذلك أمكننا كتابة  $w_a(\eta)$  على الشكل التالي:

$$w_a(\eta) \approx \text{sinc}^2 \left( \frac{0.886\theta_{sq}(\eta)}{\beta_{bw}} \right)$$

حيث:  $\beta_{bw}$  عرض حزمة الهوائي ويعطى بالعلاقة:  $\beta_{bw} = 0.866\lambda/L_a$   $L_a$  الطول الفيزيائي للهوائي

$\theta_{sq}(\eta)$  (زاوية الانحراف) الزاوية بين الخط الواصل بين هوائي الرادار والهدف والخط العمودي على مسار الرحلة، وهي مبينة في الشكل (3-3)، وتعطى بالعلاقة التالية:

$$\theta_{sq}(\eta) = \arccos \left( \frac{R_{mo}}{R_m(\eta)} \right)$$



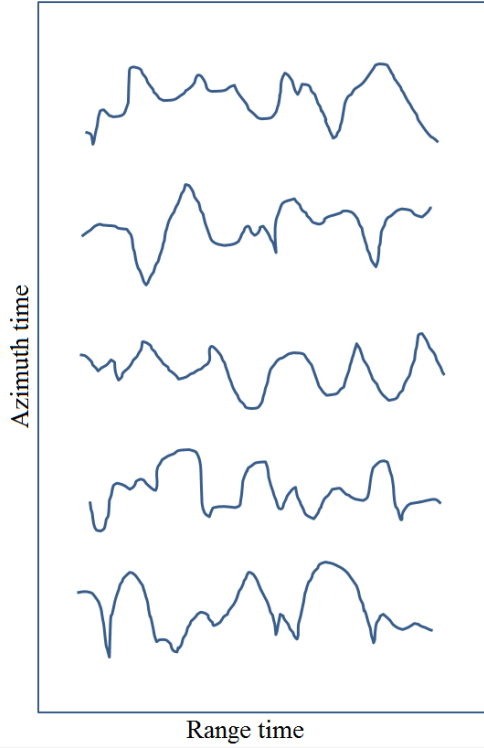
الشكل 3-3: شكل توضيحي لكل من  $\theta_{sq}$  و  $R_{mo}$  و  $R_m(\eta)$

ويعطى المدى في اللحظة  $\eta$  بالعلاقة التالية:

$$R_m(\eta) = \sqrt{R_{mo}^2 + V_p^2 \left( \eta + \frac{y_m}{V_p} \right)^2}$$

حيث:  $V_p$  سرعة المنصة الحاملة للرادار

من خلال الدراسة السابقة نجد أن الإشارة المنعكسة عن الأهداف والمستقبلية من قبل الرادار هي إشارة ببعدين المدى (الزمن السريع) والمدى المتعامد (الزمن البطيء)، لذلك يمكننا التعبير عن الإشارة المستقبلية بصورة ثنائية البعد تحتوي على المعلومات المتعلقة بالمدى والسمت. كما في الشكل ٣-٤ :



الشكل ٣-٤ : الإشارات المستقبلية من قبل رادار stripmap SAR بتمثيل بياني

هذه الصورة سوف تدخل إلى مرحلة المعالجة ليتم الحصول منها على صورة تحتوي الأهداف الموجودة ضمن المنطقة المستهدفة بالمسح الراداري. [١٣]

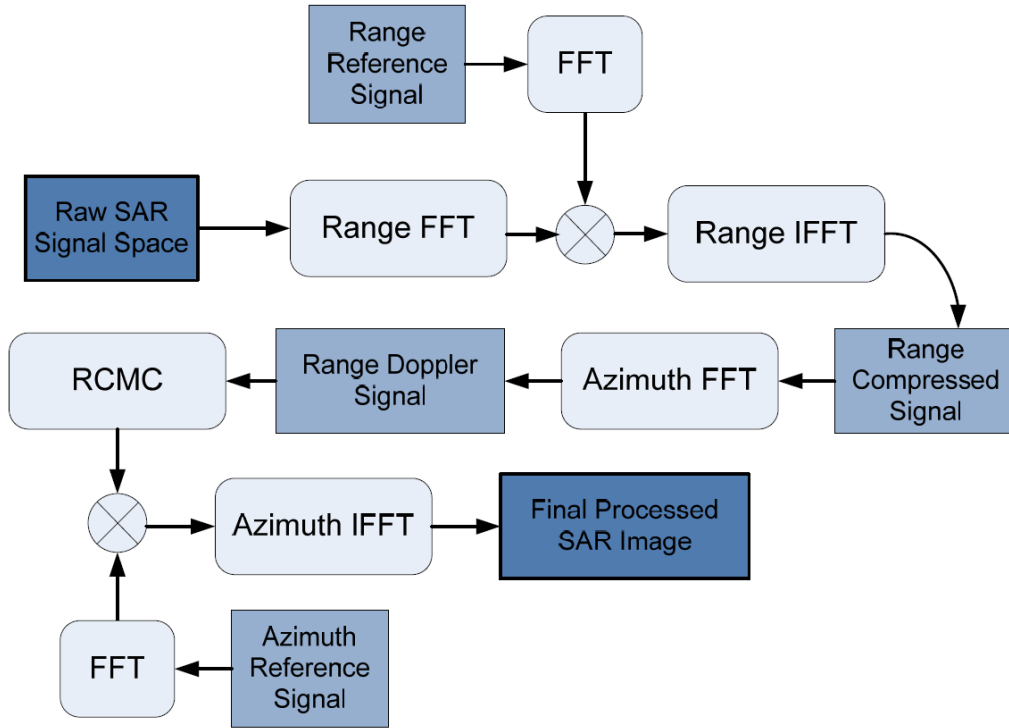
### ٣.٣. الخوارزمية مدى-دوبلر

الخوارزمية المستخدمة في رادارات الفتحة التركيبية هي خوارزمية مدى-دوبلر، تعتمد هذه الخوارزمية على الترشيح المتوافق للإشارة المستقبلية (فك ضغط النبضات) على مرحلتين منفصلتين: الأولى الترشيح المتوافق للمدى، والثانية الترشيح المتوافق للمدى الأفقي (السمت). حيث تتم عملية الترشيح في هذه الخوارزمية في المجال الترددي باستخدام خوارزمية تحويل فورييه السريع. تتضمن هذه الخوارزمية أيضاً، مرحلة معالجة وسيطة تدعى "تصحيح انزياح خلايا المدى" Range Cell

Migration correction وهي تتم على الإشارة المستقبلية في المجال الزمني بالنسبة للمدى، وتكون الإشارة بالمجال الترددي

بالنسبة للمدى المتعامد، ويدعى هذا المجال بالمجال مدى-دوبلر وهو الذي أعطى هذه الخوارزمية أسمها. [١٣]

يبين الشكل ٣-٥ المخطط الصندوقي لخوارزمية مدى-دوبلر:



الشكل ٣-٥: المخطط الصندوقي لخوارزمية مدى-دوبلر

تتألف هذه الخوارزمية من الخطوات التالية:

١. إجراء تحويل فورييه للإشارة المستقبلية بالنسبة للزمن  $t$ .
٢. توليد استجابة المرشح المتوافق  $h(t)$ ، مع الإشارة المرسل  $p(t)$ .
٣. إجراء تحويل فورييه لاستجابة المرشح المتوافق  $h(t)$ .
٤. إجراء عملية الترشيح في المجال الترددي من خلال ضرب الإشارتين الناتجتين عن الخطوتين الأولى والثالثة.
٥. العودة إلى المجال الزمني  $t$  باستخدام تحويل فورييه العكسي لنتائج الخطوة الرابعة، فنحصل على الإشارة المضغوطة في الزمن (المدى).
٦. إجراء تحويل فورييه في المدى المتعامد لنتائج الخطوة الخامسة بالنسبة للزمن  $\eta$ .

٧. تطبيق خوارزمية "تصحيح انزياح خلايا المدى" RCMC.
٨. توليد استجابة المرشح المتوافق بالنسبة للمدى المتعامد.
٩. إجراء تحويل فورييه لاستجابة المرشح المتوافق بالنسبة للمدى المتعامد.
١٠. إجراء الترشيح في المجال الترددي بإجراء ضرب عقدي للإشارتين الناتجتين عن الخطوتين السابعة والتاسعة.
١١. العودة للمجال الزمني  $\eta$  بإجراء تحويل فورييه العكسي لنتائج الخطوة السابقة، فنحصل على الإشارة المضغوطة بالمدى المتعامد. وبالتالي نحصل على صورة تحتوي مواقع الأهداف بالمدى والمدى المتعامد.

إن تطبيق عملية التصحيح في الخطوة السابعة ضرورية، نتيجة العلاقة غير الخطية بين المدى والزمن  $\eta$  فإن للهدف الواحد سوف يكون أكثر من مدى تبعاً للزمن  $\eta$  ولكن في النهاية لا بد أن نحصل على قيمة واحدة للمدى تميزه عن غيره. وبالتالي، يكون المدى الصحيح هو المدى لحظة وقوع الهدف والمنصة الحاملة للرادار على شاقول واحد، وفي اللحظات الأخرى تكون قيم المدى مزاحة عن القيمة الصحيحة. وبالتالي، حتى لا نحصل على قياس خاطئ للسمت لا بد من توحيد قيم المدى من أجل كل اللحظات  $\eta$  قبل إجراء عملية الترشيح بالسمت. حيث يتم تصحيح المدى بقيم يتم حسابها من العلاقة التالية:

□

$$R_{rd}(f_{\eta}) = \frac{R_{mo}}{\sqrt{1 - \frac{c^2 f_{\eta}^2}{4V_p^2 f_o^2}}}$$

حيث:  $f_{\eta}$  تردد دوبلر المتعلق بالمدى المتعامد

ومن أجل زوايا انحراف صغيرة يمكن تقريب العلاقة السابقة بالعلاقة التالية:

$$R_{rd}(f_{\eta}) \approx \frac{\lambda^2 R_{mo} f_{\eta}^2}{8V_p^2}$$

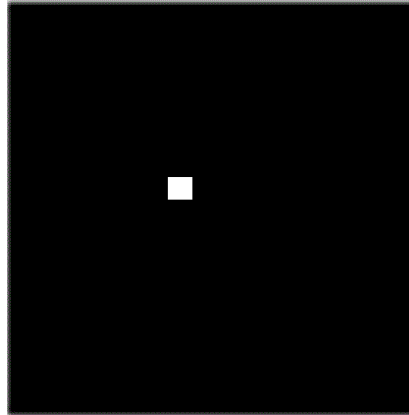
حيث يعطى التردد المتعلق بالسمت بالعلاقة التالية:

$$f_{\eta} \approx \frac{2V_p^2 \eta}{\lambda R_{mo}}$$

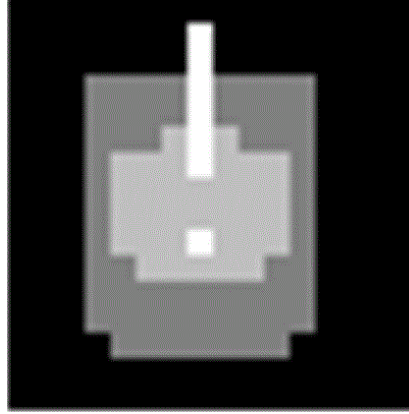
### ٤.٣ . محاكاة رادار stripmap SAR

تم إجراء محاكاة -ضمن بيئة ماتلاب- لخوارزمية مدى-دوبلر في حالتين مختلفتين: نفترض في الحالة الأولى أن المنطقة المستهدفة تحتوي على هدف نقطي واحد، وفي الحالة الثانية نفترض أنها تحتوي على هدف عبارة عن آلية عسكرية (دبابة مثلاً). تم اختيار معاملات المحاكاة نفسها في الحالتين وهذه المعاملات مبينة في الجدول (٣-١). تبدأ عملية المحاكاة برسم صورة تحتوي على شكل الهدف -وذلك لصعوبة الحصول على معطيات أولية Raw Data لرادارات حقيقية- لذلك سنقوم بمحاكاة الإشارات المنعكسة عن الأهداف بناءً على الصورة المدخلة. يبين الشكلان ٣-٦ و ٣-٧ الصورتين المدخلتين في المحاكاة. نعتبر كل بكسل في الصورة هدف نقطي، إحدائياته هي إحدائية البكسل نفسها، وقيمة البكسل هي انعكاسية الهدف.

Pulse Repetition Frequency	<b>300 Hz</b>
Platform Velocity	<b>200 m/s</b>
Antenna Actual Length	<b>2 m</b>
Carrier frequency	<b>4.5 GHz</b>
Baseband bandwidth	<b>100 MHz</b>
Chirp pulse duration	<b>2.5 <math>\mu</math>sec</b>
الجدول (٣-١): معاملات الرادار	



الشكل ٣-٦: صورة تحتوي على هدف نقطي واحد

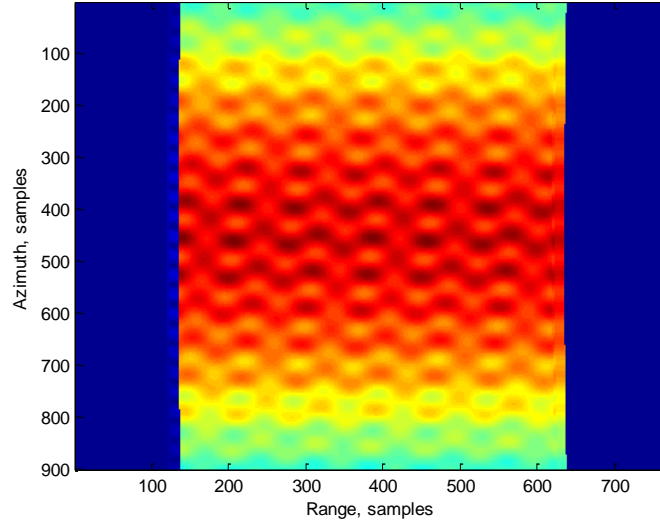


الشكل ٣-٧: صورة تحتوي على مركبة عسكرية

بعد توليد إشارة الأصداء، نمررها إلى خوارزمية مدى-دوبلر للحصول على صورة رادارية لمنطقة الهدف. نبين فيما يلي خرج كل مرحلة من مراحل الخوارزمية من أجل كل حالة من الحالتين المذكورتين آنفاً.

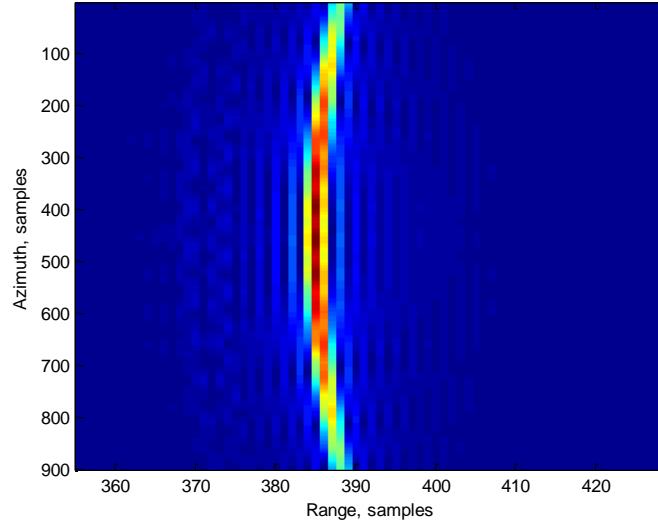
### الحالة الأولى: هدف نقطي واحد

بداية" جرى توليد الإشارات المنعكسة عن هدف نقطي. يبين الشكل ٣-٨ الإشارة المستقبلة من قبل الرادار والمنعكسة عن المنطقة التي تحتوي على هدف نقطي، وهي تابع لمتحولين زمنيين هما  $(t, \eta)$ .



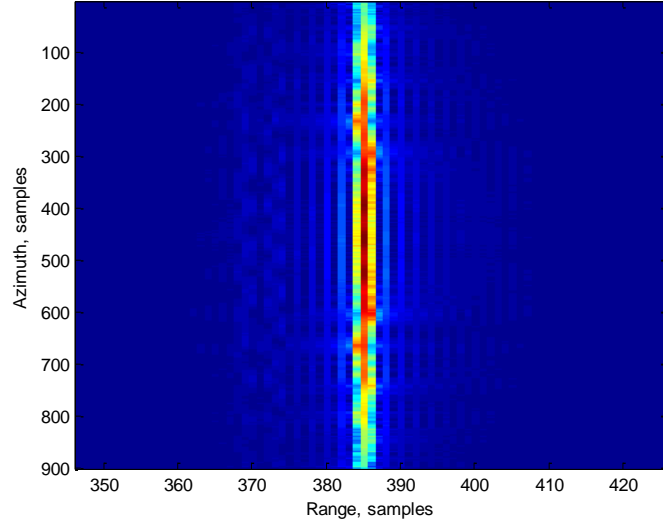
الشكل ٣-٨: الإشارة المنعكسة عن منطقة تحتوي هدفاً نقطياً

في المرحلة التالية، جرى ضغط الإشارة المستقبلية بالمدى باستخدام مرشح متوافق مع الإشارة المرسله، فعلياً خرج المرشح يمثل ناتج الخطوة الخامسة من خوارزمية مدى-دوبلر. يبين الشكل ٣-٩ ناتج عملية الترشح. نلاحظ من هذا الشكل أن الهدف ظهر على أكثر من مدى خلال فترة طيران الطائرة الحاملة للرادار، وهذه الظاهرة تُسمى ظاهرة انزياح المدى.



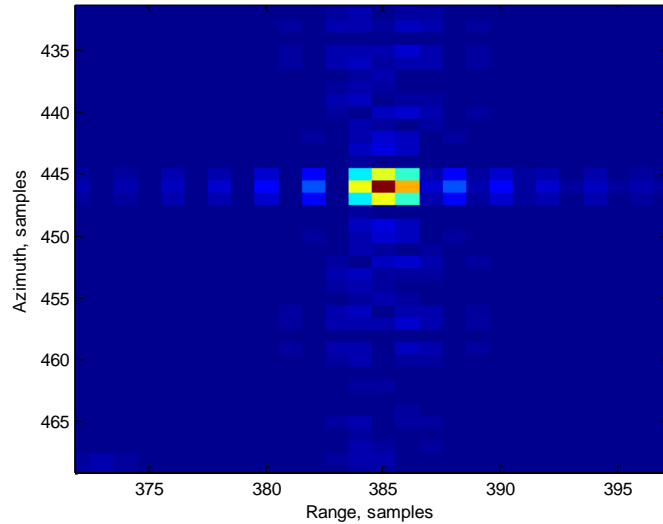
الشكل ٣-٩: خرج عملية الضغط بالمدى من أجل هدف نقطي

فيما بعد جرى تطبيق خوارزمية تصحيح انزياح الخاليا بالمدى لتصحيح مدى هدف عند لحظات مدى أفقي مختلفة، وذلك لأنه من المستحيل لهدف واحد أن يكون له أكثر من مدى. يبين الشكل ٣-١٠ خرج عملية التصحيح حيث نلاحظ أن مدى الهدف النقطي أصبحت قيمته ثابتة. فعلياً، الشكل السابق يبين ناتج الخطوة السابعة من خوارزمية مدى-دوبلر في المجال الزمني.



الشكل ٣-١٠: خرج عملية تصحيح خلايا المدى

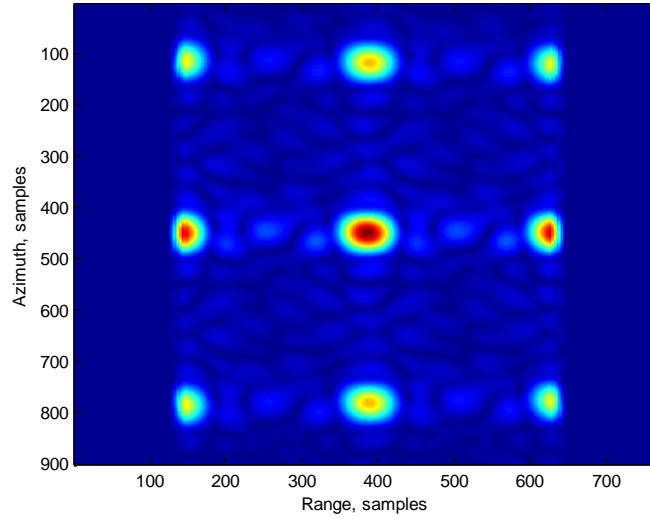
أخيراً، للحصول على صورة رادارية للهدف نقوم بضغط ناتج عملية التصحيح في المدى بالسمت باستخدام مرشح متوافق مع استجابة المخطط الإشعاعي للهوائي في المدى المتعامد. يبين الشكل ٣-١١ خرج المرحلة الأخيرة من الخوارزمية. نلاحظ من هذا الشكل وجود هدف نقطي وحيد ضمن منطقة الأهداف إضافة إلى بعض الامتدادات له في المدى والسمت ناتجة عن عمليات الضغط. يمكن عملياً التقليل من أثر هذه الامتدادات في حال جرى توزيع الاستجابة النبضة للمرشحات المتوافقة بتتابع مناسبة.



الشكل ٣-١١: خرج عملية الضغط بالمدى المتعامد من أجل هدف نقطي

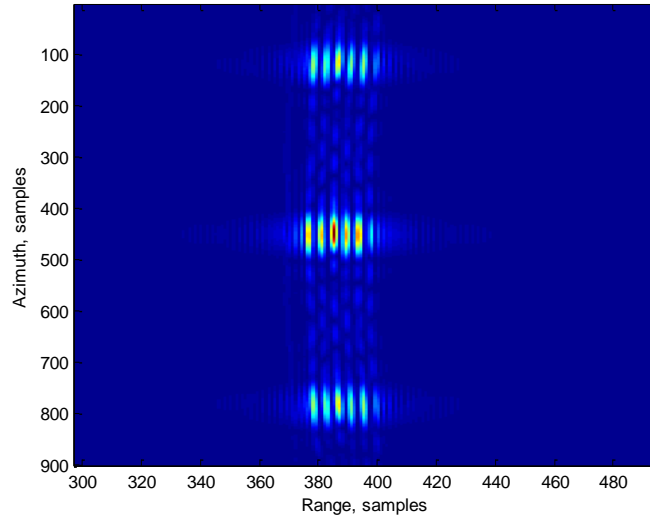
## الحالة الثانية: الهدف المركبة عسكرية

جرى إعادة المحاكاة السابقة من أجل هدف عبارة عن دبابة عسكرية الميمنة في الشكل ٣-٦. يبين الشكل ٣-١٢ ناتج توليد الإشارات المنعكسة عن هذا الهدف.



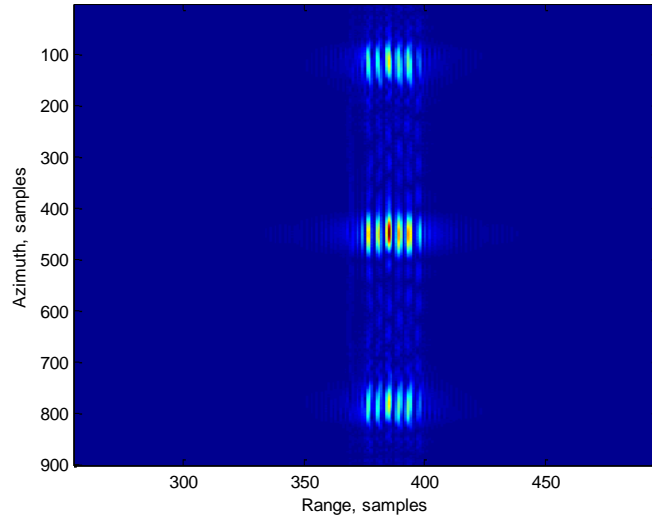
الشكل ٣-١٢: الإشارة المنعكسة عن منطقة المركبة العسكرية

في حين يبين الشكل ٣-١٣ ناتج عملية الضغط بالمدى



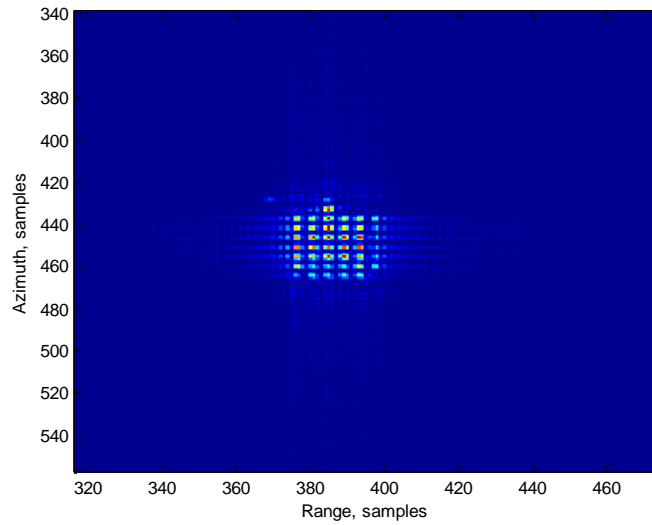
الشكل ٣-١٣: خرج عملية الضغط بالمدى من أجل مركبة عسكرية

يبين الشكل ٣-١٤ ناتج عملية تطبيق خوارزمية تصحيح الخلايا بالمدى.



الشكل ٣-١٤: خرج عملية تصحيح خلايا المدى

أخيراً، يبين الشكل ٣-١٥ الصورة الرادارية لمنطقة الهدف الناتجة عن عملية الضغط بالمدى المتعامد



الشكل ٣-١٥: خرج عملية الضغط بالسمت من أجل مركبة عسكرية

### ٥.٣ . الخاتمة

جرى في هذا الفصل عرض للإشارات المرسله والمستقبله ضمن رادار فتحة تركيبية ذو المسح الشرائطي stripmap، وعرض لخوارزمية معالجة الإشارة المستقبله الأكثر استخداماً في رادارات الفتحة التركيبية بشكل عام وهي الخوارزمية مدى-دوبلر. من ثم جرى في نهاية الفصل عرض لنتائج محاكاة الخوارزمية مدى-دوبلر لحالتين مختلفتين لمنطقة الأهداف، وذلك بعد توليد الإشارات اللازمة لإجراء المحاكاة وعرض النتائج على شكل صورة رادارية.

## الفصل الرابع

# الخداع والتشويش الراداري

يتضمن هذا الفصل مقدمة عن أنواع التشويش بنوعها الفعال وغير الفعال، والتركيز على المشوشات التكرارية، وإجراء محاكاة التشويش على رادار SAR مشوش تكراري لحظي يُعدل إشارة الرادار ترددياً أو طورياً.

### ١.٤ . مقدمة

نتيجة انتشار استخدام النظم الإلكترونية على نحو واسع في الأنظمة العسكرية الحديثة، وبخاصة في مراكز القيادة والسيطرة، ظهرت الحرب الإلكترونية كأحد أساليب الحرب الحديثة لإبطال عمل هذه النظم، وأصبح النصر حليفاً للطرف الذي يحسن استخدام وسائله المختلفة، ويكون قادراً على إعاقة النظم الإلكترونية للعدو وشل فعاليتها كلياً أو جزئياً.

تعتبر الرادارات من أهم الأنظمة الإلكترونية العسكرية في الحرب الحديثة، سمح استخدام الرادارات من التغلب على عنصر المفاجأة لطائرات العدو وساعد في حشد وسائل الدفاع الجوي والطائرات المقاتلة باكراً لمواجهة العدو. يلجأ العدو إلى استخدام إجراءات معاكسة إلكترونية (ECM) electronic Counter measurements للتشويش على هذه الرادارات أو خداعها بأهداف كاذبة من أجل إبطال فعاليتها.

أهم التطبيقات الرئيسية لرادارات الفتحة التركيبية (SAR) هي مسح أرض المعركة وتحديد أماكن المواقع الهامة للعدو ومواقع تمركز قواتها أثناء فترات السلم والحرب. تلجأ القوات عادة إلى تخصيص مواقعها بعدة طرق، على سبيل المثال تلجأ القوات إلى تمويه أماكنها عن طريق تغطيتها بأغطية مناسبة. لَمَّا كانت رادارات الـ SAR هي رادارات ذات تطبيقات خاصة فيمكن استخدام إجراءات المعاكسة الإلكترونية نفسها المستخدمة لإبطال فعالية الرادارات عموماً مع الأخذ بعين الاعتبار خصائص إشاراتها من حيث عرض المجال وغيره.

يُعرف التشويش الإلكتروني على أنه إرسال مُتعمد لإشارات راديوية تقع ضمن مجال عمل الرادارات وتتداخل معها من أجل إشباع المستقبل الراداري لمنعه من كشف الأهداف أو تزويده بمعلومات خاطئة. لَمَّا كانت رادارات الفتحة التركيبية نوعاً خاصاً من رادارات ضغط النبضة فيمكن استخدام التقانات نفسها المستخدمة للتشويش على رادارات ضغط النبضة من أجل

التشويش عليها.

سنعرض فيما يلي مقدمة سريعة عن أساليب التشويش الميكانيكي التي تسمح بتوليد أهداف خداعية على شاشة الرادار وتمنع رادارات العدو من تمييز الهدف الحقيقي. ثم نقدم شرحاً لمبدأ عمل المشوشات الضحيجية وميزاتها ومساوئها. بعد ذلك نعرض مبدأ عمل المشوشات التكرارية، التي تسمح أيضاً بتوليد أهداف خداعية على شاشة الرادار، مع التركيز على عمل المكررات اللحظية. ومن ثم نقدم عرضاً تحليلياً لمبدأ توليد أهداف كاذبة، في المكررات اللحظية، عن طريق تعديل نبضات رادارات ضغط النبضة (SAR) تعديلاً ترددياً أو طورياً. أخيراً، نعرض نتائج محاكاة التشويش على رادار SAR مفترض باستخدام مشوش تكراري لحظي يُعدل إشارة الرادار ترددياً أو طورياً.

## ٢.٤. التشويش الميكانيكي (التشويش غير الفعال)

يستخدم هذا النوع من التشويش أجسام ميكانيكية تقوم بعكس الإشارات الرادارية وتوليد أهداف خداعية على خرج المستقبل الراداري. سنعرض فيما يلي ثلاث أنواع رئيسة من المشوشات الميكانيكية وهي: الديبولات (chaff) والعواكس الزاوية (corner reflectors) والأفخاخ (decoys).

### ١.٢.٤. الديبولات

الديبولات عبارة عن شرائط معدنية لها أطوال مختلفة قادرة على عكس طيف عريض من الإشارات. تقوم الطائرات بإطلاق هذه الديبولات في الهواء عند اقترابها من مناطق العدو لتوليد هدفاً خداعياً حجمه أكبر من حجم الطائرة نفسه مما يصعب عملية تحديد وكشف الطائرة نفسها. عادة تصنع الشرائط المعدنية من الألمنيوم المغلف بألياف زجاجية بأطوال مختلفة وأوزان وأحجام صغيرة جداً مما يسمح بتشكيل سحابة كثيفة وطويلة الأمد. يبين الشكل ٤-١ طلقات تحتوي على شرائط معدنية بأطوال مختلفة تطلقها الطائرات عند الحاجة [١٤].



الشكل ٤-١: طلقات تحتوي على شرائط معدنية من الألمنيوم.

#### ٤.٢.٢.٤. العواكس الزاوية

العواكس الزاوية لها نفس تأثير الشرائط المعدنية ولكن لها شكلاً فيزيائياً مختلف عنها. وهي عبارة عن أجسام متعددة الأوجه تعمل على عكس الاشارات الرادارية باتجاه الرادار. يبين الشكل ٤-٢ نموذجاً نمطياً لهذا النوع من العواكس [١٤].



الشكل ٤-٢: شكل نمطي لعاكس زاوي.

#### ٤.٣.٢.٤. الأفخاخ

الأفخاخ عبارة عن أجسام طائرة قادرة على المناورة تهدف إلى خداع عامل الرادار بحيث يعتقد أنها أهداف حقيقية، وهي خطيرة نظراً لكونها تنتج العديد من الأهداف الوهمية مما يسهل عملية تخفي الطائرة المهاجمة والوصول إلى مناطق العدو.

يمكن إضافة العواكس الزاوية إلى الأفخاخ مما يجعلها أكبر حجماً مما هي عليه في الواقع، مما يزيد من احتمال اعتبارها هدفاً حقيقياً. يبين الشكل ٤-٣ جسم مربوط بطائرة مقاتلة لتضليل عمل صاروخ تم إطلاقه باتجاه الطائرة [١٤].



الشكل ٤-٣: فخ مربوط بطائرة مقاتلة

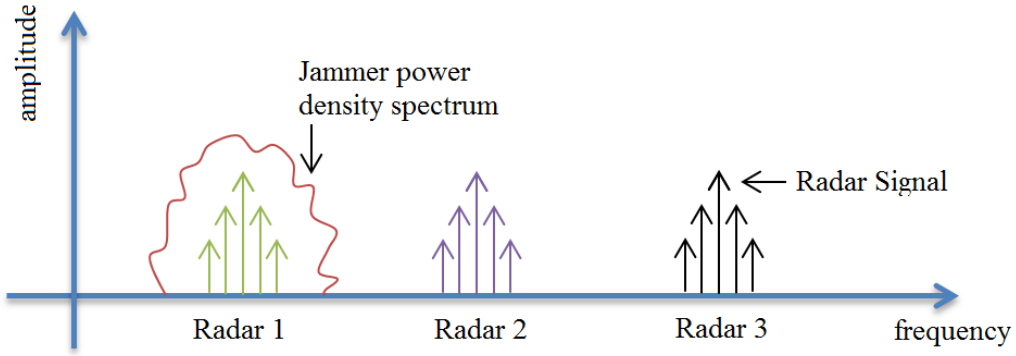
### ٣.٤. التشويش الإلكتروني (التشويش الفعال)

هو أحد أشكال الحرب الإلكترونية الحديثة، حيث يقوم المشوش بإرسال إشارات باتجاه رادارات العدو من أجل إبطال فعالية الرادار إما عن طريق إرسال إشارات ذات استطاعة عالية تسبب إشباع المستقبل الراداري أو عن طريق إشارات مترابطة مع إشارة الرادار تنتج أهدافاً كاذبة (خداعية) على خرج المستقبل الراداري. في كلتا الحالتين لن يكون الرادار قادراً على كشف الهدف الحقيقي والتعامل معه. نميز أساساً بين تقنيتين للتشويش الإلكتروني هما: التشويش الضجيجي، والتشويش التكراري [١٤].

#### ١.٣.٤. التشويش الضجيجي

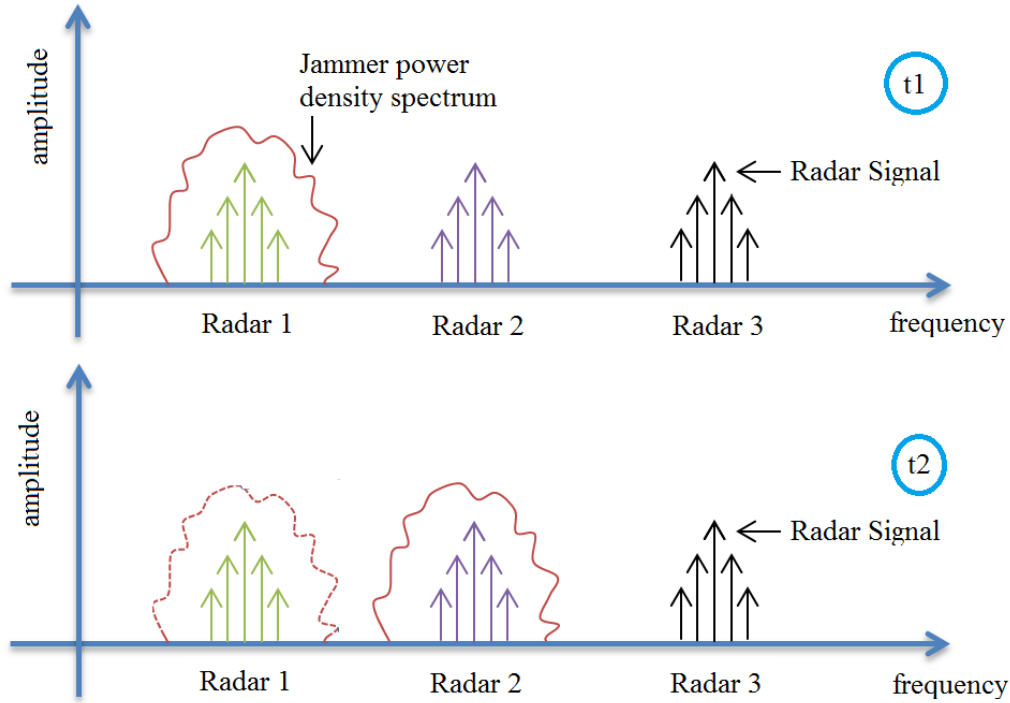
يجري في هذا النوع من التشويش إرسال إشارة ضجيجية باستطاعة عالية باتجاه رادار الضحية تسبب تشبع المستقبل الراداري ومنعه من كشف الأهداف الحقيقية وتحديد معالمها. يمكن تصنيف المشوشات الضجيجية إلى ثلاث أنواع رئيسية تبعاً لعرض المجال الترددي التي تغطيه هذه الإشارات [١٤].

**التشويش المُركَّز (البُوري) (Spot jamming):** يقوم المشوش في هذه الحالة بتركيز استطاعة إشارته حول تردد عمل رادار معين، كما هو مبين في الشكل ٤-٤. تستطيع هذه الطريقة إبطال عمل رادار محدد، ولكن تأثيرها يكون أقل ضد الرادارات التي تتمتع بإمكان تغيير تردد عملها. في هذه الحالة، يجب على المشوش ملاحقة تردد عمل المحطة الرادارية أو إرسال عدة إشارات متمركزة عند عدة ترددات، ولكن ذلك يتطلب زيادة استطاعة المشوش حتى يكون فعالاً [١٤].



الشكل ٤-٤: شكلاً نمطياً للتشويش البؤري.

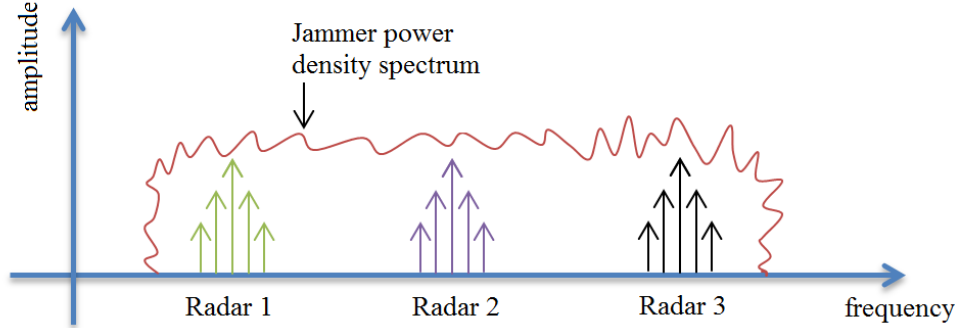
التشويش المنزلق (**Sweep jamming**): يقوم هذا النوع من المشوشات بإزاحة مركز حزمة التشويش من تردد إلى آخر على نحو سريع مع الزمن، كما هو مبين في الشكل ٤-٥. تبدو هذه الطريقة وكأنها قادرة على التشويش على عدة ترددات (رادارات) إلا أنه لا يؤثر عليها في الوقت نفسه، وهذا يقلل من فعالية هذا النوع من التشويش [١٤].



الشكل ٤-٥: طريقة عمل التشويش المنزلق.

التشويش السدي (**Barrage jamming**): يقوم هذا المشوش بنثر طاقة التشويش على طيف ترددي عريض، كما هو مبين في الشكل ٤-٦. إن هذا النوع من المشوشات قادر على التشويش على عدة ترددات بأن واحد، ولكن أدائه

سيكون محدوداً لأنه يقوم بتوزيع استطاعة التشويش على طيف ترددي عريض؛ كلما زاد الطيف الذي يغطيه المشوش كلما قلت فعاليته [١٤].



الشكل ٤-٦: شكلاً نمطياً للتشويش السدي.

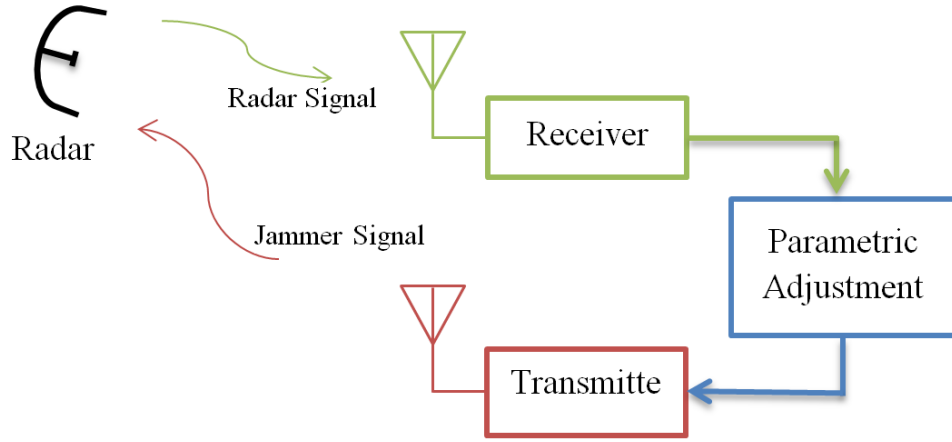
مع أن عملية توليد التشويش الضجيجي سهل نسبياً إلا أنه لا يستفيد من ربح المعالجة في الرادارات عالية الدقة. على سبيل المثال، تتمتع رادارات ضغط النبضة بربح معالجة عالٍ يزيد من نسبة استطاعة الإشارة إلى استطاعة الضجيج على خرج المستقبل مما يقلل من فعالية التشويش الضجيجي غير المترابط مع الإشارة المرسله. لذلك، فإن المشوشات الضجيجية تحتاج إلى استطاعة إرسال عالية للتشويش على مثل هذه الرادارات.

تزداد فعالية المشوش الضجيجي في حال جرى تركيز استطاعة التشويش ضمن مجال الإرسال اللحظي لإشارة الرادار. لَمَّا كانت الرادارات الحديثة تمتلك إمكانية تغيير التردد الحامل للإشارة المرسله كل فترة زمنية، فيجب أن يكون المشوش قادراً على قياس عرض حزمة الإرسال والتردد الحامل اللحظيين لإشارة الرادار وملاحقتها حتى يكون فعالاً. بما أن استطاعة المشوش الضجيجي تكون عادة عالية بالمقارنة مع الإشارات المنعكسة عن الأهداف فيمكن لرادار الضحية أن يقلل من فعالية التشويش الضجيجي باستخدام بعض تقنيات إجراءات معاكسة المعاكسة الالكترونية Electronic Counter-counter measurements (ECCM)، مثل حاذف الحزم الجانبية عريض الحزمة، ومشكل حزمة متكيف في حال كان التشويش يدخل إلى مستقبل الرادار من خلال الحزم الجانبية لهوائي الرادار.

#### ٤.٣.٢. التشويش التكراري

تعتبر المشوشات التكرارية repeater jammer أكثر فعالية ضد الرادارات الحديثة. تعتمد هذه المشوشات إلى طمس إشارة الهدف الحقيقية من خلال إنتاج أهداف خداعية على خرج رادار الضحية عن طريق إرسال، باتجاه رادار ضحية، نسخة

مُعدّلة عن إشارة الرادار المستقبلية من قبل المشوش. تكمن الميزة الأساسية لهذا النوع من المشوشات في كون معظم استطاعة المشوش تدخل إلى المستقبل الراداري، نظراً لكون خصائص إشارة التشويش الزمنية والترددية تماثل خصائص إشارة الرادار الأصلية. وبالتالي، تعالج وحدة المعالجة في رادار الضحية إشارة التشويش والإشارة المنعكسة عن الهدف بالطريقة نفسها. لذلك يجد رادار الضحية صعوبة في كشف هذا النوع من التشويش والتخلص منه. تحتاج المشوشات الخداعية (التكرارية) إلى استطاعة أقل من المشوشات الضحجية. يوضح الشكل ٤-٧ مبدأ عمل مشوش تكراري [١٥].



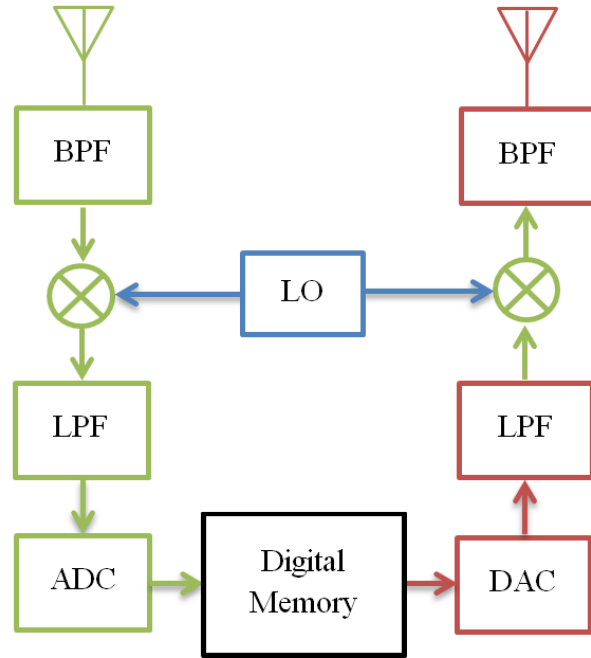
الشكل ٤-٧: مبدأ عمل المشوش التكراري

يمكن تقسيم المشوشات التكرارية إلى المشوشات التي تعتمد على الذاكرة الرقمية (Digital Radio Frequency Memory - DRFM) والمشوشات اللحظية.

#### ٤.٣.٢.١. المشوش التكراري المعتمد على الذاكرة الرقمية

ظهرت هذه التقنية في السبعينيات من القرن العشرين، ولكن كان حينئذ من الصعب تحقيقها عملياً نظراً لكونها تتطلب بعض التقنيات الخاصة. ولكن مع تطور المعالجات الرقمية انتشر استخدام هذا النوع من المشوشات، وأنتجت العديد من الدول مشوشات من هذا النوع. يمكن استخدام هذا المشوش للتشويش على الرادارات التقليدية وعلى رادارات ضغط النبضة. يعتمد مبدأ عمل هذا النوع من المشوشات على استقبال النبضات الرادارية، ونقلها إلى الحزمة القاعدية، وتخزينها ضمن ذاكرة رقمية، وأخيراً إعادة إرسالها باتجاه رادار الضحية بعد تعديلها وإعادة نقلها إلى الترددات العالية بالتزامن مع النبضات الرادارية المرسله تالياً. يمكن لهذا النوع من المشوشات خلق أهداف خداعية على خرج المستقبل الراداري قبل وبعد النبضة المنعكسة عن الهدف عن طريق التحكم بلحظة إرسال نبضات التشويش و/أو تعديل إشارة الرادار بإشارة مناسبة. في هذه الحالة، لن يكون رادار الضحية قادراً على التمييز بين إشارة المشوش وبين الإشارات الحقيقية المنعكسة عن الأهداف [١٥] [١٦].

الشكل ٤-٨ مخططاً صندوقياً لمشوش DRFM. لَمَّا كان هذا النوع من المشوشات يخزن النبضات الرادارية فإنه يتأخر دوماً عنها بنبضة واحدة، فإن الرادارات الحديثة يمكن أن تتغلب على هذا النوع من المشوشات عن طريق تغيير دورها التكراري أو تردد عمله [١٧]، أو عن طريق إرسال إشارات متعامدة [١٨].



الشكل ٤-٨: المخطط الصندوقي للمشوش المكرر المعتمد على الذاكرة الرقمية

حتى يكون المشوش المكرر أكثر فعالية يجب أن يعالج المشوش النبضات الرادارية بالزمن الحقيقي دون أن يحتاج إلى تخزينها، وهذا هو مبدأ عمل المكررات اللحظية instantaneous repeater jammer. في هذه الحالة، كل نبضة رادارية يستقبلها المشوش يقوم بمعالجتها وتعديلها تعديلاً مناسباً ومن ثم يعيد إرسالها مباشرة باتجاه رادار الضحية. يمكن للمشوش في هذه الحالة التشويش على عدة رادارات معاً إذا كان عريض المجال. تنطوي هذه الطريقة على العديد من التحديات التقنية منها، تأمين:

- مكبرات استطاعة عريضة المجال الترددي تغطي مجال عمل الرادارات المراد التشويش عليها.
- هوائيات عريضة المجال الترددي تغطي أيضاً مجال عمل الرادارات المراد التشويش عليها.
- عزل كافٍ بين هوائيات الإرسال والاستقبال نظراً لكون هاتين العمليتين تجريان بآن واحد.

يمكن للمشوشات اللحظية التشويش على رادارات الفتحة التركيبية، التي ترسل إشارات LFM، وخلق أهداف خداعية على

شاشة الرادار وبالتالي عدم تمكين عامل الرادار من تمييز الهدف الحقيقي من الأهداف الخداعية، أو خلق صورة رادارية مشوهة لا تمكن رادار ال SAR من الحصول على معلومات مفيدة. إن من أكثر التعديلات استخداماً في المكررات اللحظية هي التعديل الترددي و/أو التعديل الطوري. سنقدم فيما يلي عرضاً تحليلياً لمبدأ توليد أهداف كاذبة على رادارات ضغط النبضة ترسل نبضات LFM.

#### ٢.٢.٣.٤. المشوش التكراري اللحظي

##### التعديل الترددي

يُمكن كتابة نبضة LFM في الحزمة القاعدية على النحو التالي:

$$p(t) = \frac{1}{\sqrt{T_p}} \exp(j\pi \alpha t^2) \quad 0 \leq t \leq T_p$$

ويمكن تقريب الطيف المطالي لهذه النبضة في حال  $BT_p \gg 1$  بنبضة مستطيلة في المستوى الترددي، والتي يمكن التعبير عنها رياضياً بالعلاقة التالية:

$$P(f) \approx \frac{1}{\sqrt{B}} \exp\left(-j\pi \frac{f^2}{\alpha} + j\frac{\pi}{4}\right) \quad -\frac{B}{2} \leq f \leq \frac{B}{2}$$

وبالتالي، يمكن كتابع تابع الاستجابة الترددية للمرشح المتوافق (في المدى-الزمن السريع) على الشكل التالي:

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{B}} \exp\left(+j\pi \frac{f^2}{\alpha} - j\frac{\pi}{4}\right) \quad -\frac{B}{2} \leq f \leq \frac{B}{2}$$

يعطى خرج المرشح المتوافق في المستوى الترددي بالعلاقة:

$$Y(f) = H(f) \times P(f) = \frac{1}{B} \quad -\frac{B}{2} \leq f \leq \frac{B}{2}$$

وبالتالي يمكن تقريب خرج المرشح المتوافق في مستوى الزمن بنبضة sinc:

$$y(t) = \text{sinc}(Bt) \quad -\frac{T_p}{2} \leq t \leq \frac{T_p}{2}$$

التحليل السابق لم يأخذ بعين الاعتبار بعد الهدف عن الرادار واعتبر معدوماً، أي  $R = 0$ ، وبالتالي يعطي خرج المرشح نبضة ضيقة عند  $t = 0$ .

يمكن التعبير عن إشارة التشويش على خرج المشوش المكرر الناتجة عن تعديل إشارة الرادار -المستقبل من قبل المشوش- بالتردد  $f_z$  رياضياً كما يلي:

$$s_j(t, \eta) = \frac{w_a(\eta - \eta_c)}{\sqrt{T_p}} \exp(j2\pi f_z t + j\pi \alpha t^2) \quad 0 \leq t \leq T_p$$

يمكن كتابة تحويل فورييه لإشارة التشويش هذه في حال  $BT_p \gg 1$  بالنسبة للمتحويل الزمني  $t$  على الشكل التالي:

$$S_j(f, \eta) = \frac{w_a(\eta - \eta_c)}{\sqrt{B}} \exp\left(-j\pi \frac{(f - f_j)^2}{\alpha} + j\frac{\pi}{4}\right) \quad f_j - \frac{B}{2} \leq f \leq \frac{B}{2} + f_j$$

إن تحويل فورييه لخرج المرشح المتوافق من أجل إشارة التشويش  $S_j(t, \eta)$  يساوي جداء الاستجابة الترددية للمرشح المتوافق  $H(f)$  بتحويل فورييه لإشارة التشويش  $S_j(f, \eta)$ ، أي:

$$Y(f, \eta) = H(f) \times S_j(f, \eta)$$

لما كانت الاستجابة المطالية للمرشح المتوافق  $|H(f)|$  نبضة مربعة عرضها  $B$  متمركزة عند التردد صفر والطيف المطالي لإشارة التشويش  $|S_j(f, \eta)|$  نبضة مربعة عرضها أيضاً  $B$  ولكن متمركزة عند التردد  $f_j$  فإن خرج المرشح  $Y(f, \eta)$  سوف يكون معدوماً في حال  $f_j > B$ ؛ لأنه لن يكون هناك في هذه الحالة تراكب طيفي بين إشارة التشويش والاستجابة الترددية للمرشح المتوافق، وبالتالي لن يكون هنالك إشارة على خرج المرشح المتوافق.

يمكن كتابة خرج المرشح المتوافق في حال  $f_j < B$  والذي يمثل تابع الترابط المتعارض بين إشارة التشويش ومطال الاستجابة النبضية للمرشح المتوافق، كما يلي:

$$|y(t, \eta)| = |w_a(\eta - \eta_c)| \left| 1 - \frac{f_j}{B} \right| \left| \text{sinc} \left( (B - f_j) \left( t + \frac{f_j}{\alpha} \right) \right) \right|$$

بالنظر إلى العلاقة الأخيرة، يتبين أن الهدف الخداعي يتقدم على الهدف بمقدار  $\frac{f_j}{\alpha}$ ، وبالتالي يسبق الهدف الخداعي الهدف الحقيقي بمسافة  $\frac{cf_j}{2\alpha}$  حيث  $c$  سرعة الضوء. عملياً يسبق الهدف الخداعي إشارة الهدف عندما  $f_j > 0$  ويتأخر عنه عندما  $f_j < 0$ .

يمكن الملاحظة أيضاً أنه عندما تكون استطاعة إشارة التشويش والإشارة المنعكسة عن الهدف نفسها على دخل المرشح المتوافق فإن نسبة المطال الأعظم لإشارة التشويش إلى المطال الأعظم لإشارة الهدف على خرج المرشح المتوافق تساوي  $(1 - f_j/B)$  وهذه النسبة تتناقص مع زيادة  $f_j$  وهذا بالطبع ناتج عن عدم التوافقية الكاملة بين إشارة التشويش والمرشح المتوافق، وبالتالي يجب على المشوش تعويض هذا الفرق وتكبير استطاعة إشارة التشويش بحيث تصبح أكبر من استطاعة صدى الهدف حتى يكون التشويش فعالاً.

يمكن للمشوش المكرر في حال تعديله لإشارة الرادار بأكثر من تردد إنشاء عدة أهداف على خرج الرادار بآن واحد، ولكن استطاعة المشوش في هذه الحالة سوف تتوزع على الأهداف الخداعية كلها. وبالتالي يحتاج المشوش في هذه الحالة إلى استطاعة أكبر حتى يكون فعالاً.

## التعديل الطوري

يسمح التعديل الطوري بتوليد العديد من الأهداف الخداعية على خرج المرشح المتوافق في حال عدّل المشوش المكرر إشارة الرادار المستقبلية طورياً قبل أن يعيد إرسالها باتجاه الرادار الضحية. سيجري بدايةً الانطلاق في التحليل من تعديل إشارة رادار بطور  $\pm\pi$  تبعاً لإشارة مربعة دورية ترددها  $f_m$ .

يعطى تحليل سلسلة فورييه إشارة مربعة دورية مطالها  $\pm 1$  بالعلاقة التالية:

$$m(t) = \sum_{n \text{ odd}}^{\infty} \frac{2}{j\pi n} \exp(j2\pi n f_m t) \quad n = \pm 1, \pm 3, \dots$$

ويمكن كتابة طيف هذه الإشارة على الشكل التالي:

$$M(f) = \sum_{n \text{ odd}}^{\infty} \frac{2}{j\pi n} \delta(f - n f_m) \quad n = \pm 1, \pm 3, \dots$$

يتكون طيف هذه الإشارة من توافقيات فردية فقط تردداتها  $n f_m, n = \pm 1, \pm 3, \dots$  ومطالاتها  $2/j\pi n$  وطورها  $-\pi/2$ . حيث نلاحظ أن مطال هذه التوافقيات يتناقص مع ازدياد ترددها.

يمكن كتابة إشارة التشويش في المجال الزمني في حالة تعديل إشارة الرادار المستقبلية من قبل المشوش طورياً على الشكل التالي:

$$s_j(t) = m(t) \cdot s(t)$$

ولما كانت عملية الضرب في الزمن تكافئ عملية جداء الطي في المستوي الترددي، فيمكن كتابة العلاقة الأخيرة في المستوي الترددي على الشكل التالي:

$$S_j(f) = M(f) * S(f)$$

$$S_j(f) = S(f) * \sum_{n \text{ odd}}^{\infty} \frac{2}{j\pi n} \delta(f - n f_m) \quad n = \pm 1, \pm 3, \dots$$

$$S_j(f) = \sum_{n \text{ odd}}^{\infty} \frac{2}{j\pi n} S(f - n f_m) \quad n = \pm 1, \pm 3, \dots$$

نلاحظ أن كل حد في العلاقة الأخيرة هو عبارة عن نسخة مزاحة طيفياً بالتردد  $n f_m$  من طيف إشارة الرادار وموزونة بالمقدار  $2/\pi n$ . وبالتالي، عملية التعديل الطوري تكافئ عملية تعديل الإشارة المستقبلية ترددياً بأكثر من تردد بآن واحد.

يمكن كتابة خرج المرشح المتوافق في المستوي الترددي على الشكل التالي:

$$Y(f) = H(f) \cdot \sum_{n \text{ odd}}^{\infty} \frac{2}{j\pi n} S(f - n f_m) \quad n = \pm 1, \pm 3, \dots$$

إن كل حد من الجداءات السابقة:

$$\frac{2}{j\pi n} S(f - nf_m)H(f)$$

ينتج نبضة ضيقة على خرج المرشح المتوافق مقدمة بمقدار  $nf_m/\alpha$  بالنسبة للنبضة المنعكسة عن الهدف على خرج المرشح نفسه، أي بمسافة  $f_m/2\alpha$ . ولكن في فقرة التعديل الطوري وجدنا أنه لا يُنتج الحد السابق خرجاً إلا إذا كان هناك تراكب طيفي بين  $H(f)$  و  $S(f - nf_m)$  وهذا محقق فقط من أجل بعض قيم  $n$ . بفرض  $B$  عرض حزمة التعديل الترددي ضمن نبضة فإن أكبر قيمة لـ  $n$  تنتج تداخلاً في الجداء لسابق يمكن حسابها من العلاقة التالية:

$$f_m \times (2n - 1) \leq 2B$$

ومنه،

$$n = \left\lfloor \frac{(B/f_m) + 1}{2} \right\rfloor$$

ولما كان لدينا  $n$  توافقية موجبة وأخرى سالبة فينتج لدينا  $2 \times \left\lfloor \frac{(B/f_m) + 1}{2} \right\rfloor$  هدف خداعي على الأكثر.

تمت عملية التعديل الطوري السابقة بضرب إشارة الرادار بإشارة مربعة دورية، عملياً يمكن تعميم الطريقة السابقة وضرب الإشارة الرادارية بأي إشارة دورية، بالطبع، تكافئ هذه العملية أيضاً عملية تعديل ترددي بعدة ترددات أيضاً ولكن عملية توزيع كل مركبة ترددية سيختلف تبعاً لثوابت سلسلة فورييه للإشارة الدورية المستخدمة.

في الحقيقة، كل عملية تحافظ على الترابط بين إشارة التشويش والمرشح المتوافق يمكن أن تنشئ هدفاً أو أهدافاً خداعية.

#### ٤.٤ . محاكاة التشويش على إدارات الفتحة التركيبية

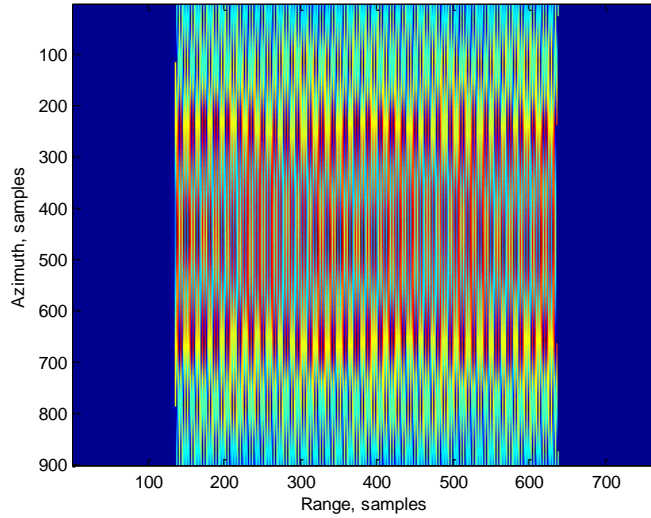
تم إجراء محاكاة -ضمن بيئة ماتلاب- لعملية التشويش على رادار SAR، في حالتين مختلفتين. في الحالة الأولى سنطبق تعديلاً ترددياً على إشارة رادار SAR بافتراض أن المنطقة المستهدفة تحتوي على هدف نقطي واحد. والحالة الثانية سنطبق تعديلاً طورياً على إشارة رادار SAR بافتراض أن المنطقة المستهدفة تحتوي على هدف هو عبارة عن مركبة عسكرية. سيتم التشويش على الأهداف نفسها التي تمت محاكاتها ضمن الفصل الثالث بافتراض أن معاملات الرادار نفسها المبينة في الجدول ١-٣.

#### ١.٤.٤ . تطبيق تعديل ترددي في حالة هدف نقطي

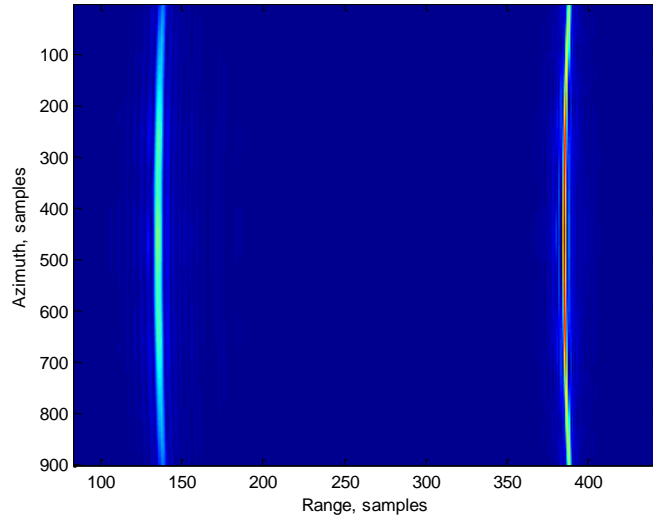
جرى بداية محاكاة الإشارة المنعكسة عن منطقة هدف تحتوي على هدف نقطي على دخل مستقبل رادار SAR بوجود إشارة تشويش، ومن ثم تم تطبيق خوارزمية مدى-دوبلر للحصول على الصورة الرادارية. إشارة التشويش عبارة عن إشارة الرادار معدلة (مزاخة ترددياً) بالتردد  $f_z$ . سوف نبين نتائج المحاكاة من أجل ثلاث قيمة مختلفة لـ  $f_z$ : قيمة موجبة وأخرى سالبة تحققان الشرط  $|f_z| < B$ ، وقيمة ثالثة موجبة لا تحقق الشرط السابق؛ أي في هذه الحالة لدينا  $f_z > B$ .

#### الحالة الأولى: $f_z$ موجبة و $f_z < B$

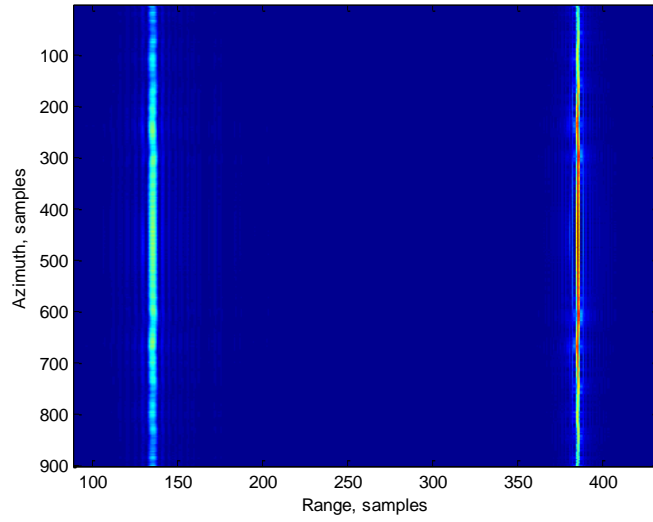
تم اختيار في هذه المحاكاة  $f_z = 50 \text{ MHz}$ ، من أجل توليد هدف خداعي قبل الهدف النقطي بمسافة  $\frac{cf_z}{2\alpha} = 187.5 \text{ m}$ . يبين الشكل ٩-٤ شكل الإشارة، في هذه الحالة، على دخل مستقبل الرادار SAR. ويبين الشكل ٤-١٠ ناتج عملية ضغط الإشارة المستقبلية بالمدى. في حين يبين الشكل ٤-١١ الإشارة نفسها بعد إجراء عملية تصحيح انزياح الخلايا بالمدى. أخيراً، يبين الشكل ٤-١٢ الصورة الرادارية الناتجة عن ضغط ناتج عملية التصحيح في المدى المتعامد. نلاحظ في الشكل ٤-١٢ ظهور هدفين أحدهما هو الهدف الحقيقي والأخر هو الهدف الخداعي. لما كانت المسافة الفاصلة بين بيكسلين من صورة منطقة الهدف تساوي  $0.75 \text{ m}$  فإنه الهدف الكاذب سوف يظهر قبل الهدف النقطي بـ 250 بيكسل؛ أي عند البيكسل 135، علماً أن الهدف الحقيقي عند البيكسل 385. انظر الشكل ٤-١٢.



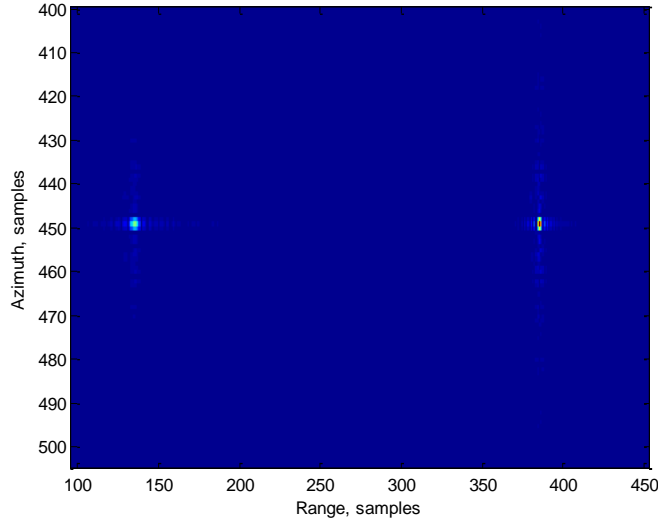
الشكل ٩-٤: الإشارة على دخل مستقبل رادار SAR حال هدف نقطي و  $f_z = 50 \text{ MHz}$



الشكل ٤-١٠: خرج عملية الضغط بالمدى في حال هدف نقطي



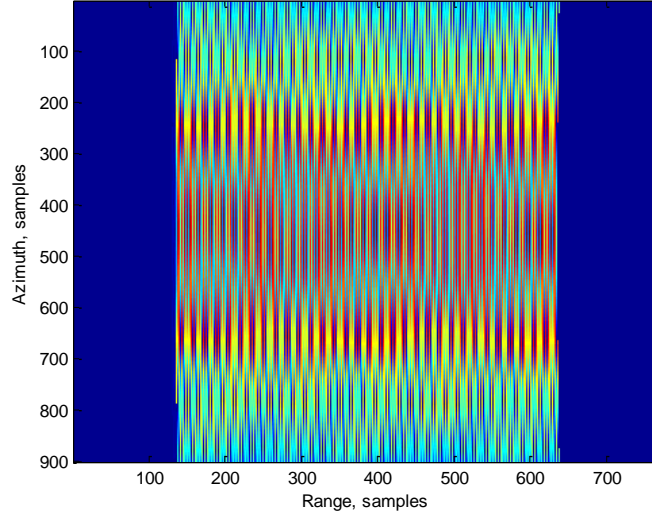
الشكل ٤-١١: خرج عملية تصحيح الخلايا بالمدى



الشكل ٤-١٢: خرج عملية الضغط بالمدى المتعامد في حال هدف نقطي

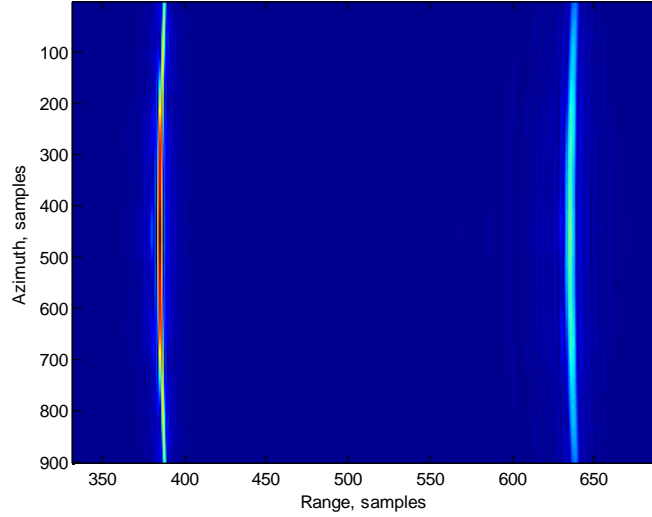
#### الحالة الثانية: $f_j$ سالبة و $f_j < B$

تم اختيار في هذه المحاكاة  $f_j = 50$ ، من أجل توليد هدف خداعي بعد الهدف النقطي بمسافة  $\frac{cf_j}{2\alpha} = 187.5 m$ . يبين الشكل ٤-١٣ شكل الإشارة، في هذه الحالة، على دخل مستقبل الرادار SAR. ويبين الشكل ٤-١٤ ناتج عملية ضغط الإشارة المستقبلية بالمدى. في حين يبين الشكل ٤-١٥ الإشارة نفسها بعد إجراء عملية تصحيح انزياح الخلايا بالمدى. أخيراً، يبين الشكل ٤-١٦ الصورة الرادارية الناتجة عن ضغط ناتج عملية التصحيح في المدى المتعامد. نلاحظ في الشكل ٤-١٦ ظهور هدفين أحدهما هو الهدف الحقيقي والآخر هو الهدف الخداعي. لما كانت المسافة الفاصلة بين بيكسلين من صورة منطقة الهدف تساوي  $0.75 m$  فإنه الهدف الكاذب سوف يظهر بعد الهدف النقطي بـ 250 بيكسل؛ أي عند البيكسل 635، علماً أن الهدف الحقيقي عند البيكسل 385. انظر الشكل ٤-١٦.

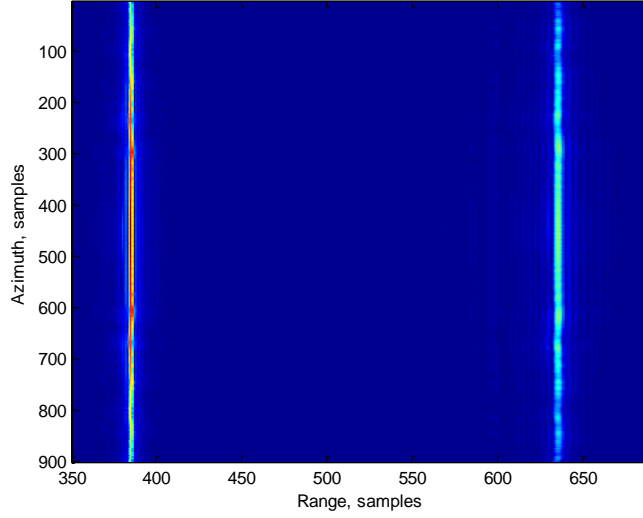


الشكل ٤-١٣: الإشارة على دخل مستقبل رادار SAR حال هدف نقطي و  $f_j = 50 \text{ MHz}$

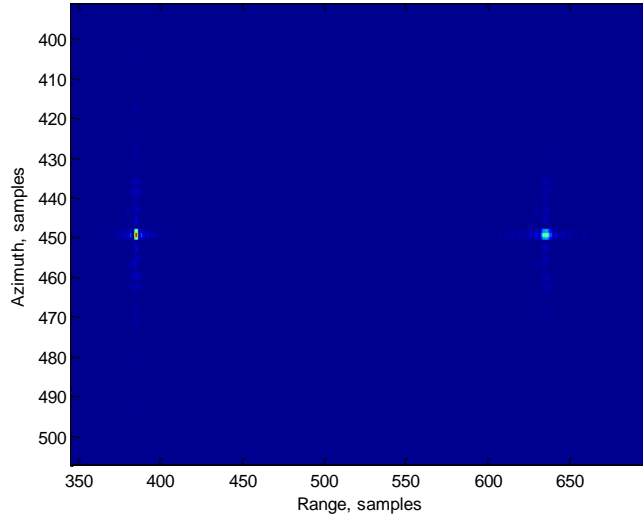
بعد ذلك تتم عمليات الضغط بالمدى وتصحيح انزياح خلايا المدى ومن ثم الضغط في المدى المتعامد، فنحصل على الأشكال ٤-١٤ و ٤-١٥ و ٤-١٦ حيث نلاحظ وجود هدفين أحدهما هو الهدف الحقيقي والآخر هو الهدف الخداعي



الشكل ٤-١٤: خرج عملية الضغط بالمدى في حال هدف نقطي



الشكل ٤-١٥: خرج عملية تصحيح الخلايا بالمدى

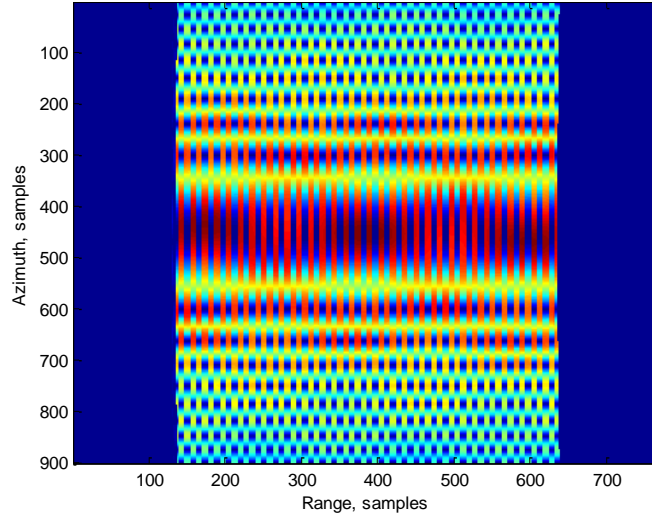


الشكل ٤-١٦: خرج عملية الضغط بالمدى المتعامد في حال هدف نقطي

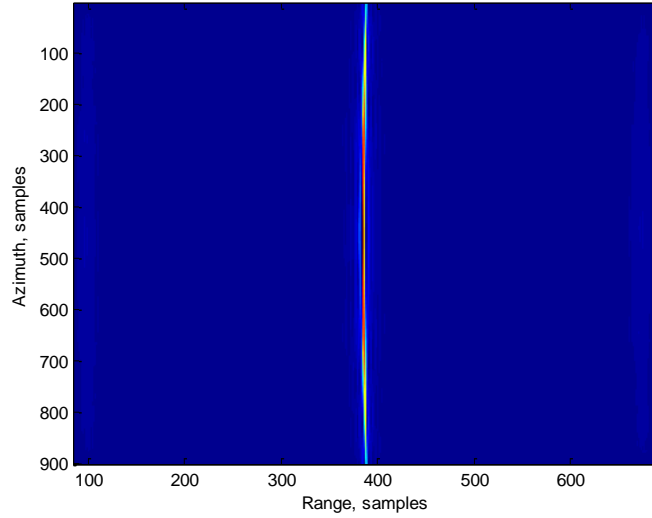
### الحالة الثالثة: $f_j$ أكبر من $B$

تم اختيار في هذه المحاكاة  $f_j = 300 \text{ MHz}$ . لَمَّا كانت قيمة  $f_j$  أكبر من  $B$  فمن المتوقع أن لا يكون للتشويش أي تأثير على عمل الرادار. يبين الشكل ٤-١٧ شكل الإشارة، في هذه الحالة، على دخل مستقبل الرادار SAR. ويبين الشكل ٤-١٨ ناتج عملية ضغط الإشارة المستقبلية بالمدى. في حين يبين الشكل ٤-١٩ الإشارة نفسها بعد إجراء عملية تصحيح انزياح الخلايا بالمدى. أخيراً، يبين الشكل ٤-٢٠ الصورة الرادارية الناتجة عن ضغط ناتج عملية التصحيح في المدى المتعامد. نلاحظ من الشكل ٤-٢٠ ظهور فقط الهدف الحقيقي وغياب أي تأثير للمشوش على عمل الرادار، وهذا كان متوقعاً نظراً

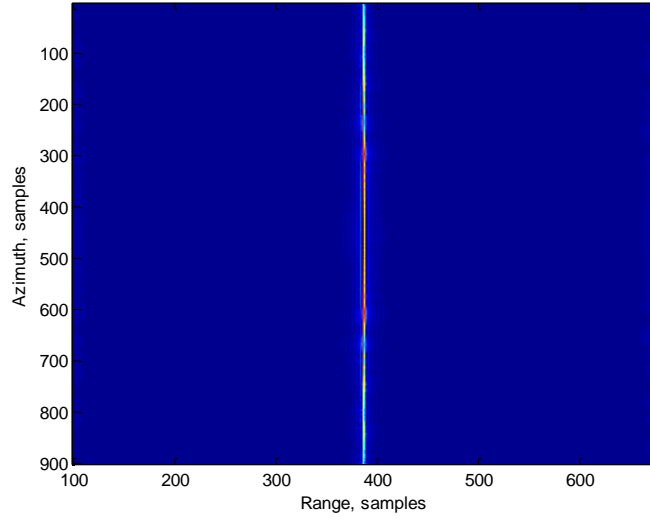
لعدم وجود تراكب طيفي بين إشارة المشوش والاستجابة الترددية للمرشح المتوافق.



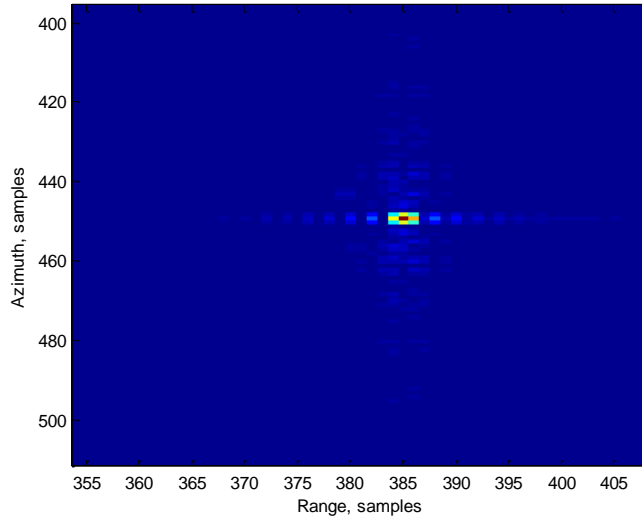
الشكل ٤-١٧: الإشارة على دخل مستقبل رادار SAR في حال هدف نقطي و  $f_j = 300 \text{ MHz}$



الشكل ٤-١٨: خرج عملية الضغط بالمدى في حال هدف نقطي



الشكل ٤-١٩: خرج عملية تصحيح الخلايا بالمدى

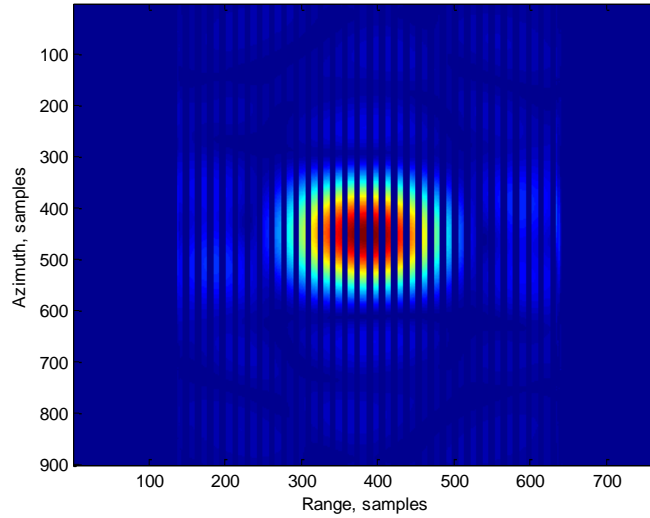


الشكل ٤-٢٠: خرج عملية الضغط بالمدى المتعامد في حال هدف نقطي

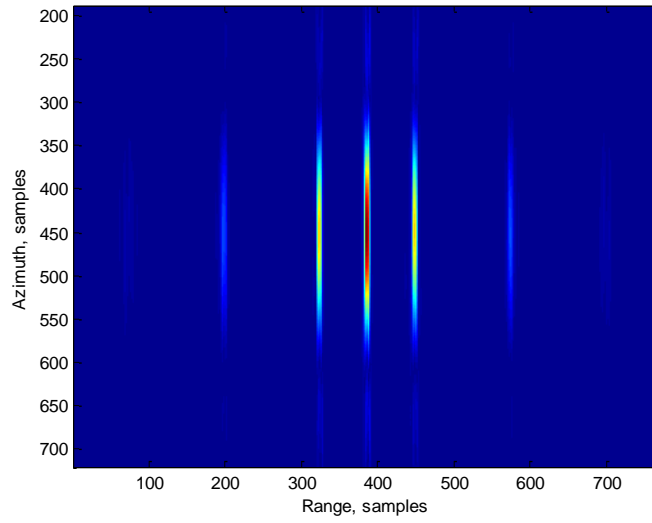
#### ٢.٤.٤. تطبيق تعديل طوري في حالة مركبة عسكرية

في هذه المحاكاة سنفترض أن المشوش يقوم بتعديل إشارة الرادار طورياً بإشارة مربعة، دورها  $T_m = 0.08 \mu s$  قبل إعادة إرسالها إلى رادار الضحية، بافتراض أن منطقة الهدف تحتوي على مركبة عسكرية، انظر الشكل ٣-٧. جرى بداية محاكاة الإشارة على دخل مستقبل رادار SAR بوجود إشارة تشويش، ومن ثم تم تطبيق خوارزمية مدى-دوبلر للحصول على الصورة الرادارية. يبين الشكل ٤-٢١ شكل الإشارة، في هذه الحالة، على دخل مستقبل الرادار SAR. ويبين الشكل ٤-٢٢ ناتج عملية ضغط الإشارة المستقبل بالمدى. في حين يبين الشكل ٤-٢٣ الإشارة نفسها بعد إجراء عملية تصحيح انزياح الخلايا

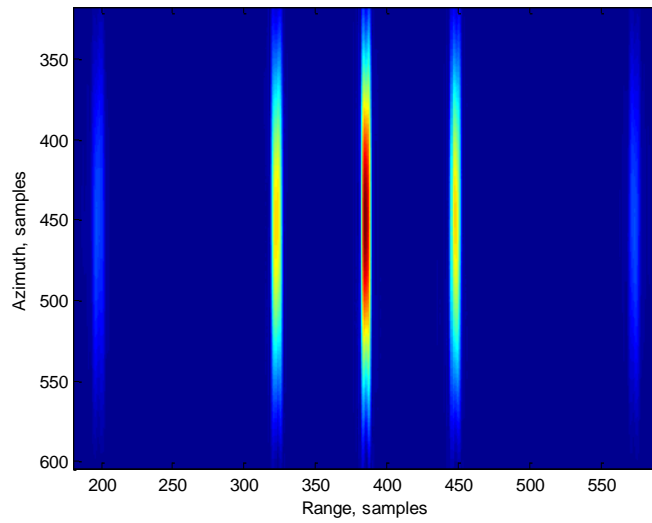
بالمدى. أخيراً، يبين الشكل ٤-٢٤ الصورة الرادارية الناتجة عن ضغط ناتج عملية التصحيح في المدى المتعامد. يبين الشكل ٤-٢٤ ظهور أربعة أهداف خداعية على طرفي الهدف الحقيقي، سطوع هذه الأهداف تقل كلما ابتعدت عن الهدف الحقيقي نظراً لكون مطال المركبات الترددية المولدة لها موزونة بـ  $2/j\pi n$ . تظهر الأهداف الخداعية على مسافة  $cnf_m/2\alpha$  من الهدف الحقيقي، من أجل قيم فردية لـ  $n$ . تظهر الأهداف الخداعية عملياً على مسافة  $\frac{cf_m}{2\alpha} = 46.875 m$  و  $\frac{c3f_m}{2\alpha} = 140.625 m$  قبل وبعد الهدف الحقيقي. لما كانت المسافة الفاصلة بين بيكسلين من صورة منطقة الهدف تساوي  $0.75 m$  ومركز الهدف الحقيقي هو عند البيكسل 385 فإن هذه الأهداف الخداعية سوف تظهر عند البيكسلات 477 و 574 و 323 و 197، انظر الشكل ٤-٢٤. بتكبير الشكل ٤-٢٤، انظر الشكل ٤-٢٥، نجد تشابه كبير بين شكل الأهداف الخداعية وشكل الهدف الحقيقي.



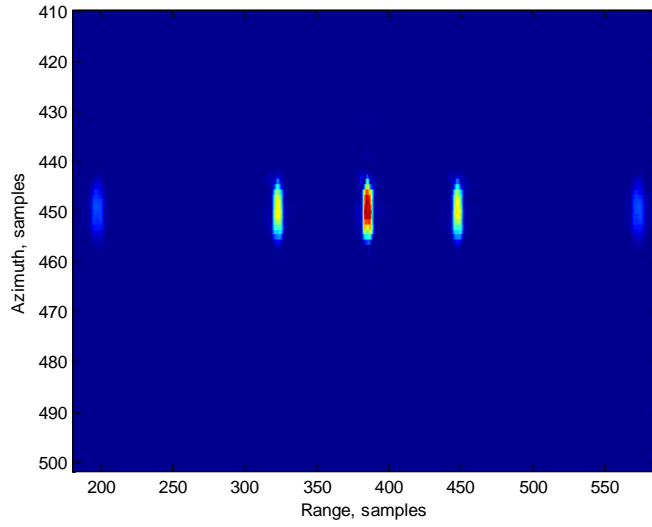
الشكل ٤-٢١: الإشارة على دخل مستقبل رادار SAR في حال هدف عبارة عن مركبة عسكرية و  $T_m = 0.08 \mu s$



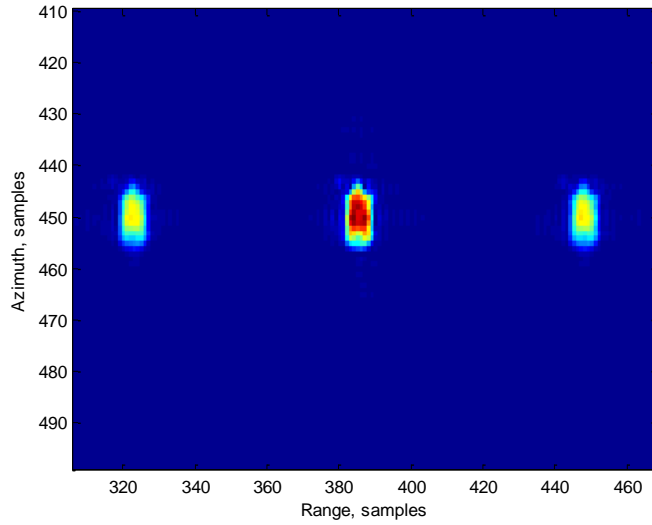
الشكل ٤-٢٢: خرج عملية الضغط بالمدى في حال هدف عبارة عن آلية عسكرية



الشكل ٤-٢٣: خرج عملية تصحيح الخلايا بالمدى



الشكل ٤-٢٤: خرج عملية الضغط بالمدى المتعامد في حال هدف عبارة عن آلية عسكرية



الشكل ٤-٢٥: مقارنة بين شكل الأهداف الخداعية وشكل الهدف الحقيقي

## الخاتمة

جرى في هذا الفصل عرض لبعض طرق التشويش على الرادارات بشكل عام وعلى رادارات ال SAR على نحو خاص. قمنا في البداية بعرض سريع لبعض أساليب التشويش الميكانيكية، ومن ثم قدمنا عرضاً للمشوشات الالكترونية مع التركيز على استخدام المكررات اللحظية للتشويش على رادارات ال SAR. جرى في نهاية الفصل عرض لنتائج محاكاة لمشوش مكرر لحظي يعدل إشارة رادار SAR مفترض تعديلاً ترددياً أو طورياً، وبيننا أن مثل هذه المشوشات قادرة على تشويه الصورة الرادارية لرادار SAR من خلال إنتاج أهداف وهمية تمنع المستخدم من تمييز الأهداف الحقيقية والتعامل معها.

## الخاتمة

الهدف الأساسي من هذا العمل هو دراسة إمكانية التشويش على رادارات الفتحة التركيبية الشرائطية. يأتي أهمية هذا العمل من استخدام العدو عادة لرادارات الفتحة التركيبية لسطح المناطق الاستراتيجية ومراقبة تحرك القوات العسكرية.

جرى بداية تقديم دراسة نظرية عن رادارات الفتحة التركيبية على نحو عام، وعلى رادارات الفتحة التركيبية ذات المسح الشرائطي على نحو خاص. ومن ثم تم عرض تقنية ضغط النبضات المستخدمة في هذا النوع من الرادارات وخصائص الإشارة المعدلة ترددياً خطياً باستخدام تابع الغموض. جرى عرض طريقتين لضغط النبضات الرادارية في المستقبل الراداري باستخدام مرشح متوافق وباستخدام مرشح متوافق بالإشارة المرجعية. بينت نتيجة المقارنة بين عمل هاتين الطريقتين أن الطريقة الأولى أكثر ملائمة للتنجيز العملي في حال كانت منطقة الهدف بعيدة عن الرادار. ومن ثم جرى دراسة نظرية لرادار الفتحة التركيبية من النوع stripmap، تضمنت عرضاً مفصلاً لخوارزمية مدى-دوبلر المستخدمة في هذا النوع من الرادارات من أجل الحصول على صورة رادارية لمنطقة الهدف من الإشارات المنعكسة عنها. جرى محاكاة هذه الطريقة ضمن بيئة ماتلاب من أجل هدف نقطي ومن أجل مركبة عسكرية. من أجل التشويش على رادارات الفتحة التركيبية فمنا بعرض بعض أنواع التشويش الفعالة وغير الفعالة المستخدمة للتشويش على الرادارات عموماً مع التركيز على المشوشات التكرارية. بينت الدراسة النظرية إمكانية التشويش على رادار stripmap مفترض باستخدام مشوش تكراري آني يُعدل إشارة الرادار ترددياً أو طورياً. بينت نتائج محاكاة مشوش تكراري يعدل إشارة الرادار ترددياً بتردد وحيد قدرته على خداع الرادار عن طريق توليد هدف خداعي واحد ضمن هذه الصورة الرادارية على نفس الاحداثيات الأفقية للهدف المستطلع. في حين يمكن بتعديل إشارة الرادار طورياً توليد عدد من الأهداف الخداعية معاً أيضاً على نفس الاحداثيات الأفقية للهدف المستطلع. يمكن التحكم بإحداثيات الهدف الخداعي (الأهداف الخداعية) عن طريق تغيير تردد التعديل أو شكل وبارامترات إشارة التعديل المستخدمة في التعديل الطوري.

نظراً لأهمية موضوع هذه الأطروحة نرى أنه من المفيد متابعة العمل فيه ودراسة إمكانية التشويش على أنواع أخرى من رادارات الفتحة التركيبية باستخدام طرق أخرى تسمح إما بتشويه الصورة الرادارية بحيث لا تحوي الصورة الرادارية معلومات مفيدة عن المنطقة المستطلعة أو إنتاج أهداف خداعية على أمدية متعامدة مختلفة.

## المراجع

- [1] Richards, M. A. “*Fundamental of Radar Signal Processing*”, McGraw-Hill, 2005.
- [2] Skolnik, M.I. “*Radar Handbook*”, third edition,, McGraw-Hill, 2008,
- [3] Ozdemir, C. “*Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms*”, John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [4] Mahafza B. R. and Elshebeni, A. Z. “*Matlab Simulations for Radar System Design*”, CHAPMAN & HALL/CRC, 2004.
- [5] Inggs, M.R. and Lord, R.T. “Applications of Satellite Imaging Radar”, on web (<http://www.rrsg.uct.ac.za/applications/applications.html>).
- [6] Skolnik, M.I. “*Introduction to Radar System* “, third edition, McGraw-Hill Higher Education, 2001.
- [7] أبو النور، حسن و عبود، فريز و الحسين، محمد "هندسة الرادار والسونار"، جامعة دمشق، ٢٠١١.
- [8] Richards, M. A. and Scheer, J. A. and Holm,W. A, “Principle Of Modern Radar (Basic Principles)”, SciTech Publishing, 2010.
- [9] Levanon, N. and Mozeson, E. “Radar Signals”, A JOHN WILEY & SONS Inc, 2004.
- [10] KL University, “Performance evaluation of NLFM Wave form in Pulse compression RADAR”.
- [11] Mazzaro, G. J. and Sherbondy, K. D. “Combined Linear and Nonlinear Radar: Waveform Generation and Capture”, Army Research Laboratory, April 2013.
- [12] Soumekh, M. “Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms”, A JOHN WILEY & SONS Inc, 2008.
- [13] Cumming, I.G., and Wong, F. H., “digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation”, ARTCH House, 2005.
- [14] “Radar jamming and deception”, Wikipedia. On web: ([https://en.wikipedia.org/wiki/Radar\\_jamming\\_and\\_deception](https://en.wikipedia.org/wiki/Radar_jamming_and_deception)).
- [15] “Digital radio frequency memory”, Wikipedia. On web: ([https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_radio\\_frequency\\_memory](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_radio_frequency_memory)).
- [16] Liu, Q., Dong, J., Wang, X., and Pang, B., “An Efficient SAR Jammer With DRFM”, Progress In Electromagnetic Research, vol. 137, 293-309, 2013.
- [17] M. V. Maksimov: 'Radar anti-jamming techniques', Artech House, 1979.
- [18] Hai Deng: 'Polyphase Code Design for Orthogonal Netted Radar Systems', IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, VOL. 52, NO. 11, NOVEMBER 2004.