

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف

برمجياً باستخدام برنامج *GNU Radio*

طالبة الدكتوراه: م. سعاد دوار (1)

الدكتور المشرف الأساسي: د. ياسر عملة (2)

الدكتور المشرف المشارك: د. عبد الكريم السالم (3)

الملخص

يدرس هذا البحث تصميم ومحاكاة رادار موجة مستمرة مُعدّلة ترددياً FMCW مُعتمد على راديو مُعرّف برمجياً SDR باستخدام GNU Radio يمكن استخدامه كحل منخفض التكلفة لتحديد مواقع الأهداف. تم تصميم النظام باستخدام برنامج GNU Radio Companion، وبلاستفادة من إمكانيات معالجة الإشارات الرقمية DSP لمحاكاة توليد إشارة FMCW، وانعكاس الهدف، وفك التعديل. تم تحليل البارامترات الرئيسية مثل عرض المجال الترددي، وزمن المسح، ومسافة/سرعة الهدف. كما تم تقييم أشكال موجات سن المنشار والموجة المثلثية في ظروف متشابهة لتقييم مدى ملاءمتها لتطبيقات الرادار.

أجريت معالجة إشارة رادار FMCW باستخدام وحدات تم برمجتها بلغة Python للحصول على طيف الإشارة المستقبلية وبالتالي مسافة الهدف الثابت، ومسافة وسرعة الهدف المتحرك سواء المقترّب من الرادار أو المبتعد عنه. كما تم دراسة تأثير الضجيج على تحديد بارامترات الهدف.

أظهرت عمليات المحاكاة أن شكل موجة سن المنشار يوفر معالجة أبسط لتقدير المدى بفضل مسحه الخطي وتبسيط استخراج تردد النبض، بينما يتيح شكل موجة المثلثية قياس المدى وقياس دوبلر في وقت واحد من خلال استغلال المسح لأعلى ولأسفل، مع زيادة تكلفة المعالجة. يُفضّل

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

شكل موجة سن المنشار للأهداف الثابتة أو بطيئة الحركة، بينما تُفضّل أشكال الموجة المثلثية للسيناريوهات الديناميكية التي تتطلب بيانات السرعة.

الكلمات المفتاحية: الراديو المُعرّف برمجياً، الرادار، موجة مستمرة معدلة ترددياً، تردد النبض، إزاحة دوبلر، مدى الهدف، سرعة الهدف.

(1) طالبة دكتوراه ومعيدة موفدة في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية_قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات في جامعة حمص

(2) أستاذ في هندسة الإلكترونيات والاتصالات في جامعة حمص، اختصاص: معالجة الإشارة

(3) أستاذ في هندسة الإلكترونيات والاتصالات في جامعة حمص، اختصاص: اتصالات وأمواج ميكروية

Performance Analysis of FMCW Based SDR Radar: A GNU Radio Simulation Study

Abstract

This research investigates the design and simulation of a frequency-modulated continuous wave (FMCW) radar based on a software-defined radio (SDR) using GNU Radio. This radar can be used as a low-cost solution for target location. The system was designed using GNU Radio Companion, leveraging digital signal processing (DSP) capabilities to simulate FMCW signal generation, target reflection, and demodulation. Key parameters such as frequency domain width, sweep time, and target distance/velocity were analyzed. Sawtooth and triangular waveforms were evaluated under similar conditions to assess their suitability for radar applications.

The FMCW radar signal was processed using Python modules to obtain the spectrum of the received signal and, consequently, the distance of a stationary target, as well as the distance and velocity of a moving target approaching or receding from the radar. The effect of noise on target parameterization was also studied.

Simulations have shown that the sawtooth waveform offers simpler processing for range estimation due to its linear sweep and simplified pulse frequency extraction, while the triangular waveform enables simultaneous range and Doppler measurements by utilizing up-and-down sweeps, with increased processing cost. The sawtooth waveform is preferred for stationary or slow-moving targets, while the triangular waveform is preferred for dynamic scenarios requiring velocity data.

Keywords: Software defined radio, radar, frequency modulated continuous waveform, beat frequency, doppler shift, target range, target velocity.

1. المقدمة

ينطوي عمل الرادار على إرسال إشارة في مجال الموجات الميكروية فتعكس هذه الإشارة عن الهدف. جزء من هذا الانعكاس والمسمى بالصدى، يستقبله هوائي الرادار ويُرسله إلى جهاز الاستقبال لإجراء معالجة للإشارة وتحديد اتجاه ومسافة الهدف. يتم حساب مسافة الهدف عن الرادار باستخدام المعادلة [1]:

$$R = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad (1)$$

حيث يمثل τ التأخير الزمني بين الإشارة المرسلَة والإشارة المستقبلَة ويقدر بـ [S]. و c هي سرعة الضوء في الخلاء وتقدر بـ $[m/s]$.

العديد من أجهزة الرادار المنتشرة حالياً مكلفة ومعقّدة، مما يجعلها غير مناسبة للعديد من التطبيقات. في الآونة الأخيرة، تم تطوير أحد أهم التقنيات في عالم الاتصالات الراديوية وهي تقنية الراديو المُعرّف برمجياً (SDR) وهو نظام اتصالات راديوي يتم تنفيذ مكوناته مثل الموازج، المرشحات، المضخمات، المبدلات، وأجهزة الكشف، وما إلى ذلك، برمجياً على جهاز حاسب شخصي أو حاسب مُضمّن. يملك SDR بنية أبسط من أنظمة الراديو التقليدية حيث يقوم بمعظم عمليات التعديل وفك التعديل برمجياً [1][2].

توفر تقنية SDR مزايا مهمة مثل المرونة في التشغيل، والتكلفة الأقل، وكونه أسرع وأسهل في التشغيل، التصميم، والتنفيذ. ونظراً لأن تصميم الرادار يعتمد بشكلٍ أساسي على تقنيات الراديو، لذلك فإن تقنية SDR تملك إمكانية عالية لتنفيذها وتشغيلها كرادار [2].

تتناول هذه الدراسة تنفيذ رادار موجة مستمرة مُعدّلة ترددياً (FMCW) باستخدام SDR. والذي يختلف عن الرادار النبضي الشائع الذي يرسل نبضات قصيرة في نطاق زمني دوري. فلا يتطلب رادار FMCW استطاعة إرسال كبيرة للحصول على قيمة كافية لنسبة الإشارة إلى الضجيج لكشف الهدف [2][5].

هناك نوعان من رادار FMCW، هما LFM (تعديل التردد الخطي) و NLFM (تعديل التردد غير الخطي). NLFM سهل التنفيذ، باستخدام التعديل الجيبي على سبيل المثال، ولكن تردد النبض لكل كائن ليس فريداً. أي لا يمكن تمييز الكائنات على مسافات مختلفة، لذلك NLFM مناسب فقط لحالات الكائن المفرد. مع LFM لا تحدث هذه المشكلة لأن تردد النبض فريد لكل هدف. ويمكن استخدام موجة سن المنشار أو الموجة المثلثية في التعديل [3]، وهو النوع الذي سنبحث في بنيته وأدائه في هذه الدراسة.

تركز الدراسات الحديثة على مرونة الراديو المُعرّف برمجياً، كفاءة خوارزميات معالجة الإشارة، حالات الاستخدام في سيناريوهات الأهداف المتعددة، بالإضافة لتخفيف الضجيج. ويتم عرض بعضاً منها فيما يلي:

نفذ الباحث في المرجع [9] نظام رادار SDR-FMCW باستخدام GNU Radio و USRP X310. وحقق دقة مدى $\pm 0.2m$ للأهداف الثابتة. وأخطاء السرعة أقل من $0.5m/s$ للأهداف المتحركة باستخدام معالجة دوبلر القائمة على الطور. ويحد انخفاض الأداء في بيئات متعددة المسارات من استخدامه.

اقترح الباحث في المرجع [10] خوارزمية هجينة لتحويل فورييه السريع مع خوارزمية تصنيف الإشارات المتعددة (FFT-MUSIC) لكشف أهداف متحركة متعددة. أدى ذلك إلى تحسين دقة السرعة بنسبة 30% مقارنةً بتحويل فورييه السريع القياسي. كما أظهرت هذه الدراسة كشفاً لمركبتين على مسافة 100m بسرعة نسبية $10m/s$.

درس الباحث في المرجع [11] قيود SDR-FMCW في البيئات الكثيفة. ولاحظ ازدياد الإنذارات الكاذبة عند استخدام معدل الإنذارات الخاطئة الثابت CFAR (Constant false alarm rate) بنسبة 20%. لأكثر من 5 أهداف. واقترح مُصنفاً قائماً على الشبكات العصبية التلافيفية CNN (Convolutional neural networks) لتقليل الإنذارات الكاذبة.

قام الباحث في المرجع [12] بتحديد تأثير ضجيج طور مُذبذب SDR على أداء FMCW. ولاحظ أنه عندما يكون ضجيج الطور أكبر من $-80dB/Hz$ ، انخفضت نسبة SNR بمقدار $3dB$. وأوصى باستخدام مذبذبات خارجية منخفضة الضجيج للتطبيقات الحرجة.

2. هدف البحث

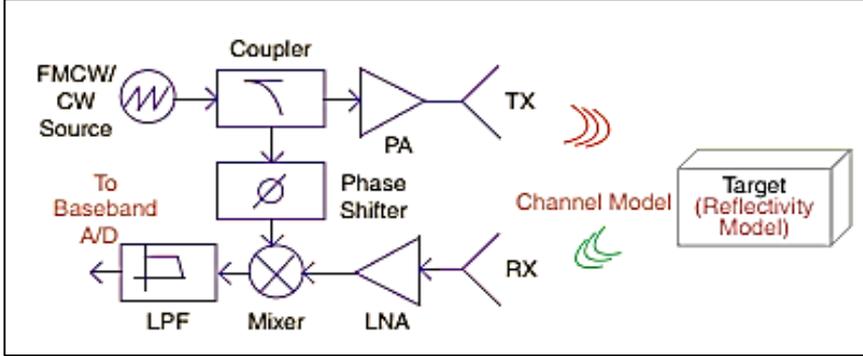
تبحث هذه الدراسة في إمكانية استخدام رادار FMCW المُعتمد على SDR باستخدام GNU Radio لاكتشاف الأهداف الساكنة والمتحركة من خلال مجموعة من عمليات المحاكاة. ويتم

تنظيم البحث بحيث يشرح القسم الثالث مفهوم رادار FMCW. بينما يقدم القسم الرابع عمليات المحاكاة ونتائجها. يعرض القسم الخامس أهم النتائج والأعمال المستقبلية.

3. رادار FMCW

رادار FMCW هو نوع من رادارات الموجة المستمرة CW بحيث تخضع الموجة الحاملة فيه لتعديل ترددي. وبخلاف رادار CW، يمكن لرادار FMCW قياس المسافة التي يقع عندها الهدف بالإضافة إلى السرعة كونه يملك علامة زمنية. فنظراً لأن مدى الهدف يتم الحصول عليه عادةً عن طريق قياس التأخير الزمني ثنائي الاتجاه لمسافة الهدف عن الرادار؛ فلا تستطيع رادارات CW ذات التردد الواحد غير المُعدّل قياس مدى الهدف [1] [4].

يوضح الشكل (1) المخطط الصندوقي لنظام رادار FMCW بشكلٍ مجرد عن آلية تنفيذه سواء باستخدام SDR أو باستخدام شريحة رادار تقليدية. والذي يتضمن مولد تغريدات (إشارة حامل مستمرة يتم تعديلها بواسطة تابع دوري) كإشارة مصدر لجهاز الإرسال وكذلك كدخل لدارة المزج في المستقبل إذا كان الرادار أحادي الثبات monostatic (أي يملك هوائي الإرسال والاستقبال نفس الموقع). يتم تعريف إشارة رادار FMCW بشكلٍ شائع كتغريدة يمكن أن تكون أحد الأشكال المختلفة لموجة الإشارة، وعادةً ما يُستخدم شكل موجة LFM. يتم إرسال إشارة رادار FMCW بواسطة هوائي مرسل باتجاه وجود الأهداف، ثم يتم استقبال الإشارة المنعكسة من بعض الأهداف عبر هوائي استقبال ليتم مزجها مع الإشارة المرسله للمزيد من المعالجة والعرض على الشاشة. يتم تضخيم الإشارة المستقبلية بواسطة مضخم منخفض الضجيج LNA، ثم تنفيذ عملية المزج بواسطة المازج الذي ينتج إشارتين لهما ترددات الجمع والطرح لإشارات الدخل. يسمى تردد الفرق بين الإشارتين إشارة النبض والذي تتناسب قيمته مع المسافة بين الرادار والهدف [2][1] [4][3].



الشكل (1) مخطط صندوقي لرادار FMCW [1][2][3][8].

3.1. رادار FMCW ذو موجة سن منشار

بفرض أن إشارة التعديل هي موجة سن منشار مثالية. بحالة الهدف الثابت، ستتوافق الإشارات المرسله والمستقبله مع الشكل (2). تُعطى الإشارة المرسله بالعلاقة التالية [1][13]:

$$x_t(t) = A_t \cdot \cos \left(2\pi \left(f_c + \frac{B}{2T_c} t \right) t \right) \quad (2)$$

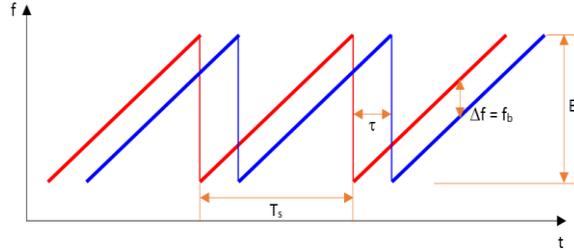
يمثل A_t مطال إشارة الإرسال، f_c التردد الأولي، و T_c دور التعديل (التغريد)، و B عرض المجال الترددي للمسح، و t الزمن داخل فترة مسح / تغريد واحدة.

بعد إرسال إشارة التغريد، ستنعكس عن الهدف، ويستقبلها الطرف الأمامي لجهاز الاستقبال (الهوائي):

$$x_r(t) = A_r \cdot \cos \left[2\pi \left(f_c + \frac{B}{2T_c} (t - \tau) \right) (t - \tau) \right] \quad (3)$$

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

حيث يمثل A_r مطال الإشارة المستقبلية، و τ التأخير الزمني بين إرسال واستقبال الإشارة (يتعلق بالمسافة R عن الرادار، وسرعة الضوء $c = 2.9979 \times 10^8$ [1][13]).



الشكل (2): إشارة تغريد FMCW، يُعبر الخط الأحمر عن سن المنشار المرسل ويُظهر الخط الأزرق سن المنشار المستقبل [1][13].

الإشارة المستقبلية ضعيفة جداً، لذا يتم تمريرها عبر مضخم LNA منخفض الضجيج.

بعد التضخيم، يتم مزج الإشارة الناتجة مع الإشارة المرجعية كما يلي:

$$\begin{aligned} x_t(t) \cdot x_r(r) \\ = A_t \cos(\Omega_t) \cdot A_r \cos(\Omega_r) \end{aligned} \quad (4)$$

بعد مزج الإشارة، تظهر إشارتان لهما الترددات الآتية:

$$\begin{aligned} \Omega_t + \Omega_r = 2\pi \left(2 \left(f_c + \frac{B}{2T_c} t \right) t - f_c \cdot \tau - \frac{B \cdot \tau}{2T_c} t \right. \\ \left. + \frac{B\tau^2}{2T_c} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Omega_t - \Omega_r = 2\pi \left(\frac{B}{T_c} \tau \cdot t + f_c \cdot \tau \right. \\ \left. - \frac{B\tau^2}{2T_c} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

يتم الحصول على تردد النبض من المعادلة (6). لاستخراج هذا التردد، تمر الإشارة الممزوجة عبر مرشح تمرير منخفض لإزالة التردد الأعلى (تردد الجمع). يتناسب تردد إشارة النبض مع المسافة عن الهدف:

$$f_b = \frac{B \cdot \tau}{T_c} \quad (7)$$

$$R = \frac{T_c \cdot C}{2B} f_b \quad (8)$$

➤ دقة تمييز المدى وأقصى مدى لا لبس فيه:

تشير دقة تمييز المدى إلى الحد الأدنى للمسافة بين هدفين والذي يسمح بتمييزهما على أنهما أهداف مختلفة، ويعبر عنه بالعلاقة [13]:

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (9)$$

يشير المدى الأعظمي الذي لا لبس فيه إلى الحد الأقصى للمدى الذي يمكن اكتشاف الهدف الموجود عنده. عملياً، يكون المدى الأعظمي أقل من هذا الحد بكثير بسبب التخمد وقيود الاستطاعة [13].

$$R_{Max} = \frac{C \cdot T_c}{2} \quad (10)$$

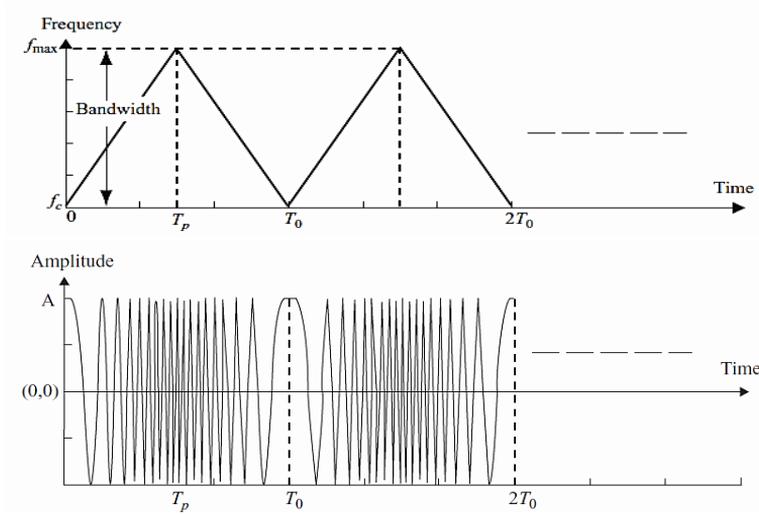
3.2 رادار FMCW ذو موجة مثلثية

بفرض أن إشارة التعديل هي موجة مثلثية مثالية كما هو موضح في الشكل (3). يُعبّر عن الإشارة أو التعريفة المرسل ذات المطال A_t وأدنى تردد لها f_c كما يلي [2] [5]:

$$S_t = A_t \cdot \cos(2\pi f_c t + \pi \mu t^2) \quad (11)$$

$$\mu = \frac{B}{T_p} \quad (12)$$

حيث μ هو معدل تغيير التردد أو معدل التغيريد. يمثل B عرض الحزمة الترددية أي الفرق بين الترددات الأعلى والأدنى. زمن المسح (T_p) هو دور التغيريد (للأعلى أو للأسفل)، و T_c دور الموجة المثلثية الكامل.



الشكل (3): الشكل الموجي المثلثي LFM لرادار FMCW؛ المجال الزمني (اليسار)؛ المجال الترددي (اليمين) [2].

عندما تصل الموجات المشعة من رادار FMCW في الوسط المحيط إلى الهدف، جزء منها سينعكس إلى الرادار. يمكن التعبير عن الموجة أو الإشارة المنعكسة في المجال الزمني بالمعادلة (13) حيث تشير A_r إلى مطال الإشارة المنعكسة [2].

$$S_r = A_r \cdot \cos(2\pi f_c(t - \tau) + \pi \cdot \mu(t - \tau)^2) \quad (13)$$

تملك الإشارة المنعكسة خصائص مشابهة للإشارة المرسله مع زمن تأخير إضافي يُعطى بالعلاقة التالية:

$$\tau = \Delta t = \frac{2R}{C} \quad (14)$$

حيث تشير R و C إلى المسافة بين الرادار والهدف [m]، وسرعة الضوء في الفراغ [m/s]، على التوالي.

بالإضافة لذلك، بما أن إشارة النبض التي ينتجها المازج تتكون من ترددات الجمع والطرح، يتم إضافة مرشح تمرير منخفض لإزالة تردد جمع الإشارتين. ومن ثم، يمكن كتابة إشارة النبض بمطال A_b بعد عملية الترشيح بالشكل [2]:

$$S_b = A_b \cdot \cos(2\pi f_c \tau + 2\pi \mu \tau t) \quad (15)$$

يمكن الحصول على تردد النبض (f_b) باشتقاق طور إشارة النبض كما يلي (تردد النبض مستقل عن الزمن ويتناسب مع مدى الهدف [21]):

$$f_b = \frac{1}{2\pi} \frac{d(2\pi f_c \tau + 2\pi \mu \tau t)}{dt} = \mu \tau \quad (16)$$

باستبدال μ الواردة في (12) و τ الواردة في (14) في تردد النبض المعادلة، نحصل على المدى R ، أي المسافة بين الرادار والهدف:

$$R = \frac{T_p \cdot C}{2B} f_b \quad (17)$$

ثم باستخدام FFT لتحويل إشارة النبض من المجال الزمني إلى مجال التردد، يمكن الحصول على ذروة الطيف الترددي لترجمتها بسهولة إلى المسافة بين الرادار والهدف [2].

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

عندما يكون الهدف ثابت (أي لا يوجد إزاحة دوبلرية في الإشارة المرسلة)، يقيس تردد النبض مدى الهدف، أي $f_b = f_r$. إذا كان تغير انحدار التردد في الإشارة المرسلة هو f' ، يمكن إعطاء تردد النبض بالمعادلة (18). ويوضح الشكل (4) تردد النبض عند استخدام شكل موجة LFM مثلثي للهدف الثابت [2].

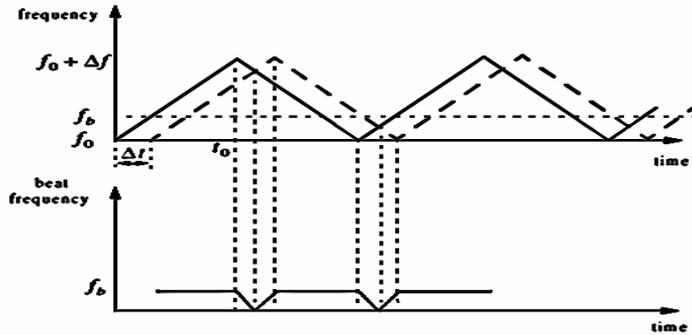
$$\begin{aligned} f_b &= f' \cdot \Delta t \\ &= f' \cdot \frac{2R}{c} \end{aligned} \quad (18)$$

عادةً ما يكون تردد التعديل المختار له الصيغة $f_m = 1/2t_0$ ، ومن هنا جاء معدل تغيير التردد (f') مع ذروة انحراف تردد Δf يمكن التعبير عنها بـ:

$$\begin{aligned} f' &= \frac{f \cdot \Delta t}{t_0} \\ &= 2f_m \cdot \Delta f \end{aligned} \quad (19)$$

بحيث يتم إنشاء تردد النبض على النحو التالي:

$$\begin{aligned} f_b &= f' \cdot \Delta t = \frac{4Rf_m \cdot \Delta f}{c} \\ &= \frac{4Rf_m B}{c} \end{aligned} \quad (20)$$



الشكل (4) شكل موجة LFM المثلثية وتردد النبض لهدف ثابت. [2]

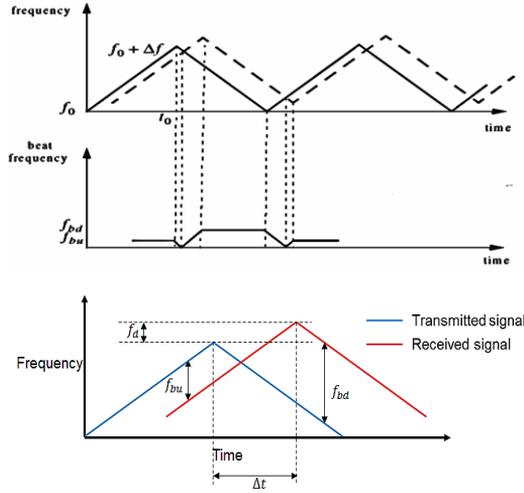
بحالة الهدف المتحرك باتجاه الرادار سيعاني تردد النبض من إزاحة ترددية يُطلق عليها اسم "إزاحة دوبلر". أي يتم إسقاط حركة الهدف إلى إزاحة ترددية "دوبلرية" ويجب أن يُؤخذ تردد النبض في الاعتبار في طرف المستقبل عند فك التعديل. سيؤثر تردد دوبلر على انحدار تردد النبض. فيزداد جزء واحد من تردد النبض وينخفض جزء آخر. هذا يعني أنه سيكون هناك نوعان مختلفان من الترددات النبضية؛ $f_{beat,up}$ لجزء المسح للأعلى و $f_{beat,down}$ لجزء المسح للأسفل. سيتم استخدام مجموع هذه الترددات النبضية للحصول على مدى الهدف وفرقها للحصول على سرعة الهدف. لهذا السبب، عندما يكون الهدف متحركاً، يُفضل استخدام شكل موجة مثلثياً بدلاً من شكل موجة سن منشار للإشارة المرسل [1] [2].

يوضح الشكل (5) تأثير إزاحة دوبلر الناتجة عن هدف متحرك على الإشارة المستقبلية لشكل الموجة المثلي. وتكون ترددات النبض كما هو موضح بالمعادلات التالية [1]:

$$\begin{aligned} f_{beat,up} &= \frac{2BR}{cT} - f_d \\ &= f_b \\ &\quad - f_d \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} f_{beat,down} &= \frac{2BR}{cT} + f_d \\ &= f_b + f_d \end{aligned} \quad (22)$$

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio



الشكل (5): الشكل الموجي المثلثي LFM وتردد النبض لهدف متحرك [2]. تأثير إزاحة دوبلر على رادار FMCW [2].

يمكن تقدير المسافة والسرعة النسبية لهدف متحرك باستخدام تردد دوبلر في رادار FMCW حيث تُحسب السرعة النسبية (v_r) بالاعتماد على تردد دوبلر (f_d) كما يلي [2]:

$$f_d = \pm \frac{f_{beat,up} - f_{beat,down}}{2} = \pm \frac{2v_r}{\lambda} = \pm \frac{2v_r f_c}{C} \Rightarrow v_r = \frac{c}{4f_c} (f_{beat,up} - f_{beat,down}) \quad (23)$$

$$f_b = \frac{f_{bu} + f_{bd}}{2} = \frac{2B}{cT} \Rightarrow R = \frac{cT}{4B} (f_{beat,up} + f_{beat,down}) \quad (24)$$

v_r هي سرعة الهدف [m/s]، و λ هي الطول الموجي للرادار [m].

4. تصميم ومحاكاة نظام رادار FMCW

تُعدّ محاكاة رادارات FMCW ذات الموجة المثلثية وموجات سن المنشار في GNU Radio أمراً أساسياً لإجراء أبحاث شاملة في مجال الرادار القائم على SDR، وذلك لأنها:

- تُتيح مقارنة مباشرة للأداء في بيئات مُتحكم بها
- تُظهر مزايا كل شكل موجة حسب السيناريوهات الواقعية
- تُوفر أساساً لأنظمة الموجات التكميلية
- تُسهّل تطوير خوارزميات لفصل المدى عن السرعة
- تُولّد مقارنات كمية
- تُتيح إجراء الاختبارات في ظروف متطابقة لتقييم عادل

تم إجراء العديد من عمليات المحاكاة على برنامج GNU Radio من أجل التحقق ممّا إذا كانت منصة رادار FMCW المصممة باستخدام GNU Radio قادرة على اكتشاف الأهداف. ويتم تحديد مواصفات تصميم رادار FMCW قبل البدء بالمحاكاة. وتبعاً لمواصفات التصميم، يتم إنشاء مخطط لمنصة الرادار في برنامج GNU Radio [2].

4.1. الأدوات البرمجية المستخدمة في الدراسة

لبرمجة SDR ليعمل كواجهة أمامية للرادار، فإنه يحتاج إلى الإرسال والاستقبال في وقتٍ واحد عند تردد حامل معين. وبالتالي، يجب أن تكون طريقة برمجة SDR قادرة على تكوين SDR، التحكم في كل من تدفقات البيانات المرسل والمستقبل في وقتٍ واحد، وتوفير طريقة لتنفيذ عمليات معالجة الإشارة الرقمية DSP. والطريقة الأكثر شيوعاً لبرمجة والتحكم في SDRs هي من خلال GNU Radio Companion [5][14].

GNU Radio برنامج مجاني تم نشره لأول مرة في عام 2001م من قبل Eric Blossom. يتضمن مجموعة أدوات مفتوحة المصدر تُشكّل أحد الأطر لـ SDR. ويسمح للمستخدمين ببرمجة مجموعة متنوعة من أجهزة الراديو المُعرّفة برمجياً. وهو مستقل عن منصات الأجهزة ويمكن إعادة

استخدامه من خلال إضافة وحدات خاصة بالنظام يتم برمجتها باستخدام Python كمكون رئيسي وأداة للراديو المُعرّف برمجياً. يتم تحقيق ذلك بدرجة عالية من التجرد وربط الكتل التي تتجمع معاً لإنشاء برنامج متكامل. تعمل هذه الكتل على تمكين برمجة SDR دون الحاجة إلى معرفة الكود الأساسي. بهذه الطريقة، يمكن للمبرمج التركيز على التدفق الإجمالي للبيانات دون الحاجة إلى القلق بشأن مشكلات مستوى الكود. وعلى الرغم بأنه ليس مهيباً كأداة محاكاة، يمكن استخدامه بمفرده لتقديم نتائج محاكاة لأي نظام رادار [1][5][6][7][8].

يتكون GNURadio من وحدات تستخدم في معالجة الإشارة كوحدات FFT، الترميز/فك الترميز، التعديل/فك التعديل، المسويات equalizers ومرشحات الإشارة. هذه الوحدات متصلة بواسطة مسار البيانات لتشكيل مخطط تدفقي يشير إلى اتجاه تدفق البيانات. كما يحتوي GNU Radio على مكتبة وحدات معالجة الإشارة لتطبيق الراديو المُعرّف برمجياً على عتاد صلب RF خارجي [6][7].

4.2. بارامترات المحاكاة

1. **معدل أخذ العينات:** ستؤثر قيمة معدل أخذ العينات على عرض المجال الترددي وبالتالي دقة تمييز المدى (أصغر مسافة للتفريق بين هدفين متجاورين) وذلك بحسب المعادلة (9). فكلما زاد عرض الحزمة سيزيد معدل أخذ العينات المطلوب لتحقيق شرط نايكوست وبالتالي تقل قيمة دقة تمييز المدى (أي تزيد حساسية التفريق بين الأهداف). وعلى الرغم بأن القيمة الأعلى قد تقلل قيمة دقة تمييز المدى، لكنها ستزيد من العبء الحسابي [1].
2. **قيمة عرض المجال الترددي:** يجب أن تتوافق القيمة المستخدمة لعرض المجال الترددي مع نظرية نايكويست. وباستخدام عرض حزمة ترددية أكبر، سيتطلب ذلك قيمة أكبر لمعدل أخذ العينات، وبالتالي عبئاً حسابياً أكبر [1].

3. شكل الموجة: لمحاكاة الهدف الثابت، سيتم استخدام شكل موجة سن المنشار لأنه

أبسط، ولكن لعمليات محاكاة حركة الهدف، يُستخدم شكل الموجة المثلثية.

5. تصميم رادار FMCW ذو موجة سن منشار

تُجرى محاكاة رادار FMCW مُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio بدون تجهيزات مادية بهدف نمذجة نظام الرادار ومعالجة الإشارات لكشف أهداف متعددة وتقدير مداها وسرعتها.

يتضمن تصميم رادار FMCW على GNU Radio محاكاة إشارة الإرسال، وتوليد إشارة منعكسة اصطناعية، ومعالجتها لاستخلاص مدى الهدف وسرعته. وتُلخص خطوات بناء المحاكاة بما يلي:

- 1) توليد الإشارة: توليد إشارة تغريد FMCW بعرض حزمة ترددية ودور تغريد محددين.
- 2) محاكاة الهدف: محاكاة تأثير أهداف متعددة من خلال تطبيق تأخيرات مناسبة (للمدى) وإزاحات دوبلر (للسرعة) على الإشارة المرسله لإنشاء الإشارة المستقبلية.
- 3) المزج: مزج الإشارات المرسله والمستقبلية لإنتاج إشارة النبض (إشارة التردد المتوسط IF).
- 4) الترشيح: تطبيق مرشح تمرير منخفض LPF لإزالة مكونات التردد العالي وعزل ترددات النبض.
- 5) معالجة تحويل فورييه السريع FFT: تنفيذ تحويل فورييه السريع على إشارة النبض المرشحة LPF لتحويلها إلى المجال الترددي. وتتوافق القمم في الطيف مع ترددات نبض الأهداف.
- 6) كشف الذروة: تحديد القمم في طيف تحويل فورييه السريع لتحديد ترددات نبض الأهداف.
- 7) حساب المدى والسرعة: تحويل ترددات النبض إلى مدى وسرعة لكل هدف.
- 8) الإظهار: عرض طيف تحويل فورييه السريع وقيم المدى والسرعة المقدرين لكل هدف.

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

وتجدر الإشارة بأن القيم النموذجية لبارامترات الأهداف (المدى R ، السرعة V ، المقطع العرضي الراداري للهدف RCS) والتي تتوافق مع معايير الصناعة (SAE,ISO,ETSI) بحالة تطبيقات المركبات مثلاً، وبوجود الفوضى clutter وتعدد المسارات multipath [16][17]:

➤ سيارة: $R = 90m, v = 15m/s, RCS = 1.0$

➤ دراجة: $R = 120m, v = -5m/s, RCS = 0.5$

➤ هدف ثابت: $R = 200m, v = 0m/s, RCS = 0.1$

5.1. محاكاة هدف مفرد ثابت

يتم تحديد بارامترات تحاكي سلوك الرادار القائم على SDR في العالم الحقيقي كما هو مذكور في الجدول (1) من أجل هدف ثابت يبعد عن الرادار مسافة $R = 100m$ ، ويتحرك بسرعة $v = 0m/s$.

الجدول (1) بارامترات محاكاة رادار FMCW قائم على SDR.

2.4GHz	التردد المركزي f_c
100M Sample/s	معدل أخذ العينات
10μs	دور التفرقة T
50MHz	عرض الحزمة B
$\Delta R = \frac{c}{2B} = 3m$	دقة تمييز المدى
$R_{max} = \frac{cT}{2} = 1500m$	المدى الأقصى الذي لا لبس فيه

تتكون منصة الرادار التي تم تصميمها في GNU Radio من عدة وحدات كما هو مبين في الشكل (6). ونذكر فيما يلي وحدات المحاكاة الأساسية:

✓ مصدر الإشارة Signal Source: يُولّد شكل موجة سن المنشار التي تتحكم بكتلة VCO. بقيمة تردد: $1/T = 1KHz$ (معدل تكرار الذبذبة).

✓ VCO: يُنشئ إشارة التغيريد.

✓ التأخير Delay: يُحاكي زمن رحلة الإشارة لمسافة الهدف، ويُحسب عدد عينات التأخير الموافق لرحلة الإشارة بالعلاقة:

$$N = \text{round} \left(\frac{2R}{c} \cdot f_s \right) \quad (25)$$

وبالنسبة لـ $R = 90m$ ، يكون عدد عينات تأخير رحلة الإشارة $\times 100 = \frac{2 \times 90}{3 \times 10^8}$ و $60 \text{ samples} \approx 10^6$. ولإيجاد قيمة التأخير مقدراً بالثانية:

$$\tau = N \cdot \frac{1}{f_s} \quad (26)$$

وبالتالي من أجل المثال السابق يكون: $\tau = N \cdot \frac{1}{f_s} = 60 \cdot \frac{1}{100 \times 10^6} = 0.6 \mu s$

✓ مصدر الضجيج Noise Source: يُضفي واقعية على الإشارة المُستقبل.

✓ مُحوّل فورييه السريع FFT: يحسب طيف تردد النبض.

✓ مرشح الترددات المنخفضة Low-Pass Filter: وتردد القطع $B/2$.

✓ كاشف الذروة Peak Detector: يُحدد قطب تردد الذروة في تحويل فورييه السريع (أي

مُكوّن التردد المهيمن). ويتم ضبط العتبة Threshold بحيث نتجنب ذروات الضجيج.

ومنها يمكن حساب المدى باتباع الخطوتين:

• حساب تردد النبض (f_{beat}): $f_{beat} = \frac{\text{Peak Bin Index} \cdot f_s}{N}$. وتمثل N حجم

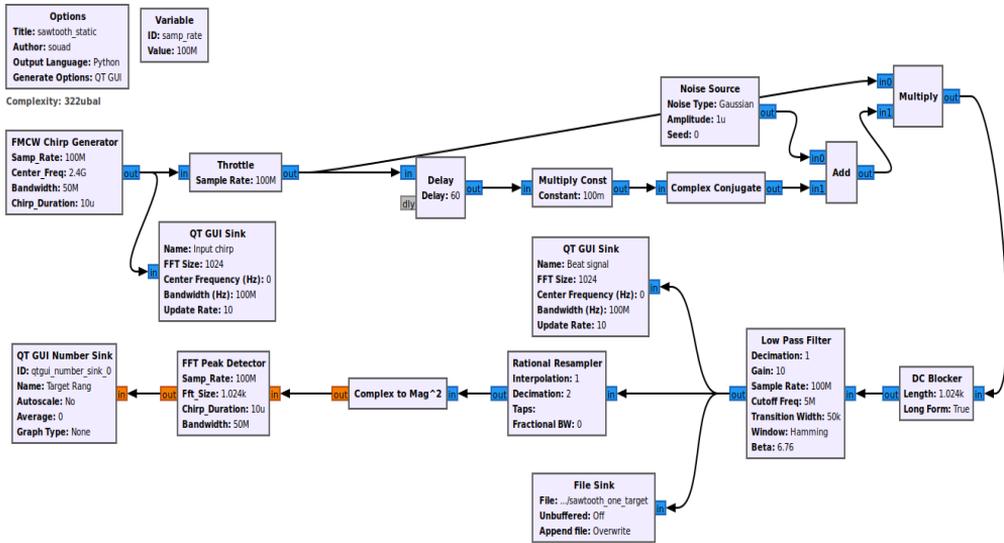
تحويل فورييه السريع [21][20].

• ثم يتم حساب المدى (R) وفقاً للمعادلة (8): $R = \frac{T_c \cdot c \cdot f_{beat}}{2B}$. فإذا كان

$$R = \frac{3 \times 10^8 \cdot 10 \times 10^{-6} \cdot 3 \times 10^6}{2.50 \times 10^6} = 90m, f_{beat} = 3MHz$$

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

يتم محاكاة فقدان المسار Attenuation باستخدام وحدة الضرب بثابت Multiply Const. وتستخدم وحدة الخانق throttle لتحديد سرعة المحاكاة بالزمن الحقيقي وكونها تتيح استخدام المعالج بكفاءة من خلال التحكم بتدفق عينات البيانات عبر المخطط التدفقي بأكمله. تمر الإشارات المرسل والمستقبل عبر وحدة ضرب Multiply والتي تعمل كمازج للإشارات المرسل والمُستقبل من أجل الحصول على إشارة بتردد النبض $f_{beat} = \frac{2BR}{cT} \pm f_a$. وإجراء تحليل FFT لإشارة المزج، يتم الحصول على فرق التردد للإشارة المرسل والمستقبل.

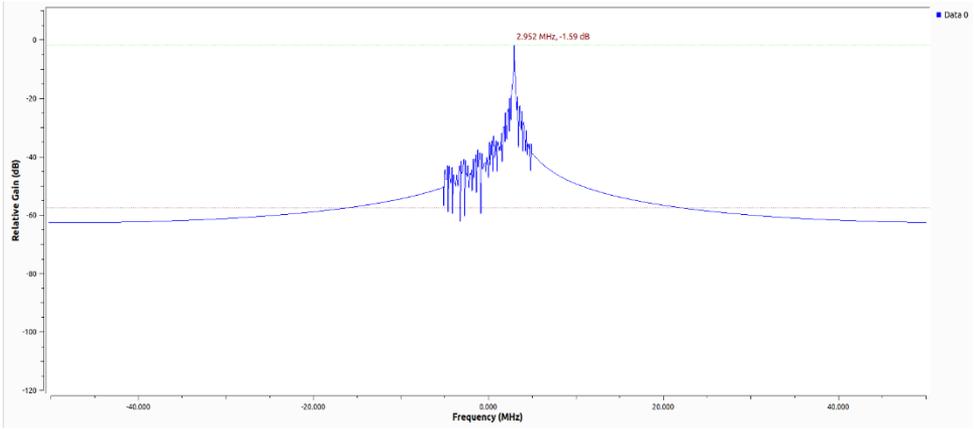
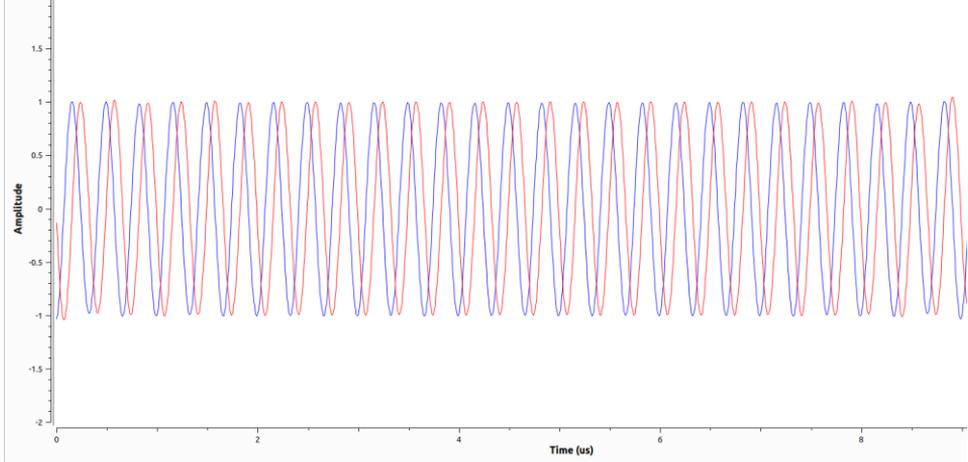


الشكل (6): المخطط الانسيابي GRC لرادار FMCW بحالة هدف ثابت واحد يقع عند مسافة

$$R = 90m \text{ وهذا يتوافق مع تأخير زمني } \tau = 60 \text{ sample}$$

يوضح الشكل (7) نتيجة محاكاة رادار FMCW التي تم إجراؤها وفقاً للمخطط السابق (a) إشارة النبض لهدف واحد في المجال الزمني، و (b) طيف الإشارة في المجال الترددي حيث تمثل الذروة الفردية تردد النبض. وتجدر الإشارة بأن تردد النبض (2.952MHz) الذي تم الحصول عليه من خلال المحاكاة يتفق مع القيمة النظرية المحسوبة وفق العلاقة (7) (3MHz) وتكون قيمة الخطأ في قياس المدى نتيجة لتأثيرات الضجيج (= 90 - 88.56 = $R_{theoretical} - R_{simulated}$)

1.44m)، مما يؤكد قدرة المنصة المقترحة في المخطط الانسيابي (6) على الحصول على مدى الهدف.

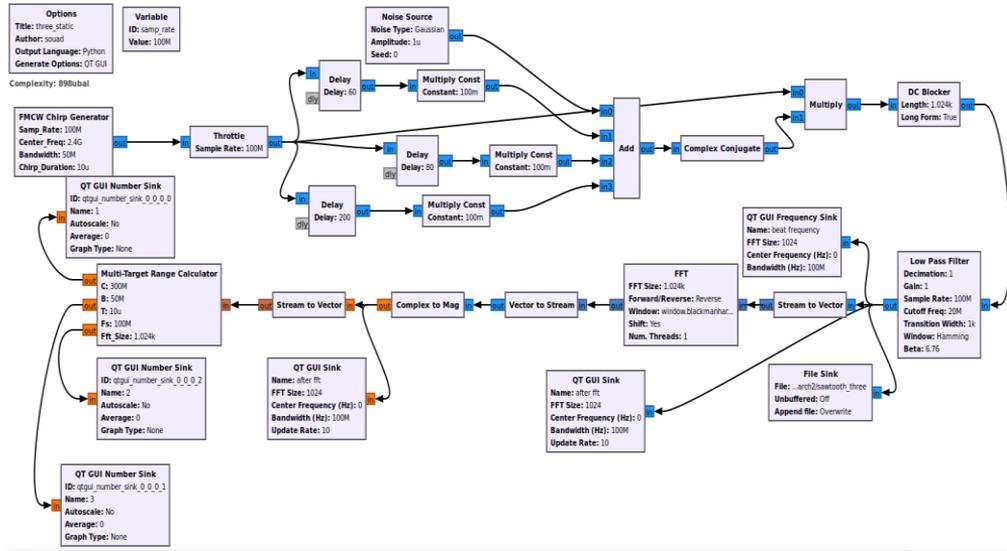


الشكل (7): إشارة النبض لهدف ثابت واحد يقع عند مسافة $R = 90m$ (في الأعلى)، طيف التردد النبضي $f_{beat} = 2.952MHz$ (في الأسفل).

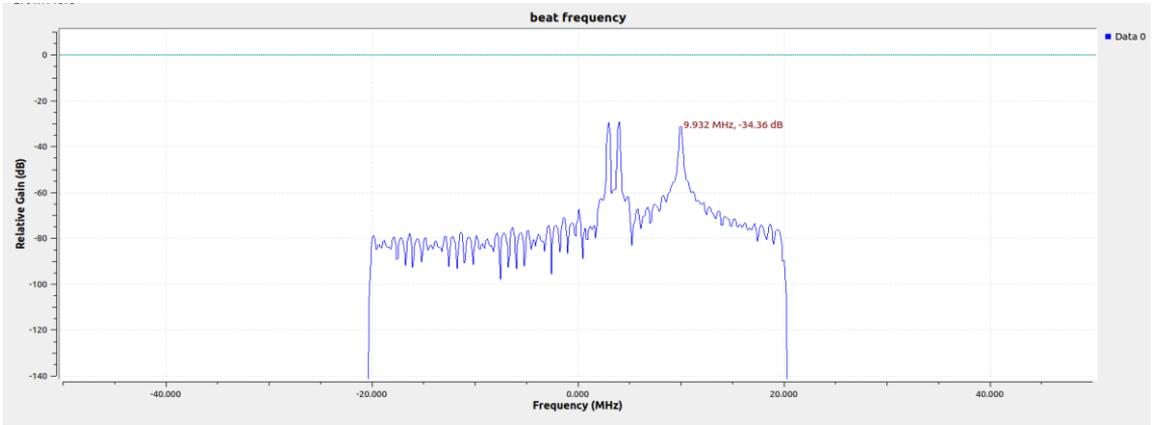
5.2. محاكاة أهداف ثابتة

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

لمحاكاة سيناريو وجود أهداف متعددة يتم استخدام نفس البارامترات الواردة في الجدول (1). وتعديل المخطط الوارد في الشكل (6) عن طريق إضافة عدة كتل تأخير Delay على التوازي يمثل كل منها التأخير الزمني الناتج عن الهدف المقابل. ثم تُجمع الإشارات المنعكسة باستخدام كتلة Add قبل إجراء تحويل FFT.



الشكل (8): المخطط الانسيابي لكشف ثلاثة أهداف ثابتة تقع عند المسافات $R1 = 90m, R2 = 120m, R3 = 300m$ والتي تتوافق مع تأخيرات زمنية $\tau1 = 60sample, \tau2 = 80sample, \tau3 = 200sample$ على التوالي.



الشكل (9): طيف إشارة النبض لثلاثة أهداف ثابتة تقع عند $R1 = 90m, R2 = 120m, R3 = 300m$

$$f_{1,beat} = 2.921MHz, f_{2,beat} = 3.996MHz, f_{beat} = 9.973MHz$$

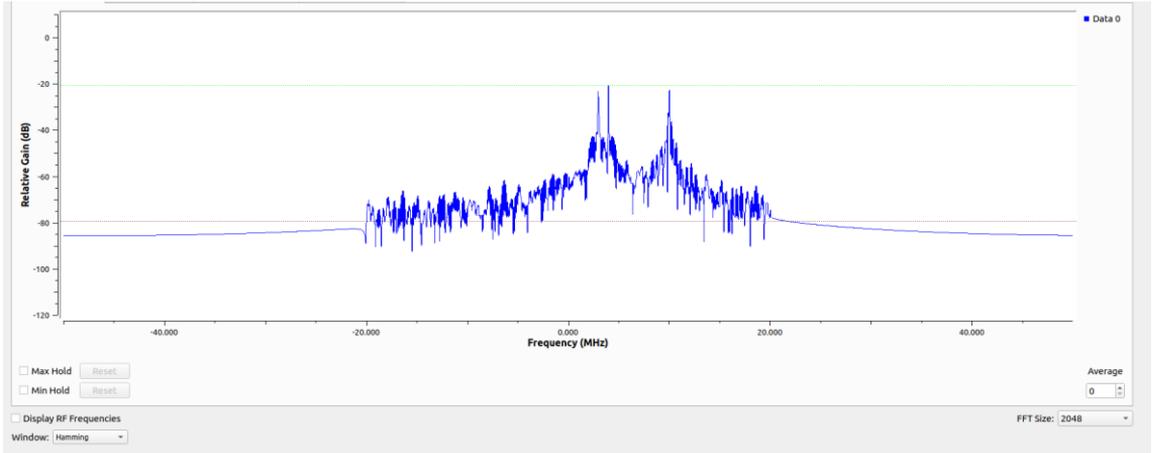
بالنسبة لثلاثة أهداف، سيكون إشارة النبض أكثر تعقيداً من الحالة السابقة. يوضح الشكل (9) طيف إشارة النبض لثلاثة أهداف تقع عند $R1 = 90m, R2 = 120m, R3 = 300m$ والتي تتوافق مع تأخيرات زمنية وفق العلاقاتين (25) و (26) $\tau1 = 60sample = 0.6\mu s, \tau2 = 80sample = 0.8\mu s, \tau3 = 200sample = 2\mu s$ وتظهر ترددات النبض الناتجة عن المحاكاة بالقمم الموافقة للقيم التالية: $f_{1,beat} = 2.921MHz, f_{2,beat} = 3.996MHz, f_{beat} = 9.973MHz$ ومن هذا الطيف يتم الحصول على معلومات المسافة للأهداف الثلاثة. من أجل التبسيط، سيكون للأهداف الثلاثة نفس المطال. وتجدر الإشارة بأن هذا المخطط الانسيابي قادر على الكشف عن أهداف مختلفة طالما أن الفاصل بينهما أكبر من دقة تمييز المدى.

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

الجدول (2) اختلافات قيم مدى الهدف بين القيم النظرية والقيم الناتجة عن المحاكاة.

مقدار الخطأ	القيمة الناتجة عن المحاكاة	قيمة المدى النظرية
$\Delta R1 = 2.37m$	$R1 = 87.63m$	$R1 = 90m$
$\Delta R2 = 0.12m$	$R2 = 119.88m$	$R2 = 120m$
$\Delta R3 = 0.81m$	$R3 = 299.19m$	$R3 = 300m$

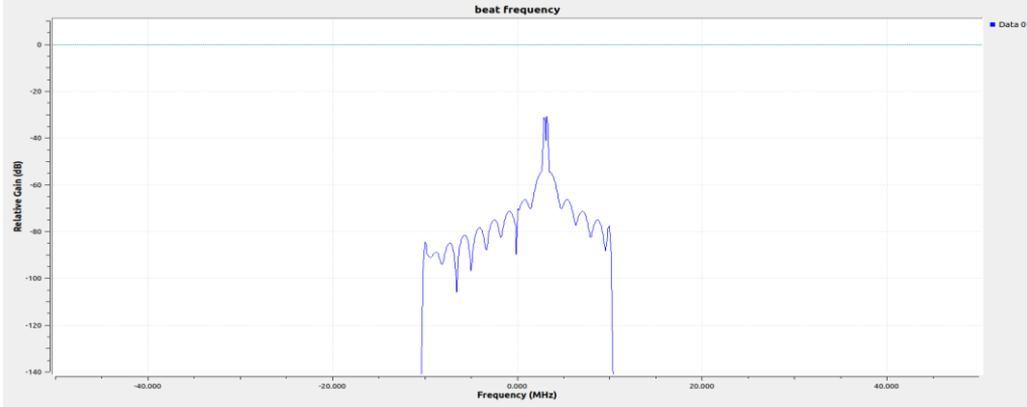
تجدر الإشارة بأن الحالات السابقة تم إجراء المحاكاة بالأخذ بالاعتبار أن حجم تحويل فورييه السريع FFT بالقيمة 1024، ومن أجل حجم FFT يبلغ 2048 وبما يتفق مع الحالة السابقة لثلاثة أهداف ثابتة سيكون بالشكل (10)، حيث تظهر القمم أكثر حدةً ووضوحاً.



الشكل (10) طيف إشارة النبض لثلاثة أهداف تقع عند $R1 = 90m, R2 = 120m, R3 = 300m$ ، عند حجم FFT يبلغ 2048.

يوضح الشكل (11) طيف تردد النبض بحالة هدفين متقاربين يقعان عند المسافة $R1 = 90m, R2 = 96m$ والتي تتوافق مع تأخيرات زمنية $\tau1 = 60sample = 0.6\mu s, \tau2 =$

96sample = 0.64μs، ويتضح من الشكل مدى تقارب القمم الموافقة للهدفين مما يعيق التفريق بينهما ويظهران كهدف مفرد.



الشكل (11) طيف تردد النبض بحالة وجود هدفين يقعان عند المسافات $R1 = 90m, R2 = 96m$.

6. تأثير الضجيج على تقدير بارامترات الهدف (المدى)

عندما يتم إرسال واستقبال إشارة في الزمن الحقيقي فإنها تعاني من التخامد في وسط الانتشار غير المثالي بسبب تأثيرات الضجيج، التي تجعل من الصعب اكتشاف الهدف. لمحاكاة تأثير الضجيج في رادار FMCW يعمل بتردد 2.4GHz ذي شكل موجة سن منشار وهدف ثابت باستخدام GNU Radio، كما هو موضح بالشكل (12) نستخدم البارامترات الواردة في الجدول (3). ستشمل المحاكاة توليد الإشارة، وانتشارها، وإضافة الضجيج، ومعالجة الإشارة لاستخراج مدى الهدف. الجدول (3) بارامترات محاكاة رادار FMCW ذو موجة سن منشار لدراسة تأثير الضجيج.

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

2.4GHz	تردد الموجة الحاملة
100MHz	عرض الحزمة الترددية B
1ms	مدة التفرقة T_c
15m	مسافة الهدف

باعتبار الإشارة المستقبلية $V_r = \alpha \cdot V_t$ حيث V_t هي الجهد المرسل (يقدر بالفولت) و α عامل التخميد. وتكون الاستطاعة متناسبة مع مربع الجهد: $P_s \propto |V_r|^2 = |\alpha|^2 \cdot |V_t|^2$. [18][19][20]

فإذا كان V_t موحد (normalized) (كما في المحاكاة $V_t = 1$)، سيكون: $P_s = |\alpha|^2$ بدون واحدة.

تُضبط استطاعة الضجيج كما يلي [18][19][20]:

- استطاعة الإشارة (بعد التخميد): $P_s = |\alpha|^2 = 0.01$
- استطاعة الضجيج ((ضجيج عقدي)) من أجل نسبة الإشارة إلى الضجيج المطلوبة:

$$\sigma = \sqrt{\frac{P_n}{2}}, \quad P_n = \frac{P_s}{10^{SNR/10}} \quad (27)$$

وأيضاً P_n بلا واحدة وكذلك σ .

- ومن أجل $SNR = 10dB \rightarrow P_n = 0.001 \rightarrow \sigma = \sqrt{0.0005} \approx 0.022$

يتم حساب تردد النبض لهدف يبعد عن الرادار مسافة 15m، بالمعادلة:

$$f_b = \frac{B \cdot 2R}{c \cdot T_c} \quad (28)$$

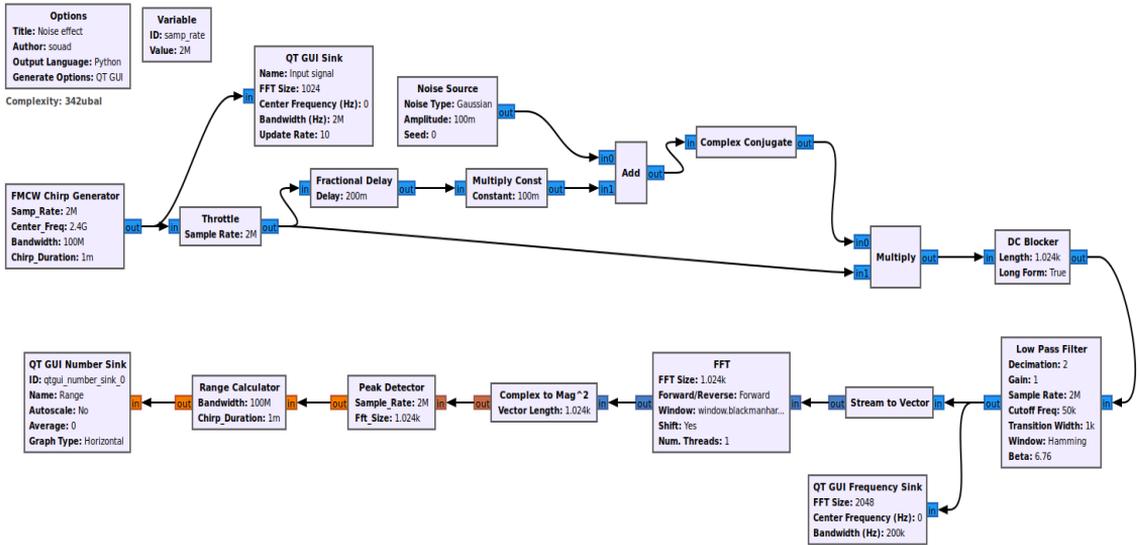
$$f_b = \frac{100e6 \cdot 30}{3e8 \cdot 0.001} = 10 \text{ kHz}$$

لقياس ذروة نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR في المجال الترددي نتبع العلاقة:

$$Peak\ SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{Peak\ Power}{Mean\ Noise\ Power} \right) \quad (29)$$

للتحقق من تأثير الضجيج نقارن القيمة النظرية للمدى مع القيمة الناتجة عن المحاكاة. ونحسب خطأ التقدير:

- المدى النظري: $d_{true} = 15m$
- المدى المقدر (نتيجة المحاكاة): $\hat{d} = \frac{c \cdot T_c \cdot f_b}{2B}$ ، ويمثل f_b تردد النبض المُقاس.
- الخطأ: $|\hat{d} - d_{true}|$



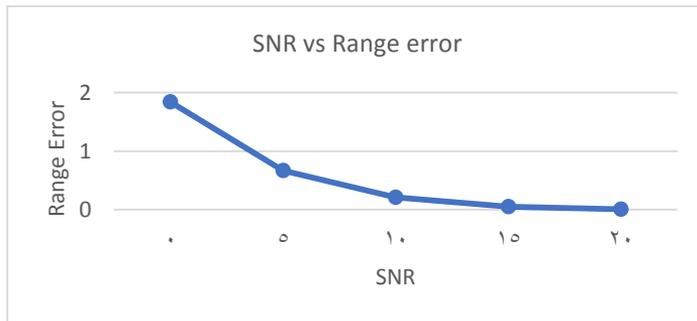
الشكل (12) المخطط الانسيابي لرادار FMCW بوجود الضجيج.

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

بمراقبة الذروة الناتجة عند تردد $10kHz$ في مخطط طيف الإشارة، يتضح أنه كلما زاد الضجيج انخفضت نسبة الإشارة إلى الضجيج، وزاد عرض الذروة التي يظهر عندها الهدف كما هو موضح بالشكل (13). وتجدر الإشارة أنه بالنسبة للإشارات الحقيقية، يُنتج تحويل فورييه ذروتين (ترددات موجبة وسالبة).

الجدول (4) نتائج محاكاة هدف ثابت وحيد من أجل نسبة $SNR = 10dB$.

القيمة	المعيار
15.02m	المدى المُقاس
0.02m	خطأ المدى
1.21KHz	عرض حزمة 3dB
9.8dB	ذروة SNR (المقاسة)

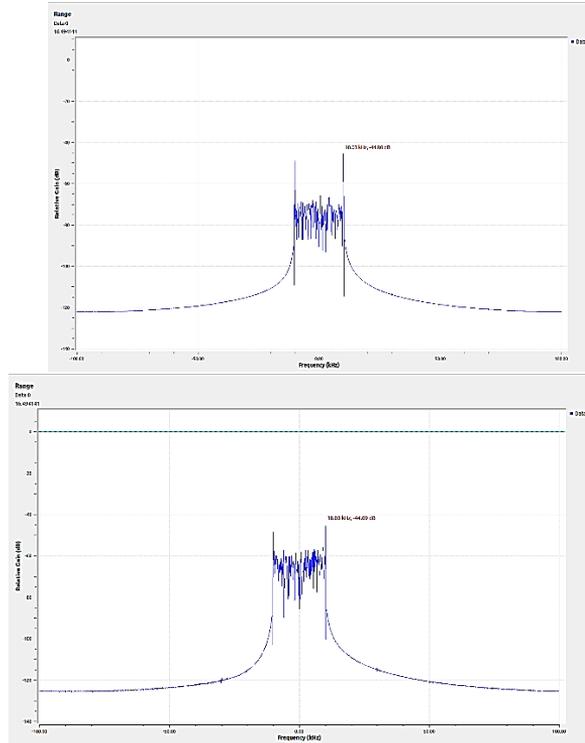


الشكل (13) تغير خطأ المدى باختلاف نسبة SNR.

وبإجراء تجارب محاكاة متعددة من أجل قيم مختلفة لـ SNR تكون قيم الخطأ وعرض القمة في طيف تردد النبض كما هو موضح بالجدول (5)، حيث تتناقص قيمة خطأ المدى بشكل أسي بزيادة نسبة SNR وتصبح القمم الموافقة لتردد النبض أضيّق.

الجدول (5) خطأ المدى وعرض قمم تردد النبض من أجل نسب SNR متعددة.

3dB	BW (kHz)	متوسط الخطأ	SNR (dB)
	4.73	1.84	0
	2.15	0.67	5
	1.21	0.21	10
	0.87	0.05	15
	0.81	0.01	20



الشكل (14) طيف تردد النبض: عند $SNR = 20dB$ (على اليمين)، وعند $SNR = 10dB$ (على اليسار).

7. محاكاة نظام رادار FMCW معتمد على SDR ذو موجة مثلثية

تتناوب في الموجة المثلثية عمليات مسح الترددات المتزايدة "التغريدة الصاعدة" والمنخفضة "التغريدة الهابطة". يُشتق قياس المدى من تردد النبض ضمن التغريدة الصاعدة/الهابطة المفردة. وتُحسب السرعة من انزياح دوبلر بين التغريدات الصاعدة/الهابطة.

7.1. محاكاة هدف متحرك مفرد

من أجل إعداد محاكاة هدف متحرك واحد يتم تطبيق البارامترات الواردة في الجدول (6) من أجل تحديد مواصفات الكتل في المخطط الانسيابي الذي تم تنفيذه في GNU Radio كما هو موضح بالشكل (15).

هناك نوعان من عمليات المحاكاة التي يمكن إجراؤها للكشف عن حركة الهدف؛ الأول هو محاكاة تحريك الهدف ليقترّب إلى الرادار والثاني هو محاكاة تحريك الهدف بعيداً من الرادار. تعتمد إزاحة دوبلر بشكلٍ مباشر على سرعة الهدف وتكون قطبية السرعة:

- سالبة إذا كان الهدف يقترّب من الرادار: $f_{up} > 0$
- سالبة إذا كان الهدف يقترّب من الرادار: $f_{beat,down} > f_{beat,up}$
- موجبة إذا كان الهدف يبتعد عن الرادار: $f_{beat,down} < f_{beat,up}$

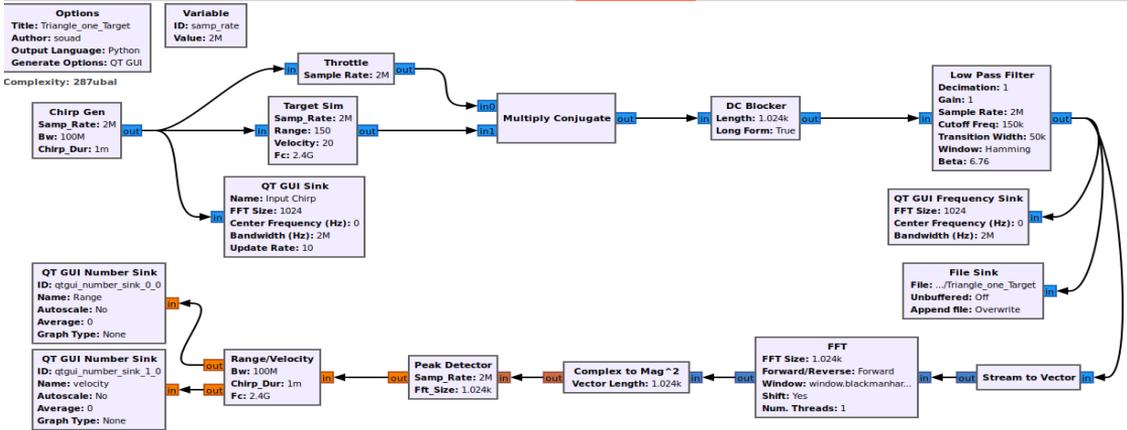
الجدول (6) مواصفات تصميم نظام رادار FMCW قائم على SDR.

2.4GHz ($\lambda = 0.125m$)	تردد الحامل f_c
1ms	دور التغريدة T
100 MHz	عرض الحزمة B
2M Sample/s	معدل أخذ العينات f_{sam}
1024	حجم FFT
$\Delta R = \frac{c}{2B} = 1.5m$	دقة تمييز المدى

$v_{max} = \frac{\lambda}{4T} = \pm 31.25m/s$	أقصى سرعة لا لبس فيها
$R_{max} = \frac{c \cdot T}{2} = 150km$	أقصى مدى لا لبس فيه

يولد مدى الهدف إزاحة ترددية ثابتة، في حين تولد سرعة الهدف (تأثير دوبلر) إزاحة ترددية إضافية تعتمد على اتجاه التغير في ما إذا كانت للأعلى (تردد متصاعد) أو للأسفل (تردد هابط). إذا كان الهدف يقترب من الرادار فإن تردد نبض التغيرية الصاعدة يزداد وتردد نبض التغيرية الهابطة يتناقص والعكس بحالة الهدف يبتعد عن الرادار.

يتضمن المخطط الانسيابي للمحاكاة مولد تغريد موجة مثلثية يتم إنشاؤها بكتلة Python مضمنة لتوليد إشارة تغريد عقديّة (IQ). ولمحاكاة سلوك الهدف نستخدم كتلة تأخير Delay للتعبير عن زمن رحلة الإشارة ذهاباً وإياباً ويمكن استبدالها بكون Python لمراعاة التأخير الديناميكي للهدف المتحرك: $\tau = \frac{2 \cdot R}{c}$. للأخذ بالاعتبار تخميد المسار تُضاف كتلة الضرب بثابت Multiply constant ويتم ضبط قيمة ثابت الضرب على 0.7 لمحاكاة تخميد الإشارة أثناء الانتشار.



الشكل (15): مخطط المحاكاة لرادار FMCW معتمد على SDR من أجل هدف يقع عند

مسافة $R = 100m$ وسرعة $v = 30m/s$ (مقرباً من الرادار).

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

يُستخدم مرشح تمرير ترددات منخفضة ذو تردد قطع 250KHz ، تردد انتقال: 10KHz ، والنافذة: هامينغ Hamming، لاستخراج تردد النبض. ويمكن استخدام كتلة Rational Resampler لتخفيض معدل أخذ العينات إلى 500KHz . وفي هذه الدراسة تتم إضافة كتلة تم برمجتها بلغة Python لاكتشاف هدف متحرك وتقدير بارامترات (المدى والسرعة).

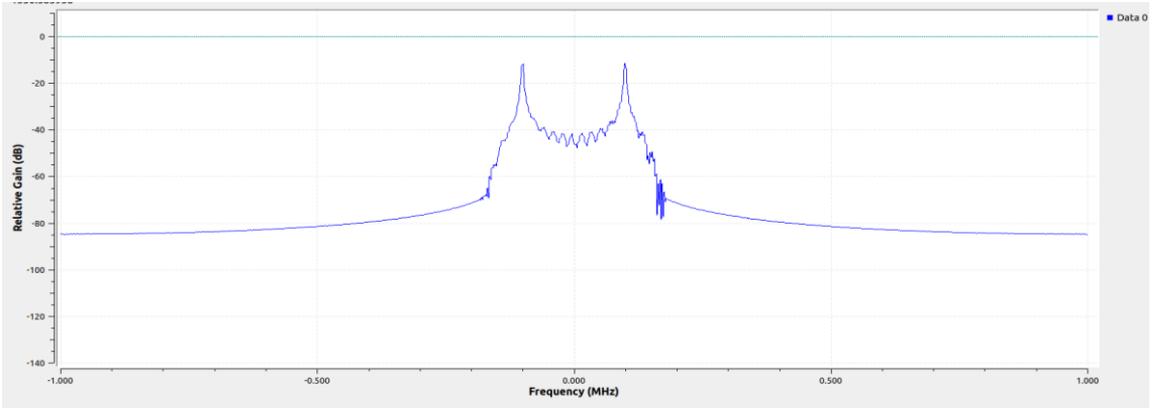
يحتوي التردد النبضي الناتج عن مزج الإشارة المرسله مع الإشارة المستقبله معلومات عن المدى ($\tau = \frac{2R}{c}$) والسرعة (إزاحة دوبلر) ($f_d = \frac{2v}{\lambda} = \frac{2vf_c}{c}$). ومن أجل هدف يقع عند مسافة 150m ويقترب من الرادار بسرعة 20m/s يتم حساب تردد النبض المتوقع بالنسبة لشكل الموجة المثلة FMCW، وستتواجد قمتين:

$$\begin{aligned} f_{beat,up} &= \frac{2*B*R}{c.T_c} - \frac{2v}{\lambda} \quad \text{■ قيمة توافق نبضة تصاعديّة:} \\ f_{beat,down} &= \frac{2*B*R}{c.T_c} + \frac{2v}{\lambda} \quad \text{■ قيمة توافق نبضة تنازليّة:} \end{aligned}$$

ومن أجل البارامترات الواردة في الجدول (6) تكون ترددات النبض المتوقعة من أجل $B = 100\text{MHz}$ ، $T = 1\text{ms}$ ، $R = 150\text{m}$ ، $v = 20\text{m/s}$:

$$\begin{aligned} f_{beat,up} &= \frac{2BR}{cT} - \frac{2V}{\lambda} \approx 100 \times 10^3 - 320 = 100.32\text{KHz} \quad \text{■ تردد نبض التفرّيدة الصاعدة:} \\ f_{beat,down} &= \frac{2BR}{cT} + \frac{2V}{\lambda} \approx 100 \times 10^3 + 320 = 99.68\text{KHz} \quad \text{■ تردد نبض التفرّيدة الهابطة:} \end{aligned}$$

يتم حساب التأخير الزمني بناءً على مدى الهدف ($\tau = 2 * R/c = 2 * 150/3e8 = 1\mu\text{s}$) وهذا يتوافق مع عدد عينات ($N = \tau * f_{sam} = (1e - 6 * 2e6 = 2 \text{ samples})$).



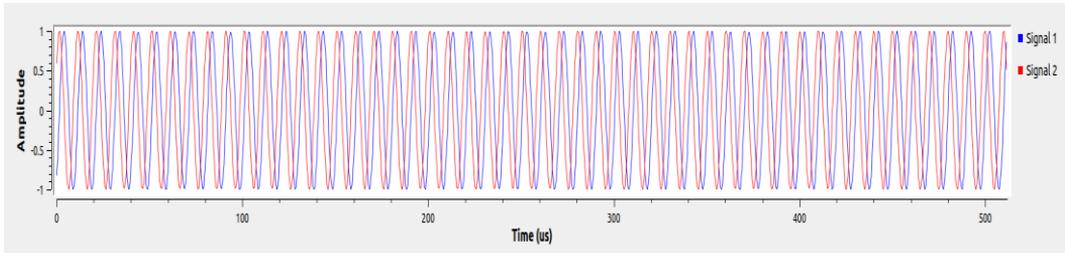
الشكل (16) الطيف الترددي لإشارة النبض لهدف يبعد مسافة $R = 150m$ عن الرادار
ويقترب منه بسرعة $v = 20m/s$.

ومن أجل البارامترات السابقة يوضح الشكل (16) الطيف الترددي للهدف بحيث يظهر التردد النبضي عند $0.113MHz$ وهو ما يتوافق مع القيمة النظرية التي تم حسابها وفق المعادلة $(f_{beat} = \frac{B \cdot 2R}{T \cdot C} = 100KHz)$. ونتيجةً لتقارب قيم تردد النبض للتغريدة الصاعدة والهابطة يظهران كقمة واحدة.

للتخلص من تقلبات المدى يمكن زيادة حجم FFT إلى 2048 وإضافة كتلة moving average في خرج المدى. كما أن زيادة حجم تحويل فورييه السريع FFT أو استخدام دور تغريد أطول يحسن من دقة تقدير بارامترات الهدف. ولتظهر قمة تردد النبض بوضوح بعد تطبيق FFT يجب التأكد بأن تردد القطع لمرشح التمرير المنخفض $LPF\ cutoff > \max f_{beat}$. ولضمان قياس صحيح للسرعة يجب التأكد من أن doppler FFT يستخدم عدد تغريدات كافٍ (يوصى بأكثر من 10).

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

من أجل هدف ثابت نحصل على قيمة مدى ثابتة (مع تقلبات صغيرة ناتجة عن ضجيج وسط الانتشار) ومن أجل هدف يتحرك بسرعة (10m/s): يتغير المدى بحدود 0.1m لكل تغريدة. يظهر التمثيل الزمني لتردد النبض بعد مرشح LPF كإشارة جيبية كما هو موضح بالشكل (17) بتردد يكافئ تردد النبض.



الشكل (17) التمثيل الزمني لإشارة النبض بعد مرشح LPF.

7.2. محاكاة أهداف متحركة متعددة

نصمم رادار FMCW ذو موجة مثلثة كما في الشكل (18) وبحيث نراعي البارامترات الواردة في الجدول (8). لمحاكاة الأهداف نستخدم كتلة تم برمجتها بـ Python يتم فيها تحديد بارامترات الأهداف بالصيغة:

```
target_list  
= [(range1, velocity1, RCS1), (range2, velocity2, RCS2), ...]
```

نستخدم مرشح تمرير منخفض ذو تردد قطع 500kHz، وتردد الانتقال 30kHz. ونستخدم تحويل فورييه السريع FFT بحجم 2048، ونافذة Blackman-hares.

ولكشف الذروة نستخدم كتلة تم برمجتها باستخدام Python بعدد أهداف أعظمي يبلغ 4 أهداف، وعتبة كشف ثابتة 0.1. ونقوم بحساب المدى/السرعة باستخدام كتلة Python مدمجة. وبحالة وجود هدفين نتوقع النتائج الواردة في الجدول (4) وذلك تبعاً للصيغ الأساسية التالية:

الصيغ الأساسية:

- تردد النبض: $f_{beat} = \frac{2*B*R}{c*T} \pm \frac{2*v}{\lambda}$
- خطأ المدى: $\pm \frac{c}{2*B} = \pm 1.0m$
- خطأ السرعة: $\pm \frac{\lambda}{2T} = \pm 12.5m/s$

الجدول (7) قيم بارامترات الأهداف المستقبلية تبعاً لإعدادات المحاكاة لنظام الرادار.

تردد النبض kHz	سرعة الهدف m/s	مدى الهدف m
150 ± 0.98	10 ± 6.25	75 ± 1.0
300 ± 0.98	-5 ± 6.25	150 ± 1.0

ونتيجة لوجود قمم زائفة يمكن ضبط العتبة في PeakDetector (0.05-0.2 من أقصى مطال) أو إضافة كتلة Python مدمجة لكشف معدل الإنذار الخاطئ الثابت CFAR بدلاً من كشف العتبة الثابتة.

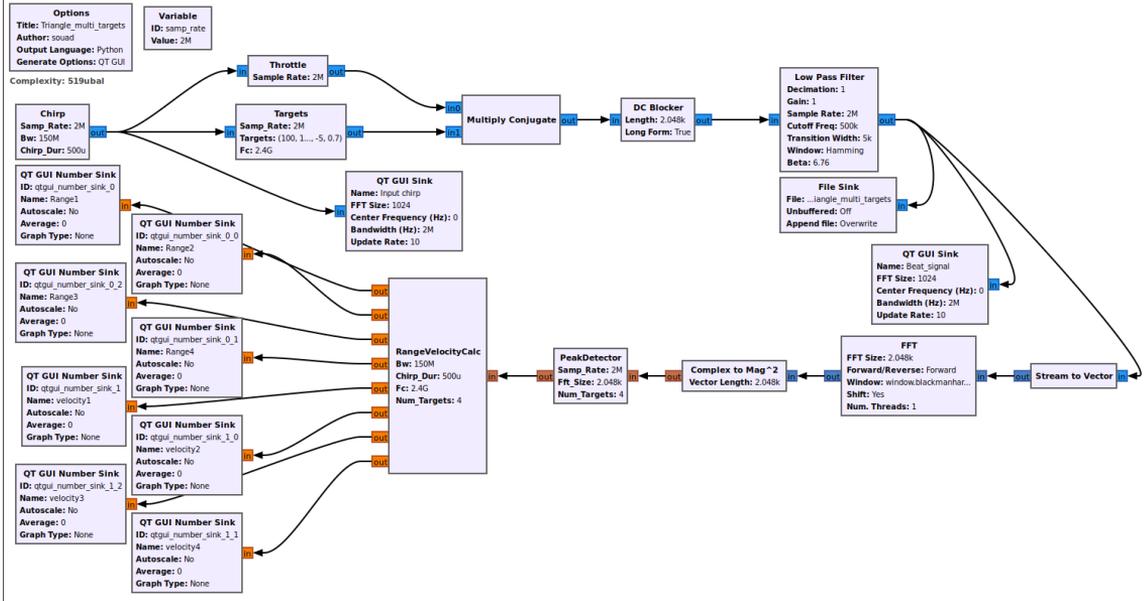
ويظهر في خرج كتلة حساب المدى/السرعة القيم التالية للمدى $[0.0, 0.0, 155, 74]m$ ، وقيم السرعة $[0.0, 0.0, -4.7, 10.3]m/s$. حيث تم تصميم النموذج لمحاكاة 4 أهداف ولتبسيط المثال تم الأخذ بالاعتبار وجود هدفين فقط واعتبار البقية بقيم بارامترات صفرية.

الجدول (8) بارامترات محاكاة رادار FMCW_SDR ذو موجة مثلثية لكشف أهداف متعددة.

2.4GHz	تردد الحامل f_c
$\lambda = 0.125m$	طول الموجة
0.5ms	دور التعريفة T
150 MHz	عرض الحزمة B
2M Sample/s	معدل أخذ العينات f_{sam}
2048 (دقة تمييز التردد 976.56Hz/bin)	حجم FFT

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

$\Delta R = \frac{c}{2B} = 0.9m$	دقة تمييز المدى
$v_{max} = \frac{\lambda}{4T} = \pm 15m/s$	أقصى سرعة لا لبس فيها



الشكل (18) بنية المخطط التدفقي لرادار FMCW ذو موجة مثلية لاكتشاف أهداف متحركة

متعددة.

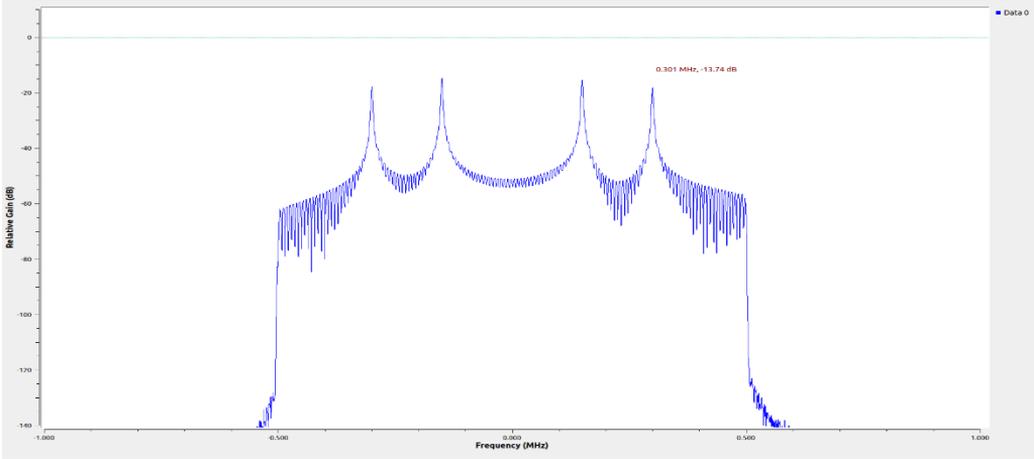
وتقوم كتلة Python التي تم برمجتها لمحاكاة صدى متعدد الأهداف بجمع الإشارات المتأخرة/المزاحة دولياً من أهداف متعددة. فمن أجل كل هدف:

- يؤثر المدى على التأخير الزمني
- تؤثر السرعة على إزاحة دولير
- يؤثر المقطع الراداري العرضي (RCS) على مطال الصدى.

تظهر قمماً متعددة (4 قمم لتعدد النبض قمتين لكل هدف، واحدة من أجل التفرقة الصاعدة وواحدة من أجل التفرقة الهابطة) في طيف خرج تحويل فورييه السريع FFT. وتقوم كتلة Python التي تم برمجتها لكشف الذروة بتحويل ترددات النبض إلى أزواج من المدى/السرعة وفق الصيغ التالية: $v = \frac{f_{beat} * \lambda}{2}$ ، $R = \frac{f_{beat} * C * T}{2 * B}$ كما يلي:

$$\left(75 \text{ m}, 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}, RCS = 1.0\right) \rightarrow 0.148 \text{ MHz} \text{ تردد النبض}$$

$$\left(150 \text{ m}, -5 \frac{\text{m}}{\text{s}}, RCS = 0.7\right) \rightarrow 0.31 \text{ MHz} \text{ تردد النبض}$$



الشكل (19) الطيف الترددي لترددات النبض بعد LPF من أجل هدفين، الأول:

$$\left(75 \text{ m}, 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}, RCS = 1.0\right), \text{ والثاني: } \left(150 \text{ m}, -5 \frac{\text{m}}{\text{s}}, RCS = 0.7\right).$$

يوضح الشكل (19) الطيف الترددي الموافق لترددات النبض لهدفين يملكان البارامترات $\left(75 \text{ m}, 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}, RCS = 1.0\right)$ و $\left(150 \text{ m}, -5 \frac{\text{m}}{\text{s}}, RCS = 0.7\right)$. وتظهر ترددات النبض عند 0.148 MHz و 0.31 MHz .

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

يمكن تحسين الدقة بزيادة حجم تحويل فورييه السريع لفصل الأهداف القريبة وإطالة دور التغيريد لتحسين دقة السرعة. ويمكن معالجة بيانات تردد النبض الناتجة عن محاكاة رادار FMCW في GNU Radio في بيئة MATLAB من خلال حفظ إشارة النبض في GNU Radio بإضافة كتلة File Sink بعد مرشح الترددات المنخفضة (أو بعد كتلة Multiply إذا لم يتم استخدام أي ترشيح).

8. نتائج البحث

أثبت نهج SDR باستخدام GNU Radio جدوى إنشاء نماذج أولية لأنظمة رادار FMCW بأشكال موجية قابلة للتخصيص، مما يُقلل من الاعتماد على الأجهزة، ويوفر أساساً لاختيار أشكال الموجات بناءً على متطلبات التطبيق.

اتضح من عمليات المحاكاة ومعالجة الإشارة كفاءة شكل موجة سن المنشار في اكتشاف مسافة أهداف متعددة عن الرادار. كما أن رادار FMCW ذو موجة مثلثية الذي تم تحقيقه وباستخدام برمجة Python لمعالجة الإشارة نجح بالحصول على بارامترات مسافة أهداف فردية ومتعددة من الطيف الترددي لإشارة النبض. أثناء الكشف عن الهدف المتحرك، أظهر رادار FMCW القدرة على اكتشاف مسافة الهدف باستخدام إزاحة تردد النبض ولحساب السرعة النسبية للهدف المتحرك المقرب إلى الرادار أو المبتعد عنه استناداً إلى إزاحة دوبلر.

يقدم الجدول (8) مقارنة لبعض الدراسات المرجعية حول أنظمة الرادار منخفضة التكلفة القائمة على SDR، مع تسليط الضوء على اختلافاتها وأوجه التشابه الرئيسية بينها.

الجدول (8) مقارنة الدراسة الحالية مع بعض الدراسات المرجعية.

الدراسة التي تم إجراؤها	المرجع [5]	المرجع [1]	
كشف مواقع وتحديد بارامترات المركبات	جدوى استخدام SDR كرادارات في تطبيقات السيارات الأمامية	كشف وتحديد مواقع الطائرات بدون طيار	الهدف
الحزمة S (2.4GHz)	الحزمة Ku (15GHz)	الحزمة C (5.8GHz)	مجال التردد
معالجة دوبلر_المدى، معالجة FMCW لموجة سن المنشار والموجة المثلثية	معالجة FMCW الأساسية، قياس دوبلر	معالجة دوبلر_المدى، كشف CFAR	معالجة الإشارات
بناء نموذج رادار FMCW لكشف وتحديد بارامترات الأهداف باستخدام برنامج GNU Radio Python	منهجية منخفضة التكلفة للنماذج الأولية للرادار SDR مقابل الرادار التقليدي	بنية نظام ونموذج أولي عملي لتتبع الطائرات بدون طيار في الزمن الحقيقي	المساهمة الرئيسية
دقة محدودة في حساب المدى	مجال ترددي محدود، مشاكل في ضجيج الطور	دقة مدى محدودة، حساسية للتشويش	القيود

تحليل أداء رادار الموجة المستمرة المعدلة ترددياً القائم على الراديو المُعرّف برمجياً باستخدام برنامج GNU Radio

والسرعة، غياب تحديد زاوية الهدف			
------------------------------------	--	--	--

9. مقترحات البحث

يمكن تقييم البرنامج المصمم باستخدام أجهزة SDR مختلفة. بحيث يتحقق قياس واقعي، وليس محاكاة فقط، عن طريق ربط وحدات SDR لإرسال واستقبال الإشارة المُولدة. ومن أجل الانتقال من محاكاة برمجية بحتة إلى منصة اختبار واقعية، نستبدل:

- توليد إشارة الإرسال بجهاز إرسال SDR فعلي.
- نموذج القناة مع الانتشار الكهرومغناطيسي الحقيقي والأهداف الحقيقية.
- النقاط إشارة الاستقبال بجهاز استقبال SDR.

مع ذلك، تبقى وحدات المعالجة (المزج، الترشيح، تحويل فورييه السريع، الكشف، ... إلخ) كما هي إلى حد كبير.

تُبرز التطورات الحديثة إمكانات SDR في إنشاء نماذج أولية لرادارات FMCW، لكن الأداء يعتمد على كفاءة الخوارزمية واستقرار الأجهزة. يمكن مستقبلاً تحسين معالجة الإشارة من خلال أخذ العينات بشكلٍ منهجي بدلاً من الاعتماد على ميزات GNU Radio. كما يمكن أيضاً دراسة أشكال موجات التعديل الأخرى مثل MFCW و SFCW.

10. المراجع

- [1] Diogo Santos , Pedro Sebastião , Nuno Souto ,“Low-cost SDR based FMCW radar for UAV localization”, WPMC, 2019.
- [2] Siska Aulia, Andriyan Bayu Suksmono, Achmad Muni “Stationary and Moving Targets Detection on FMCW Radar Using GNU Radio-Based software Defined Radio”, 2015 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS) , Indonesia, 2015.
- [3] Z. Qizhao and W. Yaqi, “FMCW radar implemented with GNU Radio Companion.” Master Thesis, Linnaeus University ,Sweden,2016.
- [4] H. Deng and Z. Geng, “Radar Networks.” First edition ,2020. [Online]. Available: <http://taylorandfrancis.com>
- [5] A. M. Monk, “Exploration into the Use of a Software Defined Radio as a Low-Cost Radar Front-End,” 2020. [Online]. Available: <https://scholarsarchive.byu.edu/etd/8742>
- [6] M. M. Hill, “Developing a Generic Software-Defined Radar Transmitter using GNU Radio,” 2012.
- [7] A. Bello, “Radio Frequency Toolbox for Drone Detection and Classification”, MASTER OF SCIENCE,.OLD DOMINION UNIVERSITY, Spring 2019.
- [8] S. M. Patole, M. Torlak, D. Wang, and M. Ali, “Automotive Radars: A review of signal processing techniques,” IEEE Signal Process Mag, vol. 34, no. 2, pp. 22–35, Mar. 2017.

- [9] J. Smith et al., "Low-Cost SDR-Based FMCW Radar for Automotive Applications," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022.
- [10] H. Lee and S. Kim, "High-Resolution Doppler Estimation for SDR-FMCW Radar," IEEE Radar Conference, 2023.
- [11] R. Gupta et al., "Deep Learning for Multi-Target Detection in SDR Radars," IET Radar, Sonar & Navigation, 2023.
- [12] L. Wang et al., "Phase Noise in SDR-Based FMCW Radars: Measurement and Mitigation," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2023.
- [13] S.Dawar et al., "FMCW–Radar Based Vital Signs Monitoring", Homs University Journal, Volume 42, Issue 6, 2020.
- [14] H. Nasr et al. " Design of a Custom DSP-Core for an SDR Radio Receiver Using Matlab and ISE Design Environments", Homs University Journal, Volume 42, Issue 6, 2020.
- [15] Cai, V., Kraft, J. "Channel Leakage Cancellation for Software Defined Radio (SDR) Narrowband Radar Interferometry Using GNU Radio". 2021.
- [16] Patole et al. "Automotive Radars: A review of signal processing techniques", IEEE Signal Processing Magazine 34(2), 22-35, 2017.
- [17] Rambach et al. "Detection of Vulnerable Road Users in Dense Traffic Using 77 GHz FMCW Radar", IEEE Radar Conference, 1450-1455*2018.
- [18] Richards, M. A. Fundamentals of Radar Signal Processing (3rd ed.). McGraw-Hill, (2014)
- [19] Lyons, R. G. Understanding Digital Signal Processing (2nd ed.). Prentice Hall, (2004)

- [20] Mahafza, B. R. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB (4th ed.). CRC Press,(2018).
- [21] Skolnik, M. I. Radar Handbook, 3rd ed., McGraw-Hill.Chapter 8.3 (FMCW Radar),2008.