

دراسة تأثير الفاصل الزمني المتغير على نبضات كوستاس المتعامدة<sup>١</sup>

## Studying the effect of variable time spacing on Orthogonal Costas Frequency Modulation Pulses.

المهندسة خولة قصاص<sup>٢</sup>      الاستاذ الدكتور حسن أبو النور<sup>٣</sup>

الدكتور أسامة قواص<sup>٤</sup>

### الملخص

تم في الدراسات الأخيرة الاستفادة من المصفوفة المتعامدة لتشكيل مصفوفة صفحية متعامدة، وتطبيق هذه المصفوفة على قطار من النبضات الرادارية المتماثلة لحذف الفصوص الجانبية القريبة من الفص الرئيسي في تابع الترابط الذاتي (ACF) Auto Correlation Function وتقليل مستوى الفصوص الجانبية المتكررة. وفي دراسات أخرى تم استخدام مصفوفة كوستاس في الترميز الترددي للإشارة الرادارية لزيادة دقة التمييز بالمدى والحصول على مستوى فصوص جانبية منخفضة.

في هذا البحث نبين نتائج دراسة تطبيق التقنيات السابقة على قطار من النبضات المترابطة مع إضافة فواصل زمنية متغيرة بين النبضات للحصول على تابع ترابط ذاتي ACF له ميزات تابع ACF للإشارة الرادارية ذات الترميز الصفحي المتعامد وترميز كوستاس مع تقليل مستوى الفصوص الجانبية المتكررة أقل من مستوى الفصوص الجانبية المتكررة لتابع ACF للإشارة الرادارية ذات الترميز الصفحي المتعامد أو ذات ترميز كوستاس.

كلمات مفتاحية:

مصفوفة متعامدة: Orthogonal Matrix

تابع الترابط الذاتي: Auto Correlation Function ACF

تابع الاعماء: Ambiguity Function AF

إشارة كوستاس: Costas Signal      مصفوفة كوستاس: Costas Array

مسطرة غولومبو: Golombo Ruler

تعديل ترددي خطي: Linear Frequency Modulation LFM

١ أعد البحث في سياق بحث دكتوراه للمهندسة خولة قصاص بإشراف الدكتور حسن أبو النور، والدكتور أسامة قواص.

٢ قسم الهندسة الإلكترونية والاتصالات- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة دمشق.

٣ أستاذ قسم الهندسة الإلكترونية والاتصالات- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة دمشق.

٤ مدير بحوث في المعهد العالي للبحوث التطبيقية- دمشق.

## مقدمة

إن الهدف الأساسي من تطوير الإشارة الرادارية التي تستخدم تقنية الضغط النبضي Pulse Compression هو تحسين دقة التمييز بالمدى ودقة التمييز الدوبلرية بالإضافة إلى مناعة عالية للضجيج بهدف الوصول إلى تابع إعماء Ambiguity Function (AF) قريب من تابع الإعماء المثالي Thumbtack [1] الذي يعتبر الأداة الأساسية في تقييم إشارات الضغط النبضي. لذلك تم استخدام رشقة من النبضات المتماثلة لتحسين دقة التمييز الدوبلرية، أما دقة التمييز بالمدى فبقيت مماثلة لدقة التمييز لنبضة واحدة، ولا يوجد اختلاف في تابع الترابط الذاتي Auto ACF Correlation Function لنبضة واحدة أو لرشقة من النبضات بالإضافة إلى وجود فصوص جانبية متكررة عالية. بوضع ترميز مختلف في النبضات كتطبيق ترميز صفحي متمم أو ترميز صفحي متعامد يؤدي إلى زيادة دقة التمييز بالمدى بالإضافة إلى إزالة الفصوص الجانبية القريبة من الفص الرئيسي في تابع ACF، بالإضافة إلى تقليل مستوى الفصوص الجانبية المتكررة مقارنة بالفصوص الجانبية لرشقة من النبضات المتماثلة [6]. وبالتالي فإن تطبيق ترميز صفحي متعامد على رشقة من النبضات يؤدي إلى تحسين دقة التمييز بالمدى من  $T$  إلى  $T/M$  حيث  $M$  عدد النبضات الجزئية في النبضة الواحدة، وتحسن دقة التمييز الدوبلرية من  $1/T$  إلى  $1/MT_r$  حيث  $T_r$  هو الدور التكراري للنبضات.

إن دقة التمييز بالمدى هي مقلوب عرض المجال الترددي للإشارة الرادارية وبالتالي فإن الإشارة النبضية الرادارية المعدلة ترددياً بشكل خطي Linear Frequency Modulation (LFM) أو المرمزة ترددياً بترميز كوستاس [2] هما الحل الأفضل لزيادة دقة التمييز بالمدى مقارنة مع دقة التمييز بالمدى في الترميز الصفحي أو الترميز الصفحي المتعامد، بالإضافة إلى كونها ذات فصوص جانبية متكررة منخفضة مقارنة برشقة النبضات المتعامدة وبالتالي زيادة مناعة الإشارة الرادارية للضجيج المقصود وغير المقصود، أما دقة التمييز الدوبلرية فهي منخفضة وتساوي مقلوب عرض النبضة وليس لها علاقة بالتردد الحامل للنبضة.

إن الفصوص الجانبية المتكررة في تابع ACF لرشقة نبضات ذات فواصل زمنية ثابتة ذات مستوى عالي، ولا يمكن تخفيضه بتقنيات التعديل الترددي ولكن بتغيير الفواصل الزمنية بين النبضات، يتم الإقلال من مستوى الفصوص الجانبية المتكررة وبالتالي زيادة إمكانية كشف الأهداف الضعيفة بدون التباس وزيادة مناعة الإشارة الرادارية للضجيج المقصود وغير المقصود [9].

لا يوجد حتى الآن ترميز يحقق جميع متطلبات الإشارة الرادارية من حيث دقة التمييز بالمدى ودقة التمييز الدوبلرية بالإضافة إلى مناعة عالية للضجيج لذلك سوف يتم في هذه المقالة مزج تقنيات الترميز السابقة بترميز كوستاس وترميز المصفوفة الصفحية المتعامدة بالإضافة إلى تطبيق الفواصل الزمنية المتغيرة، للوصول إلى إشارة رادارية تجمع ميزات تابع ACF للطرق الثلاث، وبالتالي الحصول على إشارة رادارية لها دقة تمييز عالية بالمدى تعادل دقة ترميز كوستاس وفصوص جانبية معدومة قريبة من الفص الرئيسي، بالإضافة إلى فصوص جانبية متكررة ذات مستوى منخفض.

سيتم في الفقرة I شرح مبدأ المصفوفات المتعامدة ميزاتها، وطرق توليدها، وفي الفقرة II سيتم إعطاء فكرة موجزة عن ترميز كوستاس، ميزاته، وفي الفقرة III نعطي فكرة موجزة عن مبدأ الفواصل الزمنية المتغيرة، يلي ذلك عرض للدراسة التي تمت بالاعتماد على الإشارات المولدة من المصفوفات المتعامدة، وترميز كوستاس، والفواصل الزمنية المتغيرة باستخدام التوابع الأساسية في تقييم الإشارات الرادارية تابع الاعاء AF المعادلة (1)، وتابع الترابط الذاتي ACF المعادلة (2) وهي:

- دراسة تابع AF وتابع ACF لرشقة من النبضات بدون ترميز بفواصل زمنية ثابتة ونبضات ذات الترميز الصفحي المتعامد بفواصل زمنية ثابتة.
  - دراسة تابع AF وتابع ACF لرشقة من نبضات الترميز الترددي كوستاس ذات فواصل زمنية ثابتة ورشقة من نبضات كوستاس المتعامدة ( ترميز كوستاس مع ترميز صفحي المتعامد) ذات فواصل زمنية ثابتة.
  - دراسة تابع AF وتابع ACF لرشقة من نبضات كوستاس المتعامدة مع إضافة فواصل زمنية مختلفة بين النبضات وفق طريقة مسطرة غولومبو ومصفوفة كوستاس.
- وأخيراً مقارنة نتائج الدراسة والخاتمة.

تابع الاعاء AF

$$|x(\tau, \nu)| = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) u^*(t - \tau) \exp(j2\pi\nu t) dt \right| \quad (1)$$

تابع الترابط الذاتي ACF

$$|x(\tau, 0)| = R(\tau) = \left| \int_0^{\infty} u(t) u^*(t - \tau) dt \right| \quad (2)$$

## I - الترميز الصفحي باستخدام المصفوفة المتعامدة Phase Coding using Orthogonal matrix

بدئ باستخدام المجموعات المتممة في الترميز الصفحي للإشارات الرادارية [10,11] لتحسين دقة التمييز بالمدى بالإضافة إلى الميزة الأساسية وهي أن الفصوص الجانبية القريبة في تابع ACF معدومة ضمن المجال  $t_b \leq \tau \leq T$  حيث  $T$  عرض النبضة و  $t_b$  الفترة الزمنية للنبضة الجزئية الواحدة، والفصوص الجانبية المتكررة منخفضة المستوى نسبياً، بالإضافة إلى زيادة عرض المجال الطيفي للإشارة، ولكن لم يتم الحصول على أكثر من ثلاث مجموعات صفحية متممة، سواء ثنائية الصفحة أو متعددة الصفحات. في [10] تم استخدام المصفوفات المتعامدة في الترميز الصفحي للإشارة الرادارية للحصول على مجموعات متممة كثيرة وبالتالي فإن تابع ACF له نفس ميزات المجموعات الصفحية المتممة بالإضافة إلى إمكانية الحصول على عدد غير محدد من المجموعات المتممة.

يقال عن مصفوفة أنها متعامدة إذا كان الجداء النقطي dot product بين أي عمودين من المصفوفة A هو صفر و جداء  $A^T \bullet A$  هي مصفوفة قطرية Diagonal .

إن إحدى الطرق الأساسية في توليد المجموعات المتممة بالاعتماد على المصفوفات المتعامدة هي تركيبية PONS التي وجدت في عام 2002 والتي استطاع بواسطتها توليد مصفوفات متعامدة بحجم كبير 4x4, 8x8, 16x16 [6]،

والطريقة البديلة في ايجاد مجموعات متممة بالاعتماد على المصفوفة المتعامدة هي مصفوفة Hadamard التي لها خواص التعمد، نستطيع بواسطتها الحصول على ثمان مجموعات سلاسل متممة كل سلسلة من ثمان عناصر. وإحدى ميزات هذه المصفوفة أن أي مجموعة جزئية منها تحقق خواص المصفوفات المتعامدة. في دراستنا سوف نستخدم مصفوفة hadamard للحصول على مجموعة السلاسل المتعامدة وهي:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

من الواضح أن عناصر المصفوفة A تأخذ القيم +1,-1 التي تمثل الصفحة  $\pi$  والصفحة 0 . وبالتالي فإن مجموعات سلاسل متممة المولدة من مصفوفة hadamard هي:

$$[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1], \ [1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1], \ [1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1], \ [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1],$$

$$[1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1], \ [1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1], \ [1 \ -1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1]$$

وإشارة الترميز الصفحي المتعامد هي عبارة عن رشقة من النبضات ذات تردد تكراري  $T_r > T$  حيث T عرض النبضة الواحدة،  $T_r$  الدور التكراري للنبضات، تتألف كل نبضة من عدة أجزاء لها تسلسل صفحي مختلف عن التسلسل الصفحي للنبضة الأخرى وفق الترميز الصفحي لمصفوفة hadamard , وبالتالي فإن الغلاف العقدي لرشقة النبضات ذات الترميز الصفحي المتعامد هو:

بفرض مجموعة النبضات هي:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N u_n[t - (n-1)T_r] \quad (3)$$

حيث  $u_n(t)$  هي النبضة.

$$u_n(t) = \sum_{m=1}^M a_{n,m} s_m[t - (m-1)t_b] \quad (4)$$

فإن الغلاف العقدي لرشقة النبضات هو:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{n,m} s_m[t - (n-1)T_r] \quad (5)$$

حيث

$$s_m(t) = \begin{cases} \exp(j2\pi f_0 t), & 0 \leq t \leq t_b, \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (6)$$

حيث  $a_{n,m}$  الترميز الصفحي للعنصر في الخانة رقم  $m$  من النبضة رقم  $n$  في قطار النبضات  $(1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N)$  و  $T_r$  الدور التكراري للنبضات ،  $s_m(t)$  هو الغلاف العقدي للخانة  $m$  من النبضة في المجال  $(m-1)t_b \leq t \leq mt_b$  ، معادلة الفص الرئيسي لتابع الترابط الذاتي ACF ضمن المجال  $0 \leq \tau < t_b$  [10] هو:

$$R(\tau) = \begin{cases} N \sum_{m=1}^M R_m(\tau), & 0 \leq \tau \leq t_b, \\ 0 & t_b \leq \tau < T_r - T \end{cases} \quad (٧)$$

حيث  $R_m(\tau)$  هو تابع الترابط الذاتي ACF للخانة  $s_m(t)$ ، أما تابع ACF عند  $\tau > t_b$  فهو يتمركز عند مضاعفات الدور التكراري  $T_r$  وهو فقط عبارة عن مجموع الترابط المتعارض بين النبضات المتعارضة عند الأدوار التكرارية للنبضات.

## II- إشارة كوستاس

إشارة كوستاس هي إشارة رادارية نبضية ذات ترميز ترددي تعتمد على مصفوفة كوستاس الثنائية [1,2]، وهي عبارة عن نبضات عريضة (بعرض T) تضم كل نبضة M نبضة جزئية، عرض النبضة الجزئية هو  $t_b = T/M$ ، تعدل كل نبضة جزئية بتردد مختلف عن تردد النبضات الجزئية الأخرى كما هو مبين بالشكل (١-ب)، يتم اختيار كل تردد من سلسلة من الترددات ضمن المجال الترددي B وبالتالي لدينا M تردد والفاصل الترددي بين النبضات الجزئية هو من مضاعفات  $\Delta f = 1/t_b$ . وقد وضع الباحث كوستاس شروط لترتيب الترددات في النبضة للتحكم بالفصوص الجانبية بحيث يعطي تابع AF للإشارة مستوى فصوص جانبية لا يزيد عن  $1/M$  من الفص الرئيسي، بالإضافة إلى ذلك فإن دقة التمييز بالمدى هي  $1/M^2$  من عرض النبضة ودقة التمييز الدوبلرية هي  $1/T$ ، وبالتالي فإن نسبة الضغط النبضي في إشارة كوستاس هي  $M^2$ ، وأول صفر في تابع ACF لإشارة كوستاس عند  $\tau = T/M^2 = t_b/M$ . الغلاف العقدي لإشارة كوستاس ذو تسلسل القفز الترددي  $a_m = [a_1, a_2, \dots, a_M]$  هو:

حيث الغلاف العقدي لإشارة كوستاس

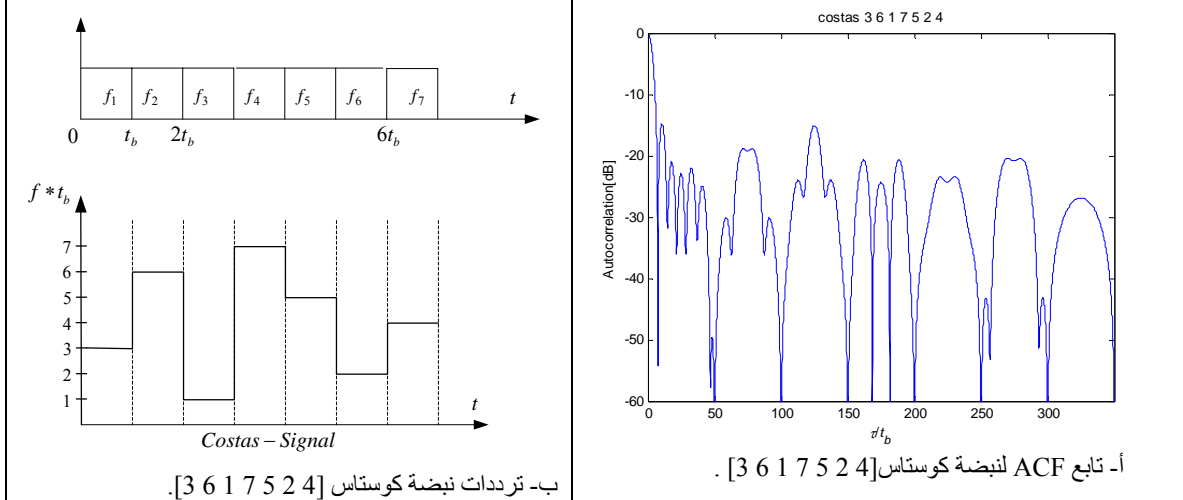
$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{Mt_b}} \sum_{m=1}^M u_m[t - (m-1)t_b], \quad (٨)$$

حيث

$$u_m(t) = \begin{cases} \exp(j2\pi f_m t), & 0 \leq t \leq t_b, \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (٩)$$

$$f_m = \frac{a_m}{t_b}, \quad (١٠)$$

يبين الشكل (١-أ) تابع ACF لإشارة كوستاس حيث الترددات موزعة وفق مصفوفة كوستاس [3 6 1 7 5 2 4].

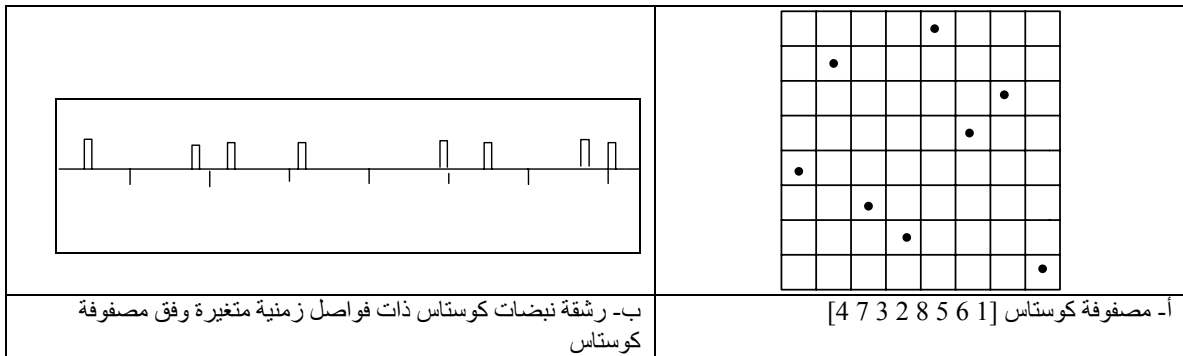


الشكل (١)

### III- الفواصل الزمنية المتغيرة Variable spacing

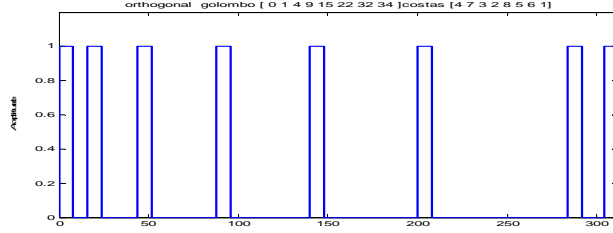
إن توزيع رشقة من النبضات الجزئية ضمن نبضة إرسال رادارية بشكل غير منتظم تساعد على توزيع الفصوص الجانبية المتكررة للتابع ACF لنبضة الإرسال بدلاً من تركيزه عند مضاعفات التردد التكراري للنبضات الجزئية في حال توزيعها بشكل منتظم، وأفضل الطرق في توزيع النبضات الجزئية تكون باستخدام مصفوفة كوستاس أو مسطرة غولومبو [9].

تعتمد الفواصل الزمنية المتغيرة باستخدام مصفوفة كوستاس على نشر أعمدة مصفوفة كوستاس النقطية زمنياً مع تبديل كل نقطة بنبضة. يبين بالشكل (٢) مصفوفة كوستاس النقطية [4 7 3 2 8 5 6 1] المستخدمة لتوليد الفواصل الزمنية المتغيرة والإشارة الناتجة.



الشكل (٢)

ويمكن تطبيق مسطرة غولومبو في توزيع النبضات الجزئية للنبضة الرادارية. مسطرة غولومبو هي مسطرة يعتمد مبدأ القياس فيها على عدم وضع مؤشرات كثيرة للقياس وإنما تعتمد على تقليل عدد المؤشرات إلى الحد الأدنى لقياس جميع الأبعاد الجزئية التي تقيسها المسطرة فمثلاً في مسطرة غولومبو لقياس من 1-34cm يتم وضع مؤشرات عند النقاط [0 1 4 9 15 22 23 34] لقياس أي بعد من 1-34cm بدقة 1cm.



الشكل (٣): إشارة ذات فاصل زمني وفق مسطرة غولومبو

يبين الشكل (٣) الإشارة الناتجة من تطبيق مسطرة غولومبو [0 1 4 9 15 22 32 34] ذات 8 مؤشرات على رشقة من ثمان نبضات، حيث يتم وضع نبضة عند كل مؤشر. يبين المرجع [9] دراسة تفصيلية لهذه الطرق. سيتم في الفقرة التالية تطبيق المبادئ السابقة على مجموعة من 8 نبضات ودراسة مدى تأثير مزج المبادئ السابقة (المصفوفة المتعامدة والفواصل الزمنية المتغيرة وإشارة كوستاس) على مواصفات الإشارة الناتجة.

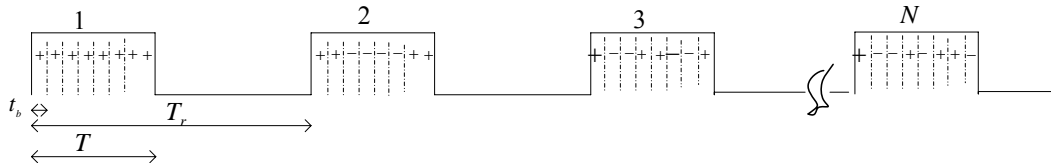
### ١- دراسة رشقة من النبضات بدون ترميز صفحي وبترميز صفحي متعامد.

يتألف تابع ACF لرشقة من النبضات المتماثلة ذات الفواصل الزمنية الثابتة بعدد ثمانية و  $T_r > 2T$  (حيث  $T_r$  الدور التكراري للنبضات و  $T$  عرض النبضة) (الشكل (٥)) من فص رئيسي ومجموعة من الفصوص الجانبية المتكررة تتمركز عند مضاعفات الدور التكراري  $T_r$ ، وأول صفر في تابع ACF هو عند الزمن  $8t_b$  حيث  $t_b = T/8$ ، بالإضافة إلى ذلك فإن مستوى الفصوص الجانبية المتكررة عالي وبالتالي فإن ذلك يعطي التباس في تحديد الأهداف ولا يمكن تطبيقه عملياً، أما دقة التمييز بالمدى هي نفسها دقة التمييز لنبضة واحدة. إن الهدف الوحيد من استخدام رشقة من النبضات هو تحسين الدقة التمييزية الدوبولية والتي تساوي  $1/MT_r$ . يبين الشكل (٥) تابع

ACF لرشقة من 8 نبضات بدور تكراري أكبر من  $2T$  لعدم حدوث تداخل في ACF ( $T_r = 2.5T$ ).

بإضافة تعديل صفحي متعامد إلى النبضات السابقة وفق مصفوفة Hadamard (السلاسل الصفحية المبينة في الفقرة I) كما هو مبين في الشكل (٤) حيث يتم تعديل النبضة الأولى صفحياً وفقاً لفروق الصفحات في السطر الأول من هذه المصفوفة، ويتم تعديل النبضة الثانية صفحياً وفقاً لصفحات السطر الثاني من هذه المصفوفة أيضاً وهكذا مع الاحتفاظ بالفواصل الزمنية الثابت بين النبضات. وبالتالي زمن النبضة الواحدة  $T = Mt_b = 8t_b$  و الدور التكراري للنبضات  $T_r = 2.5T = 20t_b$  و عرض النبضة الكلي للإشارة  $NT_r = 8T_r = 160t_b$ . حيث  $\exp(j\omega) = 1$  مثلت

بالإشارة (+) و  $\exp(j\pi) = -1$  مثلت بالإشارة (-)

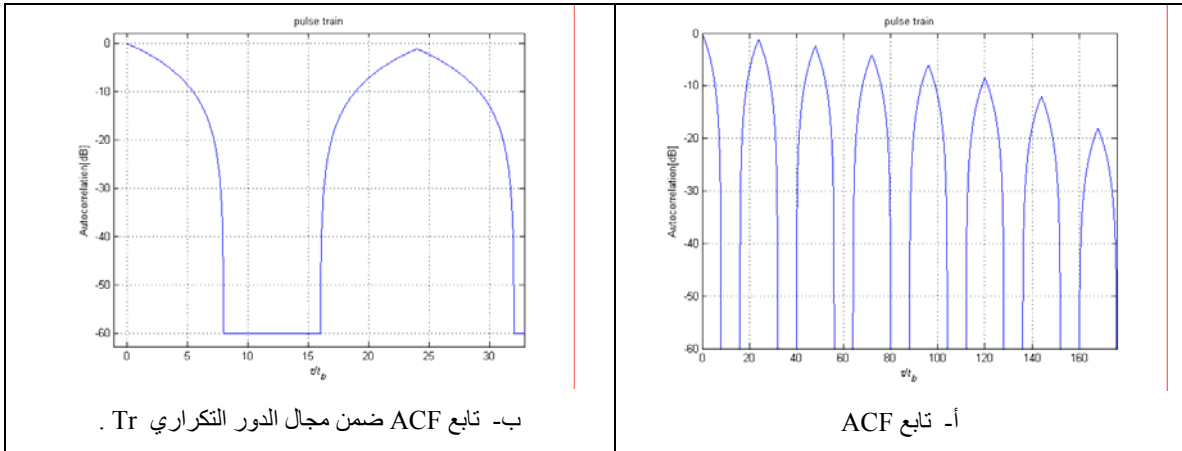


الشكل (٤): الترميز الصفحي المتعامد

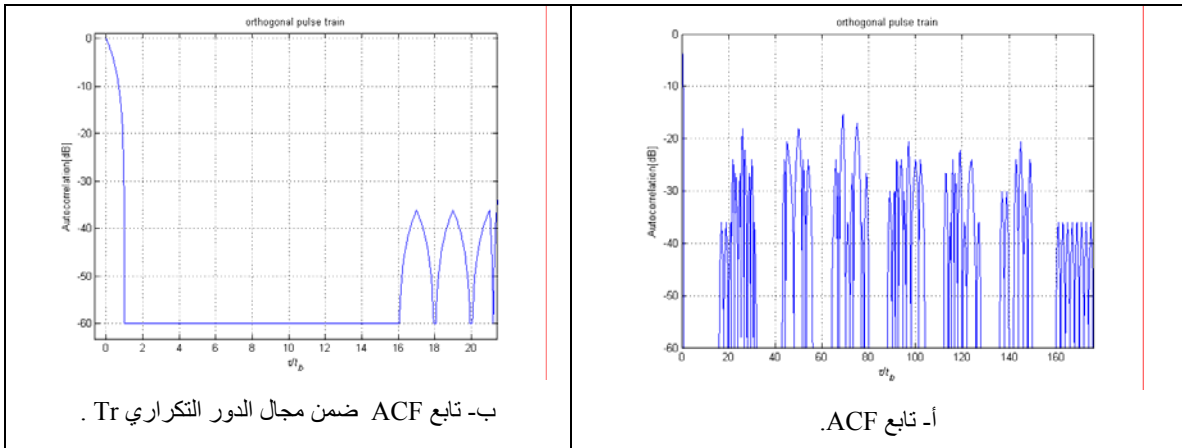
يرسم تابع ACF لرشقة النبضات بدون ترميز صفحي وبتردد تكراري ثابت الشكل (٥) و تابع ACF لرشقة النبضات ذات ترميز صفحي متعامد (المعادلة ٥) وذات تردد تكراري ثابت الشكل (٦)، وبتكبير مخطط تابع الترابط الذاتي للإشارتين عند الفص الرئيسي الأشكال (٥-ب)، (٦-ب) نلاحظ مايلي:

- إن عرض الفص الرئيسي في تابع ACF لرشقة النبضات ذات الترميز الصفحي المتعامد والذي يمثل دقة التمييز في المدى هو:  $t_b = T/8$  الشكل (٦-ب)، بينما دقة تمييز المدى في رشقة النبضات ذات التكرار الثابت غير المعدلة صفحياً هو T الشكل (٥-ب).
- فترة تفسير أطول للفصوص الجانبية بمحاذاة الفص الرئيسي في ACF لرشقة النبضات ذات الترميز الصفحي المتعامد مقارنة مع تابع ACF للنبضات ذات التردد التكراري الثابت.
- مستوى الفصوص الجانبية المتكررة في ACF لرشقة النبضات ذات الترميز الصفحي المتعامد عند مضاعفات الدور التكراري  $T_r$  منخفض بمقدار حوالي (15dB) مقارنة مع مستوى الفصوص الجانبية في ACF لرشقة النبضات ذات التردد التكراري الثابت.

على الرغم من المواصفات التي حصلنا عليها في تابع ACF من التعديل الصفحي المتعامد للإشارة فما زالت الحاجة إلى زيادة دقة التمييز بالمدى وتحسين مناعتها للضجيج المقصود وغير المقصود موجودة.



الشكل (٥): تابع ACF لرشقة من النبضات (ثمان نبضات) ذات فاصل زمني ثابت بين النبضات.



الشكل (٦): تابع ACF لرشقة من النبضات المتعامدة (ثمان نبضات) ذات فاصل زمني ثابت



## ٢- دراسة رشقة من نبضات كوستاس ورشقة من نبضات كوستاس المتعامدة.

بتطبيق ترميز ترددي كترميز كوستاس [4 7 3 2 8 5 1] على رشقة من النبضات (N=8) بدلاً من الترميز الصفحي المتعامد حيث الغلاف العقدي للإشارة هي المعادلة (١٣) بفرض مجموعة النبضات هي:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N u_n[t - (n-1)T_r] \quad (١١)$$

حيث  $u_n(t)$  هي النبضة.

$$u_n(t) = \sum_{m=1}^M s_m[t - (m-1)t_b] \quad (١٢)$$

فإن الغلاف العقدي لرشقة النبضات هو:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M s_m[t - (m-1)t_b - (n-1)T_r] \quad (١٣)$$

حيث

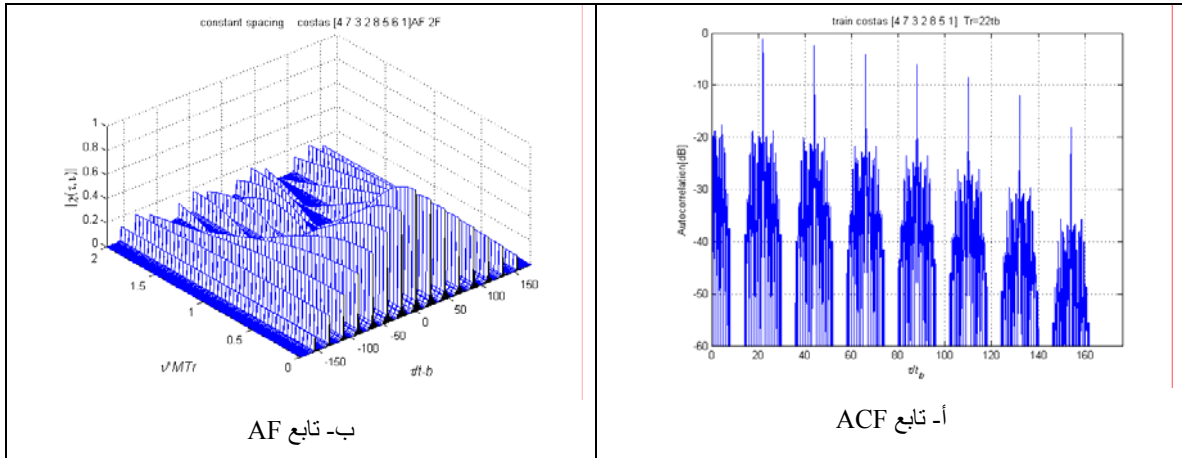
$$s_m(t) = \begin{cases} \exp(j2\pi f_m t), & 0 \leq t \leq t_b, \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (١٤)$$

سلسلة الترددات هي:

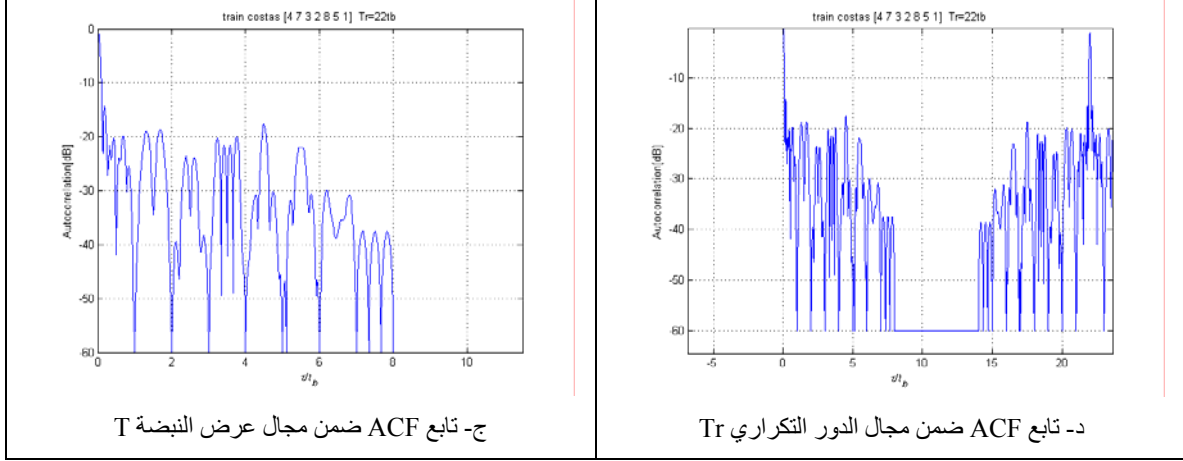
$$a_m = [a_1, a_2, \dots, a_M], \quad f_m = \frac{a_m}{t_b}, \quad (١٥)$$

M عدد الترددات في سلسلة كوستاس، N عدد نبضات الرشقة. و  $T_r$  الدور التكراري للنبضات،  $s_m(t)$  هو الغلاف العقدي للخانة m للنبضة في المجال  $((m-1)t_b \leq t \leq mt_b)$ .

- برسم تابع ACF وتابع AF للإشارة الناتجة الشكل (٧) نلاحظ (كما هو الحال في تابع ACF لرشقة من النبضات غير المعدلة الشكل (٥))، أنه يتألف من فص رئيسي وفصوص جانبية متكررة وأول مستوى صفري للفصوص الجانبية في تابع ACF يكون عند الزمن  $8t_b$  كما أن مستوى الفصوص الجانبية المتكررة عالي أيضاً الشكل (٧-أ) وبنفس مستوى الفصوص الجانبية المتكررة لرشقة النبضات غير المعدلة، ولكن الميزة الوحيدة في هذا التعديل هي أن دقة التمييز بالمدى تساوي دقة التمييز لنبضة كوستاس  $T/M^2$  كما هو مبين في الشكل (٧-ج).



الشكل (٧): تابع ACF و AF لرشقة من نبضات كوستاس [4 7 3 2 8 5 6 1] ذات فاصل زمني ثابت بين النبضات.



ج- تابع ACF ضمن مجال عرض النبضة T

د- تابع ACF ضمن مجال الدور التكراري Tr

الشكل (٧): تابع ACF و AF لرشقة من نبضات كوستاس [4 7 3 2 8 5 1] ذات فاصل زمني ثابت بين النبضات.

بالإضافة إلى ذلك فإن هذه الفصوص هي مرتفعة على كافة النقاط في محور التردد الدوبلري المبين في تابع الاعماء AF للإشارة الشكل (٧-ب).

عند إضافة التعديل الصفحي المتعامد Hadamard إلى رشقة نبضات كوستاس السابقة يكون الترميز الصفحي للنبضة الأولى يوافق لفروق صفحات السطر الأول من مصفوفة Hadamard والترميز الصفحي للنبضة الثانية يوافق لفروق صفحات السطر الثاني من مصفوفة Hadamard وهكذا . وبالتالي فإن معادلة الغلاف العقدي لرشقة من نبضات كوستاس المتعامدة مبينة في المعادلة (١٨).

بفرض مجموعة النبضات هي:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N u_n[t - (n-1)T_r] \quad (١٦)$$

حيث  $u_n(t)$  هي النبضة.

$$u_n(t) = \sum_{m=1}^M a_{n,m} s_m[t - (m-1)t_b] \quad (١٧)$$

فإن الغلاف العقدي لرشقة النبضات هو:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{n,m} s_m[t - (m-1)t_b - (n-1)T_r] \quad (١٨)$$

حيث

$$s_m(t) = \begin{cases} \exp(j2\pi f_m t), & 0 \leq t \leq t_b, \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (١٩)$$

سلسلة الترددات هي:

$$a_m = [a_1, a_2, \dots, a_M], \quad f_m = \frac{a_m}{t_b}, \quad (٢٠)$$

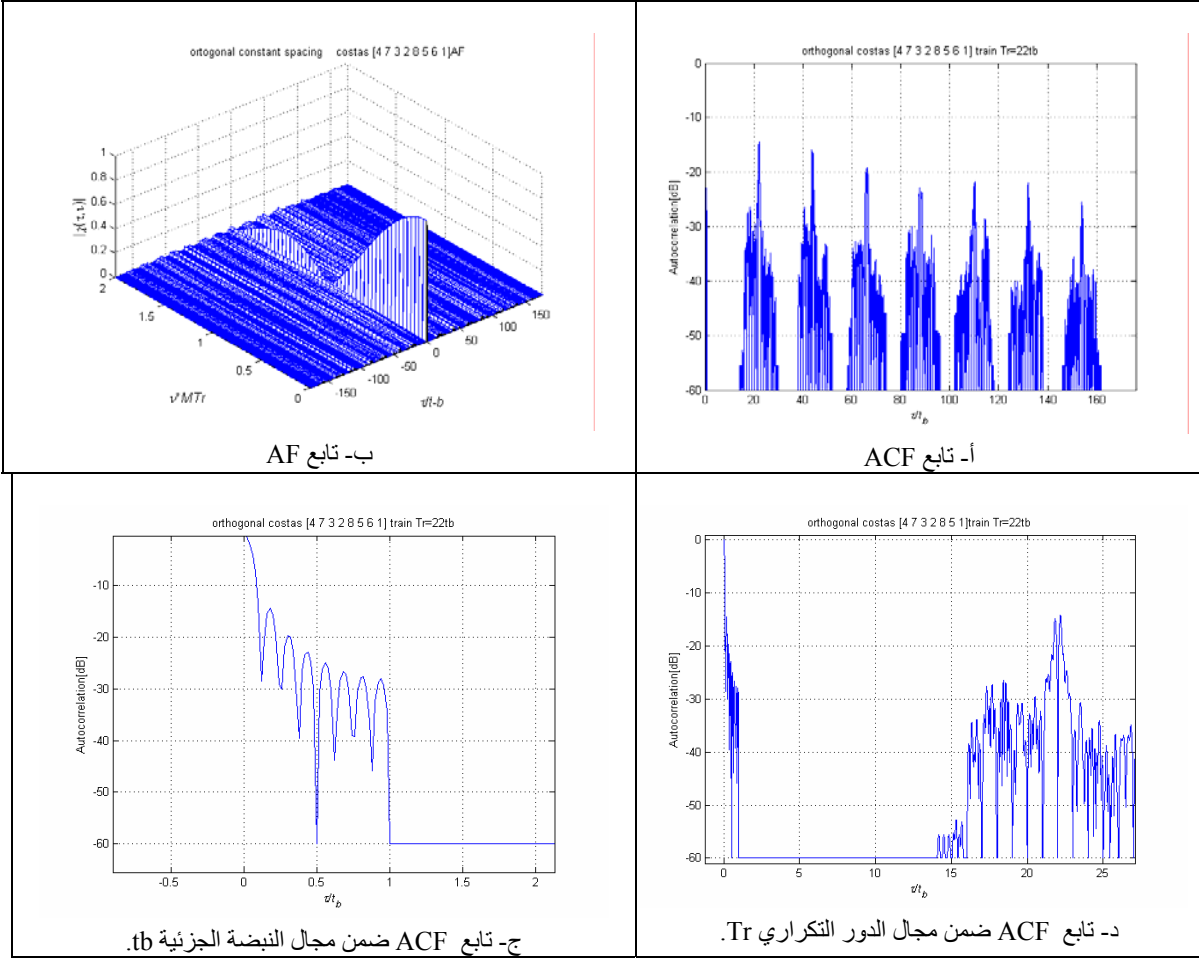
حيث M عدد الترددات في سلسلة كوستاس، N عدد نبضات الرشقة، و  $a_{n,m}$  الترميز الصفحي للعنصر في الخانة رقم m من النبضة رقم n في قطار النبضات ( $1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq P$ ) و  $T_r$  الدور التكراري للنبضات،  $s_m(t)$  هو الغلاف العقدي للخانة m للنبضة في المجال  $((m-1)t_b \leq t \leq mt_b)$ .

يرسم تابع ACF وتابع AF للإشارة الناتجة الشكل (٨) و مقارنتها مع تابع ACF لرشقة نبضات كوستاس المتماثلة الشكل (٧) نلاحظ ما يلي:

■ انخفاض مستوى الفصوص الجانبية المتكررة في تابع ACF لإشارة كوستاس المتعامدة (الشكل ٨-أ) مقارنة بالفصوص الجانبية المتكررة في تابع ACF لرشقة نبضات كوستاس غير المتعامدة (الشكل ٧-أ) بمقدار (15dB).

■ إن تابع ACF لرشقة نبضات كوستاس ضمن المجال  $8t_b$  (الشكل ٧-ج) يماثل تابع ACF لنبضة كوستاس وحيدة (الشكل ١-أ)، أما في رشقة نبضات كوستاس المتعامدة فإن تابع ACF هو صفر ضمن المجال  $t_b \leq \tau \leq T$  ودقة التمييز للإشارة هي دقة التمييز لإشارة كوستاس  $T/M^2$  أي  $t_b/M$ ، مع انخفاض مستوى الفصوص الجانبية المتكررة ضمن المجال  $t_b$  كما هو مبين في الأشكال (٧-ج)، (٨-ج).

- زيادة عرض المجال الطيفي لرشقة النبضات بمعدل M موافق لترميز كوستاس وفي تطبيقنا هو 8.
- دقة التمييز الدوبلرية متساوية في رشقة نبضات كوستاس المتعامدة أو غير المتعامدة وتساوي  $1/MT_r$ .



الشكل (٨): التابع ACF لرشقة من نبضات كوستاس [4 7 3 2 8 5 6 1] المتعامدة ذات فاصل زمني ثابت بين النبضات.

■ نلاحظ من التابع AF الشكل (٨-ب) أن الفصوص الجانبية على محور التأخير الزمني  $\tau$  منخفضة بشكل كبير ولكافة النقاط على محور التردد الدوبلري مقارنة بالفصوص الجانبية لتابع AF لرشقة نبضات كوستاس الشكل (٧-ب).

وبالتالي نستطيع بهذه الطريقة الحصول على ميزات نبضات كوستاس من حيث دقة التمييز بالمدى وميزات الترميز الصفحي المتعامد من حيث تفسير الفصوص الجانبية القريبة من الفص الرئيسي وتخفيض مستوى الفصوص الجانبية المتكررة.

### ٣- دراسة رشقة من نبضات كوستاس المتعامدة ذات الفواصل الزمنية المتغيرة.

على الرغم من ميزات ACF التي حصلنا عليها في الفقرة السابقة فما زالت الفصوص الجانبية المتكررة ذات مستوى عالي مما يؤدي إلى عدم كشف الأهداف الضعيفة، لذلك سنحاول تعديل الإشارة السابقة التي توصلنا إليها (رشقة نبضات كوستاس المتعامدة) وذلك بتوزيع رشقة النبضات زمنياً بفواصل زمنية غير متساوية بدلاً من فواصل زمنية ثابتة ودراسة مدى تأثير ذلك على مستوى الفصوص الجانبية وذلك وفقاً لطريقتين:

الطريقة الأولى: تم توزيع النبضات وفق مصفوفة كوستاس النقطية [1 4 7 3 2 8 5 6] المبينة في الشكل (٢) ورسم تابع ACF وتابع AF للإشارة الناتجة الشكل (٩).

الطريقة الثانية: تم توزيع النبضات وفق مسطرة غولومبو [0 1 4 9 15 22 32 34] المبينة في الشكل (٣) ورسم تابع AF وتابع ACF للإشارة الناتجة الشكل (١٠).

وبالتالي فإن معادلة الغلاف العقدي لرشقة من نبضات كوستاس المتعامدة ذات الفواصل الزمنية المتغيرة مبينة في المعادلة (٢٣)، ويتحدد بعد النبضات عن النبضة الأولى (سلسلة  $T_n$ ) وفقاً لطريقة توزيع النبضات (مصفوفة كوستاس، مسطرة غولومبو).

بفرض مجموعة النبضات هي:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N u_n[t - (n-1)T_r] \quad (٢١)$$

حيث  $u_n(t)$  هي النبضة.

$$u_n(t) = \sum_{m=1}^M a_{n,m} s_m[t - (m-1)t_b] \quad (٢٢)$$

فإن الغلاف العقدي لرشقة النبضات هو:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{n,m} s_m[t - (m-1)t_b - (n-1)T_r] \quad (٢٣)$$

حيث

$$s_m(t) = \begin{cases} \exp(j2\pi f_m t), & 0 \leq t \leq t_b, \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (٢٤)$$

سلسلة الترددات هي:

$$a_m = [a_1, a_2, \dots, a_M], \quad f_m = \frac{a_m}{t_b}, \quad (٢٥)$$

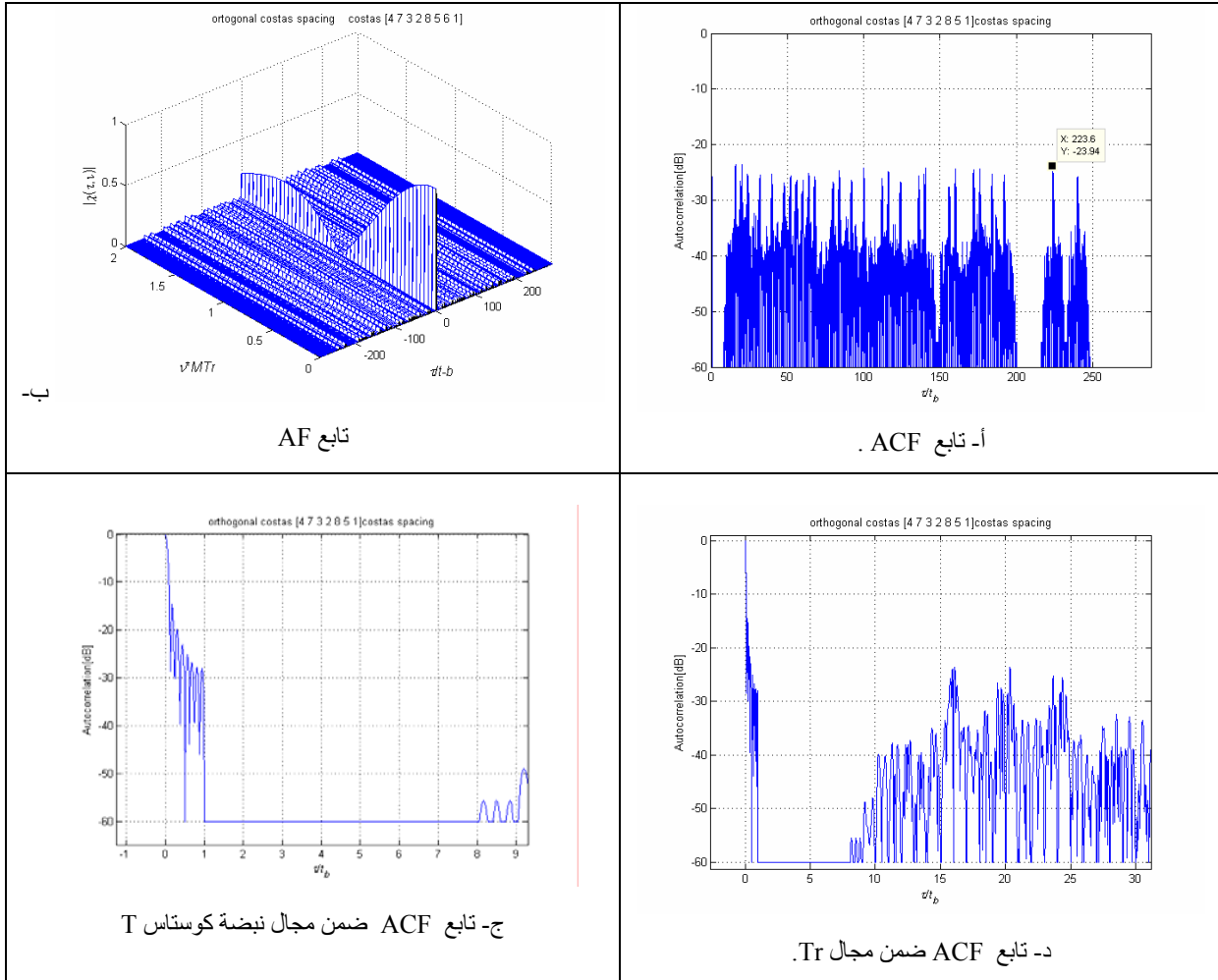
بعد النبضات عن النبضة الأولى:

$$(٢٦)$$

$$T_n = [T_1, T_2, \dots, T_N], \quad T_1 = 0$$

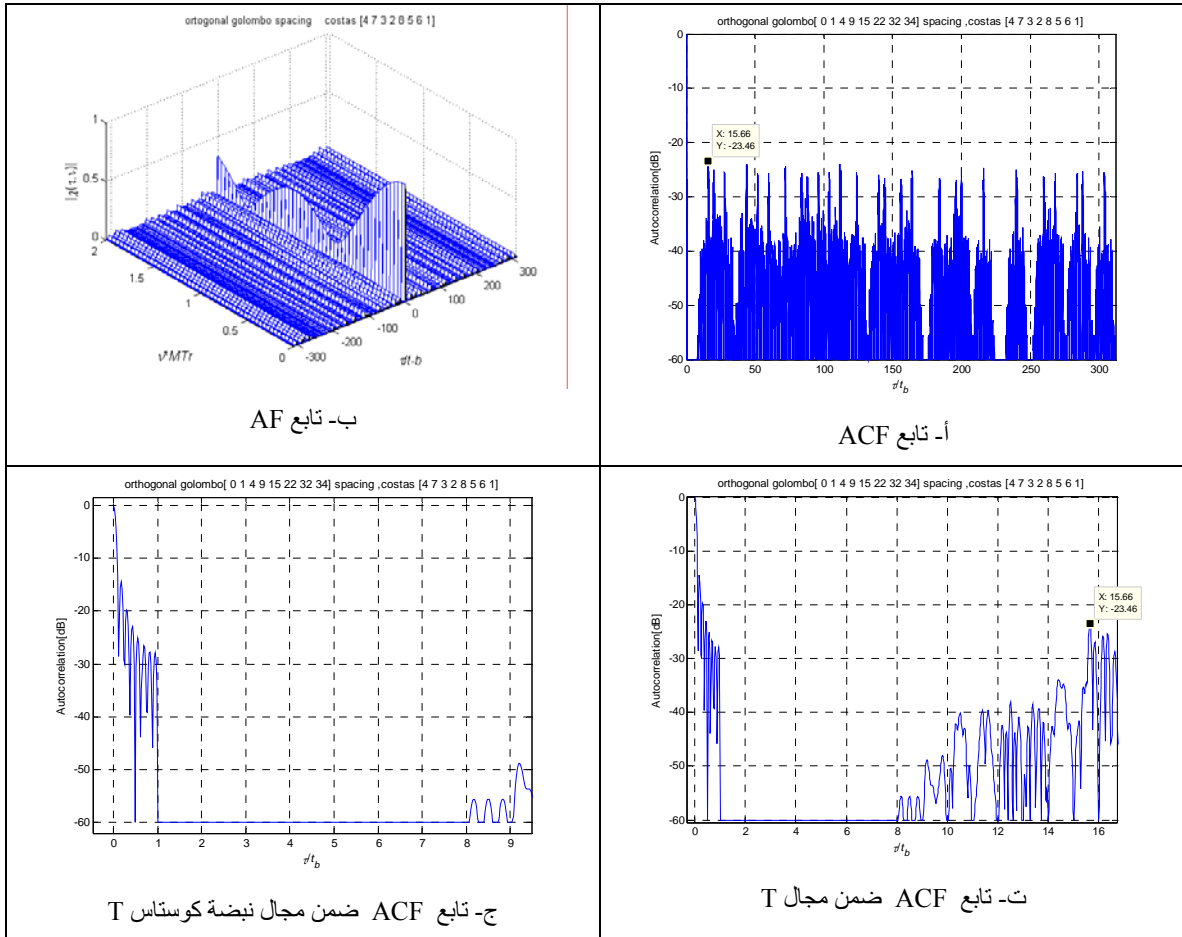
وبمقارنة تابع ACF وتابع AF لرشقة نبضات كوستاس المتعامدة ذات الفاصل الزمني المتغير وفق مصفوفة كوستاس ومسطرة غولومبو الأشكال (٩ و ١٠) وتابع ACF وتابع AF ورشقة من نبضات كوستاس المتعامدة ذات الفاصل الزمني الثابت بين النبضات الشكل (٨) نستنتج ما يلي:

- انخفاض مستوى الفصوص الجانبية المتكررة في تابع ACF لرشقة من نبضات كوستاس المتعامدة ذات الفاصل الزمني المتغير وفق كوستاس ليصبح الحد الأعلى لها تقريباً (-23dB) الشكل (٩-أ) مقارنة بتابع ACF لرشقة من نبضات كوستاس المتعامدة ذات الفاصل الزمني الثابت كحد أعلى (-15dB) الشكل (٨-أ)، وانخفاض مستوى الفصوص الجانبية المتكررة في تابع ACF لرشقة من نبضات كوستاس المتعامدة ذات الفاصل الزمني المتغير وفق مسطرة غولومبو إلى (-24dB) كحد أعلى الشكل (١٠-أ).
- دقة التمييز بالمدى للإشارتين متماثل  $T/M^2$ ، موافقة دقة التمييز لنبضات كوستاس.



الشكل (٩): تابع ACF لرشقة من نبضات كوستاس [4 7 3 2 8 5 6 1] المتعامدة ذات الفواصل الزمنية المتغيرة وفق مصفوفة كوستاس.

- إزالة الفصوص الجانبية القريبة من الفص الرئيسي ضمن المجال  $t_b \leq \tau \leq T$  متمائل في الإشارتين وموافق للمصفوفة الصفحية المتعامدة.
  - مستوى الفصوص الجانبية المتكررة ضمن المجال  $t_b$  لرشقة من نبضات كوستاس المتعامدة ذات الفواصل الزمنية الثابتة أو المتغيرة هو متمائل (الأشكال (٨-ج)، (٩-ج)، (١٠-ج)).
  - زيادة عرض المجال الطيفي لرشقة النبضات بمعدل  $M$  موافق لترميز كوستاس وفي تطبيقنا هو 8.
  - دقة التمييز الدوبلرية هي متساوية في رشقة نبضات كوستاس المتعامدة أو غير المتعامدة وتساوي  $1/MT_b$ .
  - نلاحظ من التابع AF الشكل (٩-ب) أن الفصوص الجانبية المتكررة على محور التأخير الزمني  $\tau$  منخفضة بشكل كبير ولكافة النقاط على محور التردد الدوبلري مقارنة بالفصوص الجانبية لتابع AF لرشقة نبضات كوستاس الشكل (٧-ب).
- نستنتج مما سبق أن تطبيق الفاصل الزمني المتغير كوستاس على رشقة من النبضات كوستاس المتعامدة يقلل من مستوى الفصوص الجانبية المتكررة لتابع ACF مع المحافظة على بقية الميزات (دقة التمييز بالمدى، دقة التمييز الدوبلرية، تصفير الفصوص الجانبية القريبة والطيف العريض).



الشكل (١٠): التابع ACF و AF لرشقة من نبضات كوستاس [4 7 3 2 8 5 6 1] المتعامدة ذات الفواصل الزمنية المتغيرة وفق مسطرة غولومبو.

يبين الجدول (1) مقارنة مستوى الفصوص الجانبية المتكررة و دقة التمييز بالمدى و مجال تصفير الفصوص الجانبية القريبة لتتابع ACF للإشارات السابقة وهي نبضات ذات تردد ثابت، نبضات ذات الترميز الصفحي المتعامدة، ونبضات كوستاس (بفواصل الزمنية الثابتة بين النبضات)، ونبضات كوستاس المتعامدة (ذات الفاصل الزمني الثابت و الفواصل الزمنية المتغيرة وفق مصفوفة كوستاس، ومسطرة غولومبو).

الجدول(1): مقارنة بين توابع ACF للإشارات التي تم دراستها سابقاً.

مجال تصفير الفصوص الجانبية القريبة	دقة التمييز بالمدى	أول صفر في تابع ACF	أعلى مستوى للفصوص الجانبية المتكررة	الفاصل الزمني بين النبضات	
-	$T=8tb$	8 tb	-1dB	ثابت	رشفة نبضات بتردد ثابت
$t_b \leq \tau \leq T$	$T/8=tb$	1 tb	-15dB	ثابت	رشفة نبضات بتردد ثابت متعامدة
-	$T/N2$	8 tb	-1dB	ثابت	رشفة نبضات كوستاس
$t_b \leq \tau \leq T$	$T/N2$	1 tb	-15dB	ثابت	رشفة نبضات كوستاس متعامدة
$t_b \leq \tau \leq T$	$T/N2$	1 tb	-23dB	متغير وفق مصفوفة كوستاس	رشفة نبضات كوستاس متعامدة
$t_b \leq \tau \leq T$	$T/N2$	1 tb	-24dB	متغير وفق مسطرة غولومبو	رشفة نبضات كوستاس متعامدة

## الخاتمة

بينت لنا الدراسة السابقة أنه يمكننا التوصل إلى إشارة رادارية لها تابع إعماء وتابع ترابط ذاتي قريبين من التتابع المثالية للإشارة الرادارية، وذلك بتطبيق تقنية المصفوفة المتعامدة مع خوارزمية كوستاس واستخدام الفواصل الزمنية المتغيرة. تم الحصول على ميزات هامة تجمع ميزات الخوارزميات المختلفة المنفذة، من حيث دقة التمييز بالمدى ودقة التمييز الدوبلرية بالإضافة إلى تخفيض مستوى الفصوص الجانبية.

إن زيادة دقة التمييز الدوبلرية تتم باستخدام نبضات عريضة أو باستخدام رشفة من النبضات الضيقة ضمن النبضة العريضة، أما لزيادة التمييزية بالمدى فإن إشارة كوستاس تستطيع تحقيق الدقة المطلوبة مع زيادة طيف الإشارة المرسله وبالتالي تكسب الإشارة مناعة للضجيج المقصود وغير المقصود. ولتبسيط المعالجة في كشف الأهداف فإن التعديل الصفحي المتعامد يعطي تمييزية عالية للهدف وذلك بتصفير الفصوص الجانبية القريبة من الفص الرئيسي، ولتقليل مستوى الفصوص الجانبية المتكررة الناتجة عن رشفة النبضات فإن تطبيق الفاصل الزمني المتغير يقلل مستوى الفصوص الجانبية بمقدار أقل أو يساوي (-23dB) .

## المراجع

- [1]. Costas, J. P., "A study of a class of detection waveforms having nearly ideal range-Doppler ambiguity properties", Proceedings of the IEEE, vol. 72, no. 8, August 1984, pp. 996-1009.
- [2]. Golomb, S. W., and H. Taylor, "Constructions and properties of Costas arrays", Proceedings of the IEEE, vol. 72, no. 9, September 1984, pp. 1143- 1163.
- [3]. Levanon, N., Mozeson, "Stepped frequency pulse train radar signal" IEE Proc. Sonar Navig., 2002, 149, (6) pp. 297-309.
- [4]. Levanon, N., Mozeson, E(2003) "Nullifying ACF grating lobe stepped-frequency train of LFM pulses". IEEE Transaction on Aerospace and Electronics Systems, Vol. 39, (2) (Apr.2003), pp. 694-703
- [5]. Levanon, N., Mozeson "Radar Signals" 2004
- [6]. Levanon, N., *Radar Principles*, Wiley, New York, 1988.
- [7]. T.D Bhatt, E.G. Rajan, P.V.D. Somasekhar Roa "Design of frequency-coded waveforms for target detection" IET Radar Sonar Navig., 2008, Vol. 2, NO. 5, pp. 388-394
- [8]. Levanon, N., Mozeson. "Modified Costas Signal" IEEE Transection on Aerospace and Electronic System. Vol. 40, NO. 3, JULY 2004.
- [9]. Khaola Kasas, Hassan Aboulmour, Osama Kawas, "Improving Costas Radar Signal By Applying Variable Time Spacing Using Costas Array And Golomb Ruler", 2010 مجلة العلوم الهندسية في جامعة دمشق
- [10]. Levanon, "Removing Autocorrelation Sidelobes by Overlaying Orthogonal Coding on any Train of Identical Pulses" IEEE Transection on Aerospace and Electronic System. Vol. 39, NO. 2, APRIL 2003
- [11]. Nadav Levanon , "Orthogonal Train of Modified Costas Pulses", IEEE Transection on Aerospace and Electronic System. Vol. 41, NO. 1, JANUARY 2005.



دراسة تأثير الفاصل الزمني المتغير على نبضات كوستاس المتعامدة<sup>1</sup>

*Studying the effect of variable time spacing on Orthogonal Costas  
Frequency Modulation Pulses.*

Khaola Kasas<sup>2</sup>

Dr. Hassan Aboulmour<sup>3</sup>

Dr. Osama Kawas<sup>4</sup>

**Abstract**

In recent studies the Orthogonal matrix are applied to form matrix of orthogonal phase coding, and applied this matrix on any coherent train of identical radar pulses to remove most of recurrent side-lobe of ACF near the main-lobes, and makes the recurrent lobes lower than in the coherent pulse train. In other report Costas array are used in frequency coding Radar signal to increase the delay resolution, and to decrease the recurrent side-lobe.

The present work shows the results of applying the two techniques at coherent pulse train with variable spacing between the pulses to achieve ACF with all the properties of the orthogonal phase coding and Costas Coding, and reduce the recurrent side-lobe less than the recurrent side-lobe of ACF of orthogonal phase coding or Costas frequency coding.

<sup>1</sup> For the paper in Arabic see pages( - ) .

<sup>2</sup> Department of Electronics and Communication Engineering- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering- Damascus University.

<sup>3</sup> Professor - Department of Electronics and Communication Engineering- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering- Damascus University.

<sup>4</sup> Professor - Department of Telecommunications- Higher Institute of Sciences and Technology – HIAST- Damascus.