دراسة تأثير الفاصل الزمني المتغير في نبضات كوستاس المتعامدة*

المهندسة خولة قصاص**

الأستاذ الدكتور حسن أبو النور*** الدكتور أسامة قواص****

الملخص

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

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

الكلمات المفتاحية: مصفوفة متعامدة تابع الترابط الذاتي تابع الاعماء إشارة كوستاس مصفوفة كوستاس مسطرة غولومبو تعديل ترددي خطي.

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

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

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

**** مدير بحوث في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا - دمشق.

مقدمة

إن الهدف الأساسي من تطوير الإشارات الرادارية هو تحسين دقة التمييز بالمدى ودقة التمييز الدوبلرية والحصول على مناعة عالية للضجيج، وذلك عن طريق دراسة تابع إعماء Ambiguity Function (AF) وتحسينه للوصول إلى نتائج قريبة من تابع الإعماء المثالي Thumbtack [1].

إن رادارات المدى البعيد تتطلب نبضات عريضة لزيادة المدى وهذا يؤدي إلى ضعف في دقة التمييز بالمدى، لذا بُدِئَ بتحسين دقة التمييز بالمدى باستخدام رشقة من النبضات الضيقة ضمن النبضة العريضة، ولكنها أدت إلى ظهور فصوص جانبية متكررة عالية المستوى في تابع الإعماء (AF)، مما ينتج التباساً في تحديد الأهداف (يقلل المناعة للضجيج) .

إن دقة التمييز بالمدى هي مقلوب عرض المجال الترددي للإشارة الرادارية، لذلك تم في عام 1948 زيادة عرض المجال الترددي للإشارة الرادارية النبضية بتطبيق تعديل ترددي خطي ضمن النبضة Linear Frequency Modulation (LFM) .

ومع صعوبة تنفيذ الأنظمة المعتمدة على إشارات LFM آنذاك، وتطور التكنولوجيا الرقمية ظهر نوع جديد من الإشارات الرادارية المعتمدة على ترميز الإشارات الرادارية صفحياً مثل Barker, Frank, P1, P2, Px, Complementary Pulses,…..

في عام 1984 [2,1] اقترح الباحث كوستاس ترميزاً ترددياً للإشارة الرادارية لتحسين دقة التمييز بالمدى وتقليل مستوى الفصوص الجانبية المتكررة في تابع AF مقارنة بالإشارات المولدة سابقاً سواء LFM أو المرمزة صفحياً.

في [10] تم إيجاد طريقة لتوليد رشقة من النبضات ذات ترميز صفحي متمم بالاعتماد على المصفوفة المتعامدة وذلك للاستفادة من ميزات تابع الإعماء للترميز الصفحي المتمم.

في [9] تم زيادة إمكانية كشف الأهداف الضعيفة دون التباس، وزيادة مناعة الإشارة الرادارية للضجيج المقصود وغير المقصود للإشارة الرادارية النبضية التي تستخدم رشقة من النبضات الضيقة. إذ عُدِّلَت تعديل الفواصل الزمنية بين النبضات الجزئية بحيث يقلل مستوى الفصوص الجانبية المتكررة في التابع AF لرشقة النبضات.

لا يوجد حتى الآن ترميز يحقق متطلبات الإشارة الرادارية جميعها من حيث دقة التمييز بالمدى ودقة التمييز الدوبلرية فضلاً عن مناعة عالية للضجيج لذلك سوف يتم في هذه المقالة مزج تقنيات الترميز السابقة ترميز كوستاس وترميز المصفوفة الصفحية المتعامدة فضلاً عن تطبيق الفواصل الزمنية المتغيرة، للوصول إلى إشارة رادارية تجمع ميزات تابع AF للطرائق الثلاث من غير أن تؤثر ميزات كل طريقة في ميزات الطريقة الأخرى، ومن ثمَّ الحصول على إشارة رادارية جديدة لها دقة تمييز عالية بالمدى تعادل دقة ترميز كوستاس ولها فصوص جانبية معدومة قريبة من الفص الرئيسي والتي تحققها طريقة الترميزات المتعامدة فضلاً عن فصوص جانبية متكررة ذات مستوى منخفض التي تحققها طريقة الفواصل الزمنية المتغيرة بين النبضات.

سيُشرَحُ في الفقرة I مبدأ المصفوفات المتعامدة ميزاتها، وطرائق توليدها، وفي الفقرة II ستُعطى 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 وذلك باستخدام التوابع الأساسية في تقييم الإشارات الرادارية وهي: تابع الإعماء AF[1] المعادلة(1) وتابع الترابط الذاتي ACF Auto Correlation Function المعادلة (2) وستشمل الدراسة ما يأتي:

- دراسة التابع ACF لرشقة من نبضات دون ترميز ولنبضات ذات ترميز صفحي متعامد بفواصل زمنية ثابتة.
- دراسة التابع AF والتابع ACF لرشقة من نبضات الترميز الترددي (كوستاس) ولرشقة من نبضات كوستاس المتعامدة (مطبق عليها ترميز كوستاس مع الترميز الصفحي المتعامد) ذات فواصل زمنية ثابتة.
- دراسة التابع AF والتابع ACF لرشقة من نبضات كوستاس المتعامدة مع إضافة فواصل زمنية مختلفة بين النبضات وفق طريقة مسطرة غولومبو ومصفوفة كوستاس.
- وأخيراً مقارنة نتائج الدراسة والخاتمة.

إن تابع الإعماء AF للإشارة $u(t)$ يعطى بالعلاقة:

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

وتابع الترابط الذاتي ACF للإشارة $u(t)$ هو تابع الإعماء عند مقطع دوبلري صفري $v=0$ ومن ثمَّ تابع ACF للإشارة $u(t)$ هو:

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

[1]يستخدم تابعAF وتابع ACF لقياس دقة التمييز بالمدى ودقة التمييز الدوبلرية، فضلاً عن إظهار مستوى الفصوص الجانبية التي تحدد أقل مستوى للإشارة الذي يمكن قياسه .

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

بُدئ باستخدام المجموعات المتممة في الترميز الصفحي للإشارات الرادارية لتحسين دقة التمييز بالمدى فضلاً عن الميزة الأساسية وهي أنه بتطبيق التابع ACF على الإشارة المشكلة من المجموعات المتممة نحصل على فصوص جانبية معدومة بالقرب من الفص الرئيسي وفصوص جانبية متكررة منخفضة المستوى نسبياً مقارنة بإشارة رادارية مؤلفة من رشقة من النبضات المتماثلة فضلاً عن ميزة زيادة عرض المجال الطيفي للإشارة، ولكن لم يتم الحصول على أكثر من ثلاث مجموعات صفحية متممة، سواء ثنائية الصفحة أو متعددة الصفحات. في [10,11] استُخدِمَتِ المصفوفات المتعامدة في الترميز الصفحي للإشارة الرادارية للحصول على مجموعات متممة كثيرة ومن ثمَّ الحصول على إشارة لها التابع ACF له ميزات المجموعات الصفحية المتممة نفسها فضلاً عن إمكانية الحصول على عدد غير محدد من المجموعات المتممة.

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

يمكن التحقق من أن المجموعات هي مجموعات متممة أو متعامدة بأخذ توابع الترابط الذاتي للمجموعات وجمعها حيث تكون جميع القيم الناتجة صفرية ما عدا القيم المركزية. مثال على ذلك ليكن لدينا المجموعتان [j -1 –j -1] ,[j -1 j 1] فإن تابع الترابط الذاتي لهما هو [j 0 j 4 –j 0 –j] [-j 0 –j 4 j 0 j]

ويكون مجموع تابعي الترابط للسلسلتين هو:[0 0 0 8 0 0 0].

إن إحدى الطرائق الأساسية في توليد المجموعات المتممة بالاعتماد على المصفوفات المتعامدة هي تركيبة PONS التي وجدت في عام 2002 والتي استطاع هذا الباحث بواسطتها توليد مصفوفات متعامدة بحجم كبير 4x4, 8x8, 16x16 [6, 12]، والطريقة البديلة في إيجاد مجموعات متممة بالاعتماد على المصفوفة المتعامدة هي مصفوفة Hadamard التي لها خواص التعامد، والتي نستطيع بواسطتها الحصول على ثماني مجموعات سلاسل متممة كل سلسلة من ثمانية 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 π والصفحة 0 على التوالي.

ومن ثمَّ فإن مجموعات السلاسل المتممة المولدة من مصفوفة Hadamard هي:

P1=[1 1 1 1 1 1 1 1], P2= 1 -1 1 -1 1 -1 1 -1],
P3=[1 1 -1 -1 1 1 -1 -1], P4= [1 -1 -1 1 1 -1 -1 1],

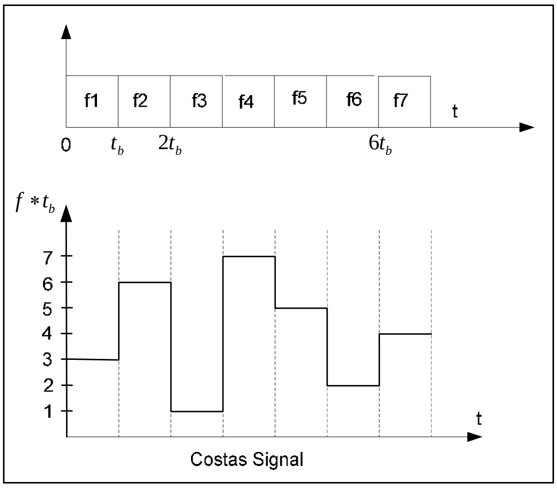
P5=[1 1 1 1 -1 -1 -1 -1], P6= [1 -1 1 -1 -1 1 -1 1],
P7=[1 1 -1 -1 -1 -1 1 1], P8= [1 -1 -1 1 -1 1 1 -1]

وسوف نستخدم هذه السلاسل في ترميز رشقة النبضات الرادارية.

II - *إشارة كوستاس*

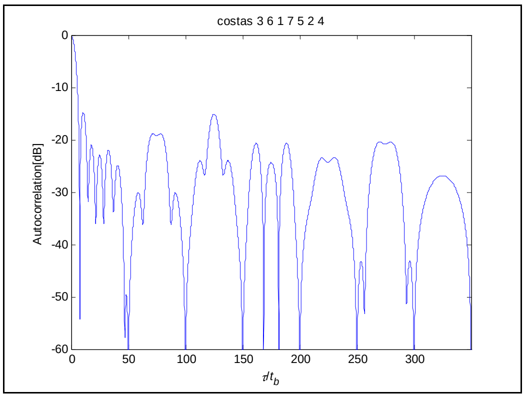
إشارة كوستاس هي إشارة رادارية نبضية ذات ترميز ترددي تعتمد على مصفوفة كوستاس الثنائية [1,2] وهي عبارة عن نبضات عريضة (بعرض T) تضم كل نبضة M نبضة جزئية، عرض النبضة الجزئية هو $t_b = T/M$، تعدل كل نبضة جزئية بتردد مختلف عن تردد النبضات الجزئية الأخرى ومن ثمَّ لدينا M تردداً كما هو مبيّن بالشكل(1-أ). يتم اختيار كل تردد من سلسلة من الترددات الفاصل الترددي بين النبضات الجزئية هو من مضاعفات $\Delta f = 1/t_b$ وقد وضع الباحث كوستاس شروطاً لترتيب الترددات في النبضة للتحكم بالفصوص الجانبية بحيث نحصل بتطبيق التابع AF على الإشارة على مستوى فصوص جانبية لا يزيد على $1/M$ من الفص الرئيسي، وتكون دقة التمييز بالمدى هي T/M^2 ومن ثمَّ معامل الضغط النبضي[2] هو M^2 ودقة التمييز الدوبلرية هي $1/T$.

يبيّن الشكل(1-ب) التابع ACF لإشارة كوستاس حيث الترددات موزعة وفق مصفوفة كوستاس [3 6 1 7 5 2 4] الشكل(1-أ). يمثل الرقم 3 في السلسلة التردد $3\Delta f$ والرقم 6 في السلسلة التردد $6\Delta f$ وهكذا.



الشكل(1-أ): ترددات نبضة كوستاس [3 6 1 7 5 2 4].[2]

[2] معامل الضغط النبضي Time x Bandwidth

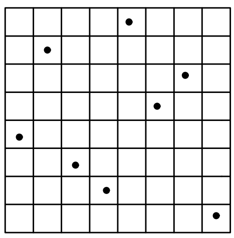


الشكل(1 -ب): ACF لنبضة كوستاس[4 2 5 7 1 6 3] .

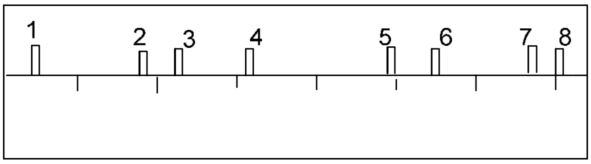
III - *الفواصل الزمنية المتغيرة Variable spacing*

إن توزيع رشقة من النبضات الجزئية ضمن نبضة إرسال رادارية بشكل غير منتظم تساعد على تناثر القدرة في الفصوص الجانبية المتكررة للتابع ACF لنبضة الإرسال عشوائياً بدلاً من تركيزه عند مضاعفات التردد التكراري للنبضات الجزئية في حال توزيعها بشكل منتظم، وأفضل الطرائق 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. يبيّن بالشكل (2) مصفوفة كوستاس النقطية [1 6 5 8 2 3 7 4] المستخدمة لتوليد الفواصل الزمنية المتغيرة والإشارة الناتجة.

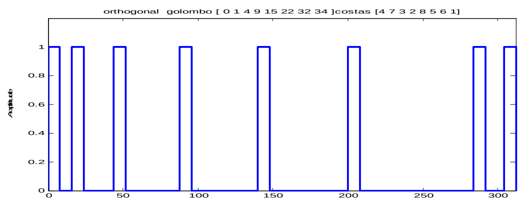


الشكل(2-أ):مصفوفة كوستاس [1 6 5 8 2 3 7 4]



الشكل (2 -ب): رشقة نبضات ذات فواصل زمنية متغيرة وفق مصفوفة كوستاس

ويمكن تطبيق مسطرة غولومبو في توزيع النبضات الجزئية للنبضة الرادارية. إن مسطرة غولومبو هي مسطرة يعتمد مبدأ القياس فيها على تقليل عدد مؤشرات القياس إلى الحد الأدنى في قياس جميع الأبعاد الجزئية التي تقيسها المسطرة فمثلاً: إذا كان لدينا مسطرة قياس من 1-34cm يمكن وضع مؤشرات عند النقاط [0 1 4 9 15 22 23 34] لقياس أي بعد من 1-34cm بدقة 1cm.



الشكل (3): إشارة ذات فاصل زمني متغير وفق مسطرة غولومبو

يبيّن الشكل(3) الإشارة الناتجة من تطبيق مسطرة غولومبو [34 32 22 15 9 4 1 0] ذات 8 مؤشرات على رشقة من ثماني نبضات، إذ يتم وضع نبضة عند كل مؤشر.

ستُطَبَّقُ في الفقرة التالية المبادئ السابقة على رشقة من 8 نبضات ودراسة مدى تأثير مزج المبادئ السابقة (المصفوفة المتعامدة والفواصل الزمنية المتغيرة وإشارة كوستاس) في مواصفات الإشارة الناتجة.

1- <u>دراسة رشقة من النبضات بدور ثابت دون ترميز وبترميز صفحي متعامد.</u>

ليكن لدينا رشقة من النبضات المتماثلة ذات فواصل زمنية ثابتة بعدد 8 وبتردد تكراري أكبر من ضعف

عرض النبضة $T_r > 2T$ (حيث T_r الدور التكراري للنبضات و T عرض النبضة) (الشكل(5)) يمكن كتابة معادلة الغلاف العقدي للإشارة بالعلاقة:

$$u_N(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^{N} u_1[t-(n-1)T_r] \qquad (3)$$

حيث

$$u_1(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} rect(\frac{t}{T}) \qquad (4)$$

إن تابع الإعماء للإشارة وفقاً للدراسة التي تمت عام 1988 المرجع [6] هو:

(5)

$$|x_N(\tau,\nu)| = \frac{1}{N} \sum_{p=-(N-1)}^{N-1} |x_1(\tau - pT_r, \nu)| \left| \frac{\sin[\pi\nu(N-|p|)T_r]}{\sin \pi\nu T_r} \right| \quad at \quad |\tau| \leq NT_r$$

$$|x_N(\tau,\nu)| = 0 \qquad .elsewhere$$

ومن أجل $|\tau| \leq T$ فإن معادلة تابع الإعماء تصبح

$$|x_N(\tau,\nu)| = \begin{cases} |x_1(\tau \ \ ,\nu)| \left| \dfrac{\sin[\pi\nu NT_r]}{N \sin \pi\nu T_r} \right|, \ldots\ldots |\tau| \leq t_p \\ zero \qquad\qquad .elsewhere \end{cases} \qquad (6)$$

حيث $|x_1(\tau,\nu)|$ تابع الإعماء لنبضة واحدة من نبضات الرشقة، ولمَّا كانت النبضات غير مرمزة فإن معادلة تابع الإعماء لها [6]هو:

$$|x_1(\tau,\nu)| = \left| (1 - \frac{|\tau|}{T}) \frac{\sin[\pi T(1-|\tau|/T)\nu]}{\pi T(1-|\tau|/T)\nu} \right| \qquad (7)$$

عند $|\tau| \leq T$

برسم التابع ACF للإشارة نرى أنه يتألف من فص رئيسي ومجموعة من الفصوص الجانبية المتكررة تتمركز عند مضاعفات الدور التكراري T_r، وأول صفر في التابع ACF هو عند الزمن $8t_b$ حيث $t_b = T/8$ فضلاً عن ذلك فإن مستوى الفصوص الجانبية المتكررة عالٍ هذا يؤدي إلى التباس في تحديد الأهداف ولا يمكن تطبيقه عملياً، أمَّا دقة التمييز بالمدى فهي نفسها دقة التمييز لنبضة واحدة. إن الهدف الوحيد من استخدام رشقة من النبضات هو تحسين دقة التمييز الدوبلرية التي تساوي $1/MT_r$. يبيّن الشكل(6) التابع ACF لرشقة من 8 نبضات بدور تكراري $T_r = 3T$ ولعدم حدوث تداخل في ACF. نضيف تعديلاً صفحياً متعامداً إلى النبضات السابقة وفق مصفوفة Hadamard (السلاسل الصفحية المبيّنة في الفقرة I) وهذا مبيّن في الشكل(7) 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. إن معادلة رشقة نبضات ذات تردد تكراري ثابت T_r تعطى بالعلاقة:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^{N} u_n[t-(n-1)T_r] \qquad (8)$$

ولمَّا كانت $u_n(t)$ هي نبضات غير متماثلة ذات ترميز صفحي متعامد فإن الغلاف العقدي $u_n(t)$ هو:

$$u_n(t) = \sum_{m=1}^{M} a_{n,m} s_m[t-(m-1)t_b \ ] \qquad (9)$$

بتعويض المعادلة (9) في المعادلة(8) فإن الغلاف العقدي لرشقة النبضات هو:

(10)

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

الغلاف العقدي للخانة $s_m(t)$ يعطى بالعلاقة:

(11)

$$s_m(t) = \begin{cases} \exp(j2\pi f_0 t), 0 \le t \le t_b,..for..all..m \\ 0 \qquad elsewhere \end{cases}$$

حيث $a_{n,m}$ الترميز الصفحي للعنصر في الخانة رقم m من النبضة رقم n في رشقة النبضات ($1 \le m \le M, 1 \le n \le N$) و T_r الدور التكراري للنبضات..

فإذا فرضنا أن زمن النبضة الواحدة $T = Mt_b = 8t_b$ والدور التكراري للنبضات $T_r = 3T = 24t_b$ فإن عرض رشقة النبضات للإشارة هو:

$$NT_r = 8T_r = 192t_b \, .$$

إن الإشارة الناتجة هي رشقة من نبضات غير متماثلة ومن ثمَّ لا توجد معادلة وحيدة تصف التابع ACF لها لذلك فقد رُسِمَ التابع ACF, AF للإشارة بالاعتماد على المعادلة الأساسية لتابع ACF, AF المعادلة (1 2).

من الشكل (8) يتبيّن أن تابع الترابط الذاتي لرشقة من النبضات المتعامدة يتمركز عند $\tau < t_b$ وعند مضاعفات التردد التكراري للنبضات

$$T_r = 24t_b \qquad 2T_r = 48t_b \qquad 3T_r = 72t_b$$

ومن ثمَّ يمكن كتابة تابع الترابط الذاتي لرشقة من النبضات غير المتماثلة بالعلاقة:

(12)

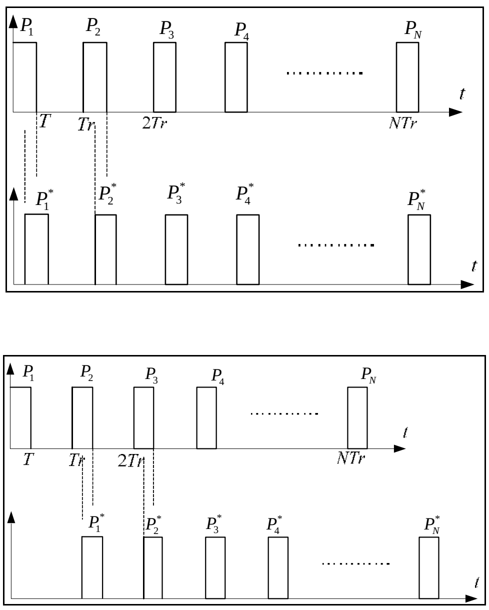
$$R(\tau) = \sum_{p=1}^{N} R_{u_p u_p}(\tau) + \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{p=n+1}^{N} R_{u_p u_{p-n}}(\tau - nT_r)$$

يمثل الجزء الأول للمعادلة (12) الفص الرئيسي للتابع ACF وهو مجموع الترابط الذاتي للنبضات المختلفة عند $\tau < T$ (يبيّن الشكل (4-أ) التطابق بين النبضات عند $\tau < T$)

ويمثل الجزء الثاني تابع ACF عند مضاعفات التردد التكراري T_r للنبضات وهو عبارة عن مجموع الترابط المتعارض بين النبضات المتعارضة عند الأدوار التكرارية للنبضات (يبيّن الشكل (4-ب) التطابق بين النبضات عند $\tau = T_r$)

وبالمقارنة بين التابع ACF لرشقة من النبضات غير المتعامدة الشكل(6)، والتابع ACF لرشقة من النبضات المتعامدة الشكل(8) نلاحظ ما يأتي:

- انخفاض عرض الفص الرئيسي من $8t_b$ إلى t_b وهو ناتج عن الخاصة التعامدية للنبضات، وتصفير قيمة التابع ضمن المجال $t_b \le \tau < T_r - T$.
- انخفاض مستوى الفصوص الجانبية المتكررة عند مضاعفات التردد التكراري للنبضات T_r بمقدار 15dB مقارنة بمستوى الفصوص الجانبية للنبضات المتماثلة وهو عائد للاختلاف بين النبضات.



-أ-

-ب-

الشكل (4): التطابق بين النبضات عند حساب ACF للإشارة: الشكل أ - يولد الفص الرئيسي لتابع ACF . الشكل ب - يولد الفص الجانبي المتكرر الأول في ACF للإشارة.

ومن ثمَّ باستخدام رشقة من النبضات 8 المرمزة بالترميز الصفحي المتعامد وفق مصفوفة Hadamard في الضغط النبضي يمكن الحصول على معامل ضغط نبضي 8 أي نسبة ضغط نبضي 1/8 من عرض النبضة T (التي يمثلها عرض الفص الرئيسي في التابع ACF) والحصول على قيمة صفرية في التابع ACF للإشارة ضمن المجال $t_b \le \tau \le T$.

وعلى الرغم من المواصفات التي حصلنا عليها في التابع ACF من التعديل الصفحي المتعامد للإشارة فما زالت الحاجة إلى زيادة دقة التمييز بالمدى وتحسين مناعتها للضجيج المقصود وغير المقصود موجودة عند $\tau > T$.

2- دراسة رشقة من نبضات كوستاس ورشقة من نبضات كوستاس المتعامدة.

لتكن لدينا إشارة رادارية نبضية مرمزة بمصفوفة كوستاس الترددية، الغلاف العقدي لإشارة كوستاس ذو تسلسل القفز الترددي $a_m = [a_1, a_2, ..., a_M]$, هو:

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{Mt_b}} \sum_{m=1}^{M} u_m[t-(m-1)t_b], \qquad (13)$$

حيث:

$$u_m(t) = \begin{cases} \exp(j2\pi f_m t), & 0 \le t \le t_b \\ 0 & elsewhere \end{cases} \qquad (14)$$

حيث

$$f_m = \frac{a_m}{t_b} \qquad (15)$$

t_b عرض النبضة الجزئية، $T = M * t_b$ عرض النبضة.

معادلة تابع الإعماء لإشارة كوستاس وفق الدراسة التي تمت في المرجع [1] يعطى بالعلاقة:

(16)

$$X(\tau,\nu) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} \exp(j2\pi n\nu t_b)\left\{\Phi_{nn}(\tau,\nu) + \sum_{\substack{m=0 \\ m\ne n}}^{N-1} \Phi_{nm}[\tau-(n-m)\tau,\nu]\right\}$$

حيث

$$\Phi_{nm}(\tau,\nu) = \begin{cases} (t_b - \frac{|\tau|}{t_b})\frac{\sin\alpha}{\alpha}\exp(-j\beta - j2\pi f_m\tau) \ , at|\tau| \le t_b \\ zero..............................else.where \end{cases}$$

$$\alpha = \pi(f_n - f_m - \nu)(t_b - |\tau|)$$

$$\beta = \pi(f_n - f_m - \nu)(t_b + \tau)$$

بتطبيق ترميز ترددي كترميز كوستاس[4 7 3 2 8 5 1] على رشقة من النبضات (N=8) كما هو مبيّن في الشكل (9) فإن الغلاف العقدي لرشقة من النبضات المتماثلة ذات دور تكراري T_r يعطى بالعلاقة (3) وفي هذه الحالة فإن $u_1(t)$ هي نبضة مرمزة ترددياً وفق كوستاس المعطاة في المعادلة (13) بفرض $u_1(t) = u(t)$

$$u_1(t) = \frac{1}{\sqrt{Mt_b}} \sum_{m=1}^{M} u_m[t-(m-1)t_b] \qquad (17)$$

ومن ثمَّ فإن الغلاف العقدي لرشقة نبضات كوستاس هو:

(18)

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{M*N*t_b}} \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{M} u_m[t-(m-1)t_b-(n-1)T_r] \ (18)$$

حيث

$$u_m(t) = \begin{cases} \exp(j2\pi f_m t), & 0 \le t \le t_b \\ 0 & elsewhere \end{cases} \qquad (19)$$

حيث M عدد الترددات في سلسلة كوستاس، N عدد النبضات في الرشقة T_r الدور التكراري للنبضات $u_m(t)$ هو الغلاف العقدي للخانة m للنبضة في المجال $((m-1)t_b \le t \le mt_b)$.

يمكن الحصول على معادلة تابع الإعماء لرشقة من نبضات كوستاس المتماثلة من علاقة تابع الإعماء لرشقة

من النبضات المتماثلة (5) وتبديل العلاقة $|x_1(\tau\ ,\nu)|$ بتابع الإعماء لنبضة كوستاس العلاقة (16) فنحصل على معادلة تابع الإعماء لرشقة من نبضات كوستاس المتماثلة.

برسم التابع ACF والتابع AF للإشارة الناتجة الشكل(10) نلاحظ أنه يتألف من فص رئيسي وفصوص جانبية متكررة، ودقة التمييز هي $1/M^2$ ومن ثمَّ تمكنا بتعديل النبضات بطريقة كوستاس من المحافظة على دقة التمييز لإشارة كوستاس أي معامل الضغط النبضي M^2 و تحسين دقة التمييز الدوبلرية $1/NT_r$ ولكن مازال مستوى الفصوص الجانبية المتكررة مرتفعاً كما هو الحال في رشقة النبضات المتماثلة غيرالمعدلة الشكل(6).

بإضافة التعديل الصفحي المتعامد Hadamard إلى رشقة نبضات كوستاس السابقة بحيث يكون الترميز الصفحي للنبضة الأولى موافقاً لفروق صفحات السطر الأول من مصفوفة Hadamard والترميز الصفحي للنبضة الثانية موافقاً لفروق صفحات السطر الثاني من مصفوفة Hadamard وهكذا كما هو مبيّن في الشكل (11). يمكن كتابة معادلة الغلاف العقدي لرشقة من نبضات كوستاس المتعامدة بالعلاقة:

$$g(t)=\frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{n=1}^{N}u_n[t-(n-1)T_r] \qquad (20)$$

حيث N عدد نبضات الرشقة و $u_n(t)$ هي

$$u_n(t)=\sum_{m=1}^{M}a_{n,m}s_m[t-(m-1)t_b\ ] \qquad (21)$$

تمثل s_m الغلاف العقدي للنبضة الجزئية t_b و M عدد الترددات في سلسلة كوستاس، و$a_{n,m}$ الترميز الصفحي للعنصر في الخانة رقم m من النبضة رقم n في رشقة النبضات $(\ 1\le m\le M, 1\le p\le P\ )$ و T_r الدور التكراري للنبضات، ومن ثمَّ تصبح معادلة الغلاف العقدي لرشقة النبضات هي:

$$g(t)=\frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{n=1}^{N}\ \sum_{m=1}^{M}a_{n,m}s_m[t-(m-1)t_b-(n-1)T_r] \qquad (22)$$

حيث

$$s_m(t)=\begin{cases}\exp(j2\pi f_m t), 0\le t\le t_b\,,\\ \quad 0 \qquad elsewhere\end{cases} \qquad (23)$$

إن سلسلة الترددات هي:

$$f_m\ =\frac{a_m}{t_b} \qquad (24)$$

$$a_m=[a_1,a_2,...,a_M],$$

حيث $s_m(t)$ هو الغلاف العقدي للخانة m للنبضة في المجال $((m-1)t_b\le t\le mt_b)$.

أمَّا بالنسبة إلى معادلة ACF فلا توجد معادلة وحيدة تصف التابع ACF لرشقة من النبضات غير المتماثلة لذلك فقد رُسِمَ التابع ACF و AF للإشارة بالاعتماد على المعادلة الأساسية للتابع ACF, AF. وبالمقارنة بين التابع ACF والتابع AF لرشقة من نبضات كوستاس المتعامدة ذات الفواصل الزمنية الثابتة الشكل(12) مع التابع ACF والتابع AF لرشقة نبضات كوستاس المتماثلة ذات الفواصل الزمنية الثابتة الشكل(10) نلاحظ مايأتي:

- إن الفصوص الجانبية القريبة من الفص الرئيسي في التابع ACF لنبضات كوستاس المتماثلة هي ضمن المجال $8t_b$ (الشكل 10 -جــ) أمَّا الفصوص الجانبية القريبة من الفص الرئيسي في التابع ACF لنبضات كوستاس المتعامدة فهي ضمن المجال t_b (الشكل 12 -جــ).

- الفصوص الجانبية ضمن المجال $t_b\le\tau\le T$ تكون معدومة مع المحافظة على دقة التمييز لإشارة كوستاس T/M^2 أي t_b/M .

- انخفاض مستوى الفصوص الجانبية المتكررة في التابع ACF لإشارة كوستاس المتعامدة (الشكل 12 -أ) مقارنة بالفصوص الجانبية المتكررة في التابع ACF لرشقة نبضات كوستاس غير المتعامدة (الشكل 10 -أ) بحوالي (15dB) .

- زيادة عرض المجال الطيفي لرشقة النبضات بمعدل M موافق لترميز كوستاس وفي تطبيقنا هو 8.

- دقة التمييز الدوبلرية متساوية في رشقة نبضات كوستاس المتعامدة أوغير المتعامدة وتساوي $1/MT_r$.

نلاحظ من التابع AF الشكل (12- ب) أن الفصوص الجانبية على محور التأخير الزمني τ منخفضة بشكل كبير وللنقاط كلّها على محور التردد الدوبلري مقارنة بالفصوص الجانبية للتابع AF لرشقة نبضات كوستاس الشكل (10 -ب).

من الشكل (12) يتبيّن أن تابع الترابط الذاتي لرشقة من نبضات كوستاس المتعامدة يتمركز عند $\tau < t_b$ وعند مضاعفات التردد التكراري للنبضات

$$T_r = 24t_b \quad 2T_r = 48t_b \quad 3T_r = 72t_b ,..$$

ومن ثمَّ يمكن كتابة تابع الترابط الذاتي لرشقة من نبضات كوستاس المتعامدة بشكل مشابه لعلاقة تابع الترابط الذاتي لرشقة من النبضات المتعامدة وهي:

$$R(\tau) = \sum_{p=1}^{N} R_{u_p u_p}(\tau) + \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{p=n+1}^{N} R_{u_p u_{p-n}}(\tau - nT_r) \qquad (25)$$

يمثل الجزء الأول للمعادلة (25) الفص الرئيسي لتابع ACF وهو مجموع الترابط الذاتي لنبضات كوستاس المختلفة عند $\tau < T$.

ويمثل الجزء الثاني التابع ACF للإشارة عند مضاعفات التردد التكراري T_r للنبضات وهو عبارة عن مجموع الترابط المتعارض بين نبضات كوستاس المتعارضة عند الأدوار التكرارية للنبضات.

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

3- <u>دراسة رشقة من نبضات كوستاس المتعامدة ذات الفواصل الزمنية المتغيرة.</u>

على الرغم من ميزات التابع ACF التي حصلنا عليها في الفقرة السابقة فما زالت الفصوص الجانبية المتكررة ذات مستوى عالٍ نسبياً مما يؤدي إلى عدم كشف الأهداف الضعيفة، لذلك سنحاول إضافة تعديل إلى 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 في مستوى الفصوص الجانبية وذلك وفقاً لطريقتين:

الطريقة الأولى: وُزِّعَتِ النبضات وفق مصفوفة كوستاس النقطية [1 6 5 8 2 3 7 4] المبيّنة في الشكل(2) ورسم التابع ACF والتابع AF للإشارة الناتجة الشكل(13).

الطريقة الثانية: وُزِّعَتِ النبضات وفق مسطرة غولومبو [34 32 22 15 9 4 1 0] المبيّنة في الشكل(3) ورسم التابع AF والتابع ACF للإشارة الناتجة الشكل(14).

يمكن كتابة معادلة الغلاف العقدي لرشقة من نبضات كوستاس المتعامدة ذات الفواصل الزمنية المتغيرة بالعلاقة:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^{N} u_n (t - T_n), \qquad (26)$$

ويتحدد بعد النبضات عن النبضة الأولى بالسلسلة T_n وفقاً لطريقة توزيع النبضات (مصفوفة كوستاس، مسطرة غولومبو).

$$T_n = [T_1, T_2, ..., T_N], \qquad T_1 = 0 \qquad (27)$$

حيث $u_n(t)$ هي النبضة.

$$u_n(t) = \sum_{m=1}^{M} a_{n,m} s_m [t - (m-1)t_b \ ] \qquad (28)$$

وحيث

$$s_m(t) = \begin{cases} \exp(j2\pi f_m t), 0 \le t \le t_b, \\ 0 \qquad elsewhere \end{cases} \qquad (29)$$

إن سلسلة الترددات هي:

$$a_m = [a_1, a_2, ..., a_M], \quad f_m = \frac{a_m}{t_b}, \qquad (30)$$

ولرسم التابع ACF للإشارة الناتجة نلاحظ أن الإشارة الناتجة هي رشقة من النبضات غير المتماثلة والفاصل الزمني بين النبضات غير متساوي، ومن ثمَّ لا يمكن تطبيق علاقات تابع الترابط الذاتي للإشارات السابقة على هذه الإشارة لذلك رُسِمَ التابع AF, ACF للإشارة بالاعتماد على المعادلة الأساسية للتابع ACF, AF.

وبمقارنة التابع ACF والتابع AF لرشقة نبضات كوستاس المتعامدة ذات الفاصل الزمني المتغير وفق مصفوفة كوستاس ومسطرة غولومبو الأشكال (13و14) مع توابع الإعماء للإشارات السابقة نستنتج ما يأتي:

- نلاحظ أن الفصوص الجانبية المتكررة أصبحت موزعة على كامل ACF في المجال $\tau > T$ سواء باستخدام الفاصل الزمني المتغير كوستاس أو مسطرة غولومبو، مع انخفاض مستوى هذه الفصوص ليصبح الحد الأعلى له 23dB- تقريباً باستخدام الفاصل الزمني المتغير كوستاس الشكل(13-أ) و 24dB- كحد أعلى باستخدام مسطرة غولومبو الشكل(14-أ) مقارنة بمستوى الفصوص الجانبية للإشارات السابقة الأشكال (6،8،10،12)

- المحافظة على أفضل دقة حصلنا عليها سابقاً وهي دقة التمييز لإشارة كوستاس ومن ثمَّ معامل الضغط النبضي يساوي M^2.

- المحافظة على إزالة الفصوص الجانبية القريبة من الفص الرئيسي ضمن المجال $t_b \le \tau \le T$ في الإشارتين والموافق للمصفوفة الصفحية المتعامدة.

- 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 أوغير المتعامدة وتساوي $1/MT_r$.

نستنتج مما سبق أن تطبيق الفاصل الزمني المتغير على رشقة من نبضات 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).

يبيّن الجدول (1) مقارنة مستوى الفصوص الجانبية المتكررة ودقة التمييز بالمدى ومجال تصفير الفصوص الجانبية القريبة من الفص الرئيسي لتوابع ACF للإشارات السابقة وهي نبضات ذات تردد ثابت، نبضات ذات الترميز الصفحي، ونبضات كوستاس (بفواصد الزمنية الثابتة بين النبضات) ونبضات كوستاس المتعامدة (ذات الفاصل الزمني الثابت والفواصل الزمنية المتغيرة وفق مصفوفة كوستاس، ومسطرة غولومبو).

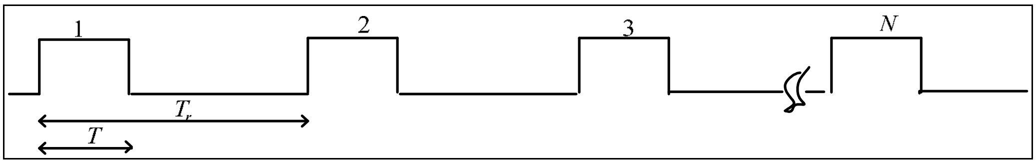
الخاتمة

بيّنت لنا الدراسة السابقة أنه يمكننا التوصل إلى إشارة رادارية لها تابع إعماء وتابع ترابط ذاتي جيد مقارنة بالتوابع المثالية للإشارة الرادارية، وذلك بتطبيق تقنية المصفوفة المتعامدة مع خوارزمية كوستاس واستخدام الفواصل الزمنية المتغيرة. تم الحصول على ميزات مهمة تجمع ميزات الخوارزميات المختلفة المنفذة، من حيث دقة التمييز بالمدى ودقة التمييز الدوبلرية فضلاً عن تخفيض مستوى الفصوص الجانبية دون أن تؤثر الميزات التي تعطيها خوارزمية في ميزات الخوارزميات الأخرى.

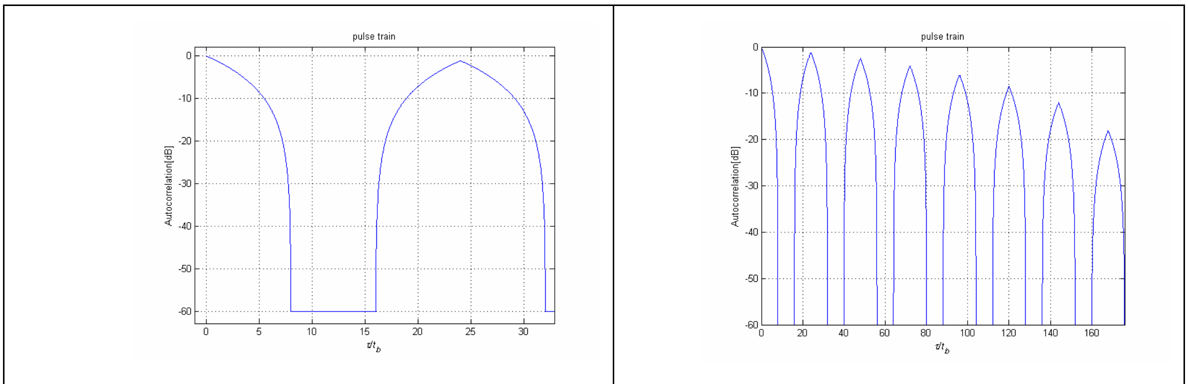
إن زيادة دقة التمييز الدوبلرية تتم باستخدام نبضات عريضة أو باستخدام رشقة من النبضات الضيقة ضمن النبضة العريضة أمَّا لزيادة التمييز بالمدى فإن إشارة كوستاس تستطيع تحقيق الدقة المطلوبة مع زيادة طيف الإشارة المرسلة، ومن ثمَّ تكسب الإشارة مناعة للضجيج المقصود وغير المقصود. ولتبسيط المعالجة في كشف الأهداف فإن التعديل الصفحي المتعامد يعطي دقة تمييز عالية للهدف وذلك بتصفير الفصوص الجانبية القريبة من الفص الرئيسي، ولتقليل مستوى الفصوص الجانبية المتكررة الناتجة عن رشقة النبضات فإن تطبيق الفاصل الزمني المتغير يقلل من مسد توى الفصوص الجانبية بمق دار أقل أو يساوي (23dB-). فضلاً عمَّا سبق فإن هذه الإشارة تكتسب مناعة عالية ضد أنظمة التشويش الإيجابي نظراً إلى صعوبة الكشف والتعرف إلى الإشارات المرسلة والمتغيرة في التردد والزمن.

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

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



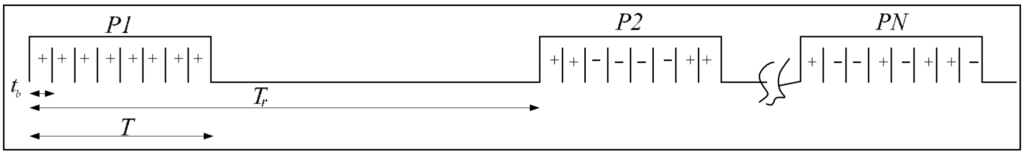
الشكل (5): رشقة من نبضات متماثلة غير معدلة



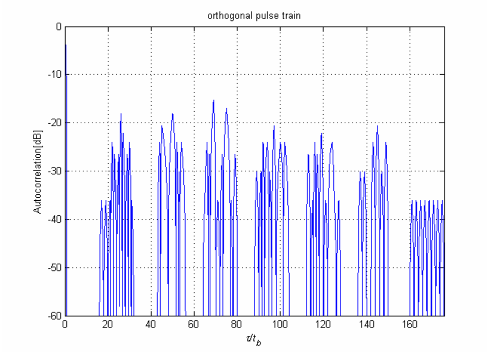
ب - التابع ACF ضمن مجال الدور التكراري Tr .

أ - التابع ACF

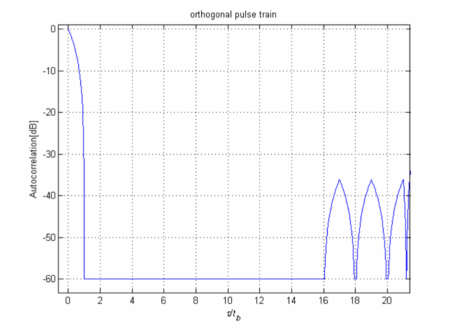
الشكل(6): التابع ACF لرشقة من النبضات (ثماني نبضات) ذات فاصل زمني ثابت بين النبضات.



الشكل(7): الترميز الصفحي المتعامد (exp(jo) = 1 تمثل بالإشارة (+) و (exp(jπ) = -1) تمثل بالإشارة (-)) .

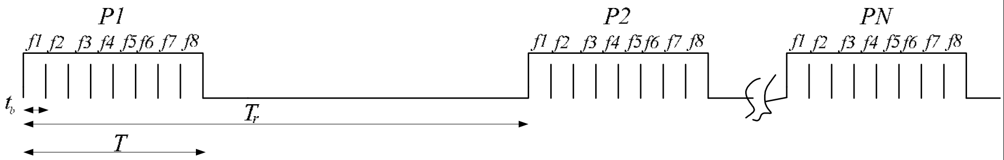


أ - التابع ACF.

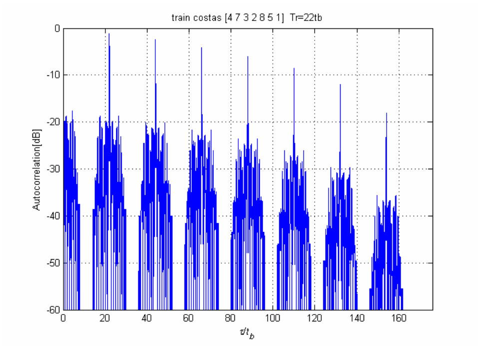


ب - التابع ACF ضمن مجال الدور التكراري Tr .

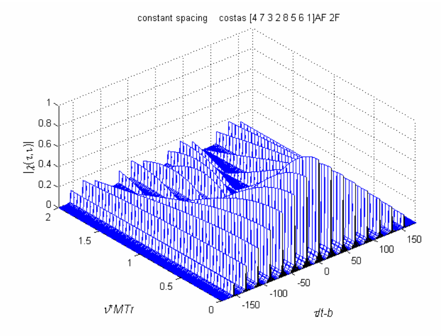
الشكل(8): التابع ACF لرشقة من النبضات المتعامدة (ثماني نبضات) ذات فاصل زمني ثابت



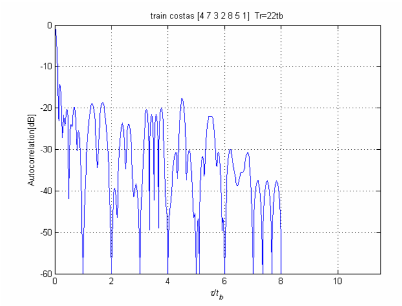
الشكل (9): رشقة من نبضات كوستاس المتماثلة. ذات تردد تكراري ثابت



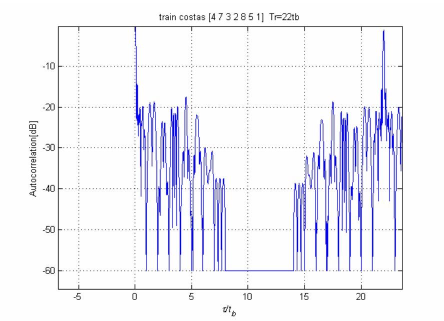
أ - التابع ACF



ب - التابع AF

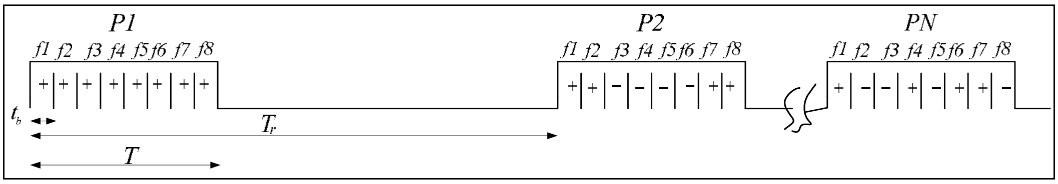


ج - التابع ACF ضمن مجال عرض النبضة T

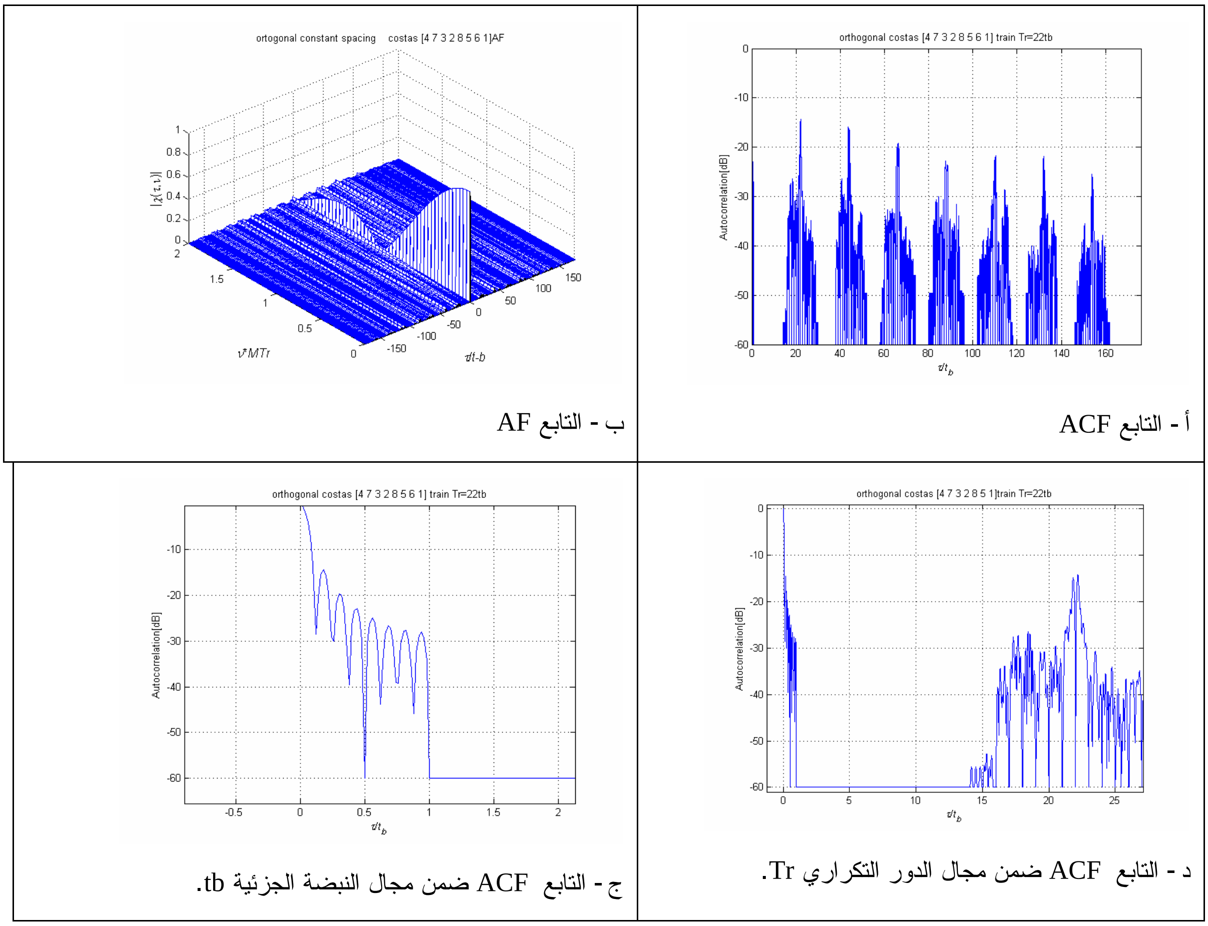


د - التابع ACF ضمن مجال الدور التكراري Tr

الشكل(10): التابع ACF و AF لرشقة من نبضات كوستاس[4 7 3 2 8 5 6 1] ذات فاصل زمني ثابت بين النبضات.



الشكل (11): رشقة من نبضات كوستاس المتعامدة ذات تردد تكراري ثابت



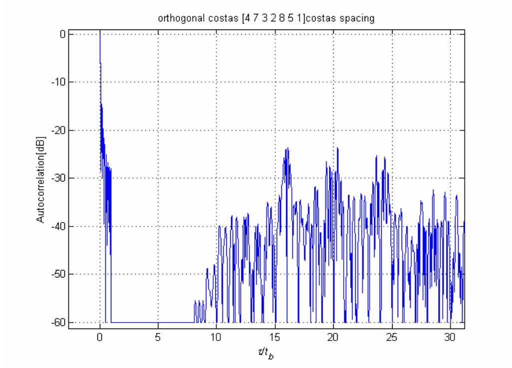
أ - التابع ACF

ب - التابع AF

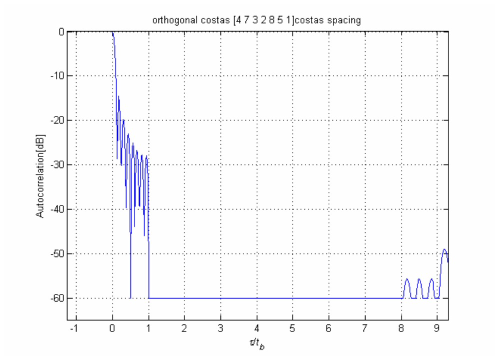
ج - التابع ACF ضمن مجال النبضة الجزئية tb.

د - التابع ACF ضمن مجال الدور التكراري Tr.

الشكل(12): التابع ACF لرشقة من نبضات كوستاس [4 7 3 2 8 5 6 1] المتعامدة ذات فاصل زمني ثابت بين النبضات

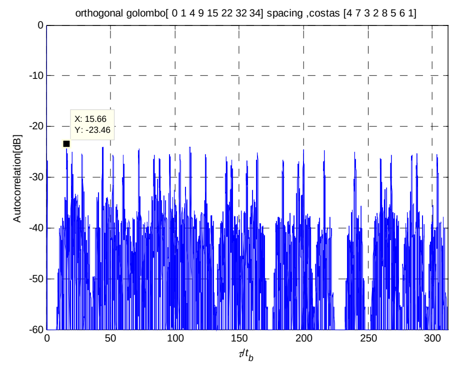


د - التابع ACF ضمن مجال Tr.

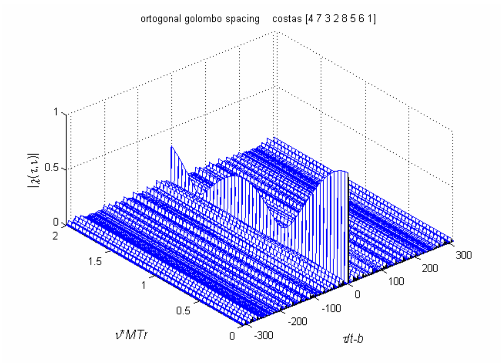


ج - التابع ACF ضمن مجال نبضة كوستاس T

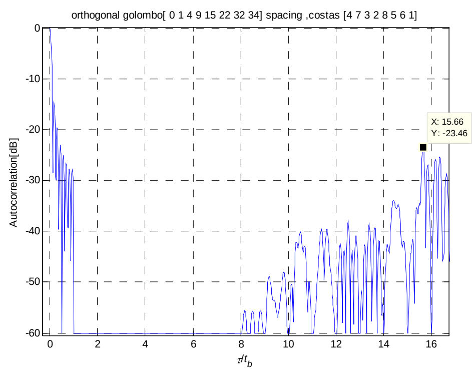
الشكل(13): التابع ACF لرشقة من نبضات كوستاس [1 6 5 8 2 3 7 4]المتعامدة ذات الفواصل الزمنية المتغيرة وفق مصفوفة كوستاس.



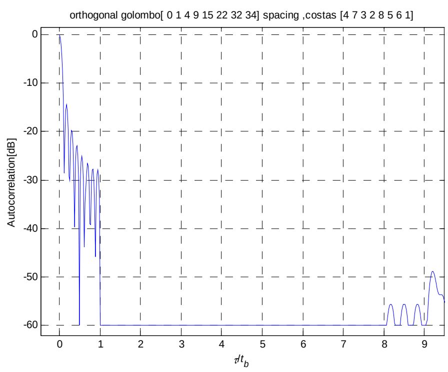
أ - التابع ACF



ب - التابع AF



ت - التابع ACF ضمن مجال T



ج - التابع ACF ضمن مجال نبضة كوستاس T

الشكل(14): التابع ACF و AF لرشقة من نبضات كوستاس[1 6 5 8 2 3 7 4] المتعامدة ذات الفواصل الزمنية المتغيرة وفق مسطرة غولومب

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 Prirzciples, 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 Aboulnour, 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]. Zulch, P., M. Wicks, B. Moran, and J. Byrens, „A new Complementary waveform technique for radar signals." Proceedings of IEEE 2002 International Radar Conference, Long Beach, CA April 22-25, 2002, PP35-40

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2010/8/30