

التتبع الصوتي لاكتشاف الأحداث في شبكات الحساسات اللاسلكية باستخدام بنك المرشحات وفقاً لمخطط الإشارة البياني

د. حسن البستاني*

د. نغمى يونس**

(تاريخ الإيداع 11/ 5/ 2021 . قُبِلَ للنشر في 7/ 12/ 2021)

□ ملخص □

تعد عملية التحليل الطيفي للإشارة الرقمية عموماً من الأدوات الرياضية التي تساعد في اكتشاف وتشخيص هوية الأحداث، حيث يكون من المتاح استخدام ذلك من أجل تطبيقات التتبع الصوتي في شبكات الحساسات اللاسلكية التي تعد بمثابة إحدى القضايا البحثية الجديرة بالاهتمام، تم هنا تقديم أحد الحلول التطبيقية لما تعانيه شبكات الحساسات اللاسلكية المنشورة في البيئة الخارجية من تداخلات الضجيج التي تؤثر سلباً على وثوقية إشارة المصدر الصوتية والتي تكون بمثابة الهدف لتطبيقات التتبع في WSN. تم استخدام بنك المرشحات وفقاً لمخطط الإشارة البياني بهدف تشخيص واكتشاف الأحداث الصوتية مع وجود تداخل لقيم الضجيج المختلفة دون أن تنتقد بواقع وجود قيماً منتظمة لعينات إشارة المصدر المفترضة، مع تطبيق التحليل الطيفي للإشارة المستقبلية وفقاً لمخطط الإشارة البياني في مرحلة التحليل، وتقييم الاستعادة التقريبية للإشارة المصدر من الشبكة ككل باستخدام بنك المرشحات للتركيب.

كلمات مفتاحية: الإشارة الصوتية، معالجة الإشارة وفق مخطط الإشارة البياني، بنك المرشحات وفق مخطط الإشارة البياني، شبكات الحساسات اللاسلكية، الترشيح وفق مخطط الإشارة البياني، تحويل فوريير وفق مخطط الإشارة البياني.

*- مدرس في كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات قسم هندسة النظم الحاسوبية والالكترونية - جامعة طرطوس.

**-عضو هيئة فنية/ مشرف على الأعمال/، في كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات قسم هندسة النظم الحاسوبية والالكترونية -

Acoustic Tracing for Event Detection in Wireless Sensor Network using Graph Signal Processing Filter Bank

Dr. Eng. Hasan Albustani*

Dr. Eng. Noama Younes**

(Received 11/ 5/ 2021 . Accepted 7 / 12 / 2021)

□ ABSTRACT □

Generally, the spectral analyses of digital signal is from math tools that helps in detecting and diagnosing events identity. Such that it is available to take advantage it for acoustic tracking applications in wireless sensor networks which account as one of important research issues. It has been presented here one of the practical solutions for what spread wireless sensor networks suffer in urban environments from different interferences, which degrade confidence of the source acoustic signal which account to as target for tracking applications in WSN.

In this research, we have used graph signal processing filterbank in order to diagnose and detect acoustic events with on siding different values of interference without be restricted by uniform samples of proposed signal, and implementing spectral analyses of GSP received signal in analyses stag in addition to reconstruct approximately the data signal using synthesis filter bank.

Keywords: Acoustic signal, Graph Signal Processing, GSP Filter Bank, Wireless Sensor Network, Graph Signal Processing Filtering, Graph Signal Processing Fourier Transform.

*- Assistant Pro. In ICTE Faculty- CESE Department – Tartous University.

**-Technical Member. In ICTE Faculty- CESE Department – Tartous University.

1. مقدمة نظرية

تتألف شبكة الحساسات اللاسلكية من مجموعة من العقد اللاسلكية. يتكون كل منها من ثلاث منظومات فرعية تتمثل بالاتصال والمعالجة والتحسس. يتم نشر عقد الحساسات اللاسلكية في مناطق شاسعة وتتواصل لاسلكياً بهدف انجاز وظيفة محددة مسبقاً [1]. مع تزايد استخدام الميكروفونات الصوتية في تطبيقات التتبع والمراقبة، فإن اكتشاف وتتبع المصادر الصوتية في بيئة النشر العملية قد انبثق كمشكلة بحثية هامة [2].

يعد اكتشاف الحدث الصوتي من المجالات البحثية المهمة حالياً لارتباطه بعدة مجالات أخرى كالتعرف على النمط وتعلم الآلة والذكاء الصناعي ومعالجة الإشارة الرقمية.

يشير مصطلح اكتشاف الحدث الصوتي إلى تصنيف صوت محدد يكون مرتبطاً بمهمة محددة، عادة ما يكون من الصعب توقع زمن ومكان حدوثه، ويهدف الإشارة إلى أهمية المجال المدروس أعتمد مثلاً عن اكتشاف الأحداث الصوتية ضمن إطار التطبيقات الأمنية فإذا تم التركيز على أصوات التفجيرات أو صوت انكسار كأس زجاجي التي تعد كأصوات أرضية تشير إلى حدث غير اعتيادي بالنسبة للتطبيق.

في الحالة الطبيعية فإن الأصوات هذه لا تحدث، ولكن عندما تحدث فإنها تشير إلى نشاط إجرامي ما. يعمل نظام التتبع أو النظام الأمني الذكي وفق أوامر محددة ولا يكون متأثراً أو محدوداً بعوامل مختلفة كالإنسان، إنه يعمل بشكل مستقل ويقوم فقط بتوليد تنبيهاً عند اكتشاف حادثة خطيرة، كما يتوجب عليه أن يزود دعماً مستمراً للمركز الأمني، وبناء عليه يغدو اكتشاف الأحداث الصوتية كمهمة جزئية من عمل النظام الأمني المعقد [3,4].

من الطرق المستخدمة مسبقاً من أجل استخلاص خصائص الإشارة الصوتية ضمن إطار معالجة الإشارة الرقمية منتظمة العينة (DSP) نذكر هنا Mel-frequency cepstral coefficients (MFCC) والخصائص الطيفية الفعالة مثل معاملات Mel-filter bank اللوغاريتمية (FBANK)، ومعاملات Mel-filter bank (MELSPEC) التي تستخلص من إشارة الدخل الصوتية [4].

يكون بمقدور العقد في شبكات الحساسات أن ترسل الرسائل إلى جيرانها ضمن مجال الاتصال المتاح لها فقط (لكن معظمها لا يكون بمقدوره التواصل بشكل مباشر مع مركز المعالجة في حالة الشبكة متعددة القفزات). يكون ذلك من جانب الشبكة في حين تركز المعالجة الموزعة للإشارة الرقمية على تحصيل الخصائص البسيطة للإشارة المصدر (متوسط المجموع، تقييم عام للبارامترات) [1].

تم التركيز ضمن إطار البحث المقترح على إيجاد التحليل الطيفي بطريقة موزعة بهدف تشخيص هوية الأصوات المكتشفة، فكل عقدة وفق هذا النمط تمتلك مهمة خاصة بها تماثل وظيفة إزالة الضجيج الموزع (Distributed De noising) على سبيل الذكر.

في شبكات الحساسات اللاسلكية المكونة من N عقدة حساس، فإن الإشارة المكونة من N عينة والتي تكون متداخلة مع الضجيج في بيئة النشر الفعلية حيث يقابل كل عنصر منها القيمة المتحسسة عند كل موضع عقدة تحسس، وبناء على المعطيات السابقة يكون الإشارة التي تم إزالة الضجيج منها ستكون محدودة الحزمة، فإنه وفقاً لبنية مخطط الإشارة البياني الموزون تتمثل مهمة عقد الحساسات بإزالة الضجيج من محتوى عينة الإشارة وذلك بالتمرير المتكرر للرسائل إلى الجيران المحليين من العقد وإنجاز الحساب المطلوب.

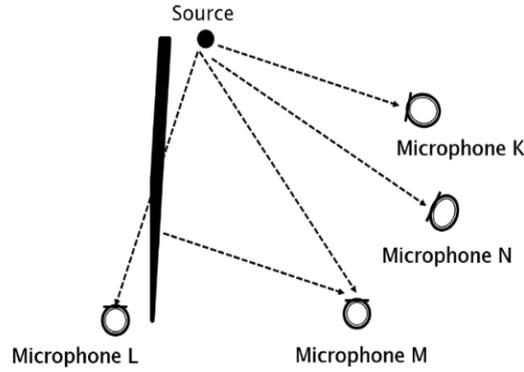
يتم معالجة المعطيات وفقاً لنمط الإشارة الموزعة بشكل مستقل فيزيائياً على مستوى العقد اللاسلكية ولا يتم إرسالها إلى مركز المعالجة الأساسي (Sink) في الشبكة بسبب محدودية مجال الاتصال لعقد الحساسات اللاسلكية بالدرجة

الأولى ومخاوف الخصوصية ثانياً، أيضاً من أجل اعتبارات تصميمية أخرى، وعلى الرغم من إمكانية معالجة الكميات الكبيرة من المعطيات بشكل مركزي فإنه سيكون من الأفضل معالجتها وفق منهج الحساب التفرعي بهدف تحقيق التعادل بين مستوى الأداء وحزمة الاتصال وتعقيد الحساب [5,6].

لقد أصبحت أنظمة التتبع كأحد التطبيقات الأساسية في شبكات الحساسات اللاسلكية. إن تحليل الإشارة الصوتية يعد متمماً للأنظمة القائمة على الفيديو التي تعاني من عوائق عدة كالانسداد بشكل أساسي. وبناء عليه يعد التحليل الناجح للإشارة الصوتية حلاً يمكن دمجها مع حلول الفيديو أو حتى يمكن استخدامه بمفرده، تتمثل المهام المرتبطة بتحليل الإشارة الصوتية لاكتشاف الأحداث غير الطبيعية (إطلاق نار أو تفجيرات) وتصنيفها إضافة إلى تحديد موضع المصدر وتتبعه [7,8].

من المشاكل التي يمكن أن تواجه نظام تحليل الإشارة الصوتية هو تواجد كمية كبيرة من الضجيج الخلفي المتزامن (Synchronization Background noise) الغير مستقر والتباعد المكاني الشديد بين الأحداث الصوتية المحدثة التي قد تكون كأحد الأهداف الهامة للتطبيق.

تم هنا معالجة آلية التحليل الطيفي للإشارة الصوتية وفق منحنى الإشارة البياني مع وجود تداخل للضجيج كحاكاة للبيئة الواقعية، كما يوضح الشكل (1) التصور النظري لتطبيق التتبع.



الشكل(1): مخطط توزيع العقد في تطبيق التتبع الصوتي

لقد قيمت العديد من الدراسات السابقة أنظمة اكتشاف الأحداث في تطبيقات التتبع خلال السنوات الأخيرة [9]، حيث تدرج جميع الدراسات المنجزة من أجل اكتشاف وتصنيف الأحداث الصوتية ضمن إطار معالجة الإشارة الرقمية منتظمة العينة (DSP).

وعلى سبيل الذكر فقد تم في المرجع [7] استخدام خصائص Gabor filterbank لاكتشاف وتشخيص الأحداث في بيئات متداخلة مع مصادر الضجيج، تختزن هذه الميزات ترددات التعديل المؤقتة الطيفية في الإشارة التي تعد مناسبة لاكتشاف الأحداث الصوتية المتغيرة.

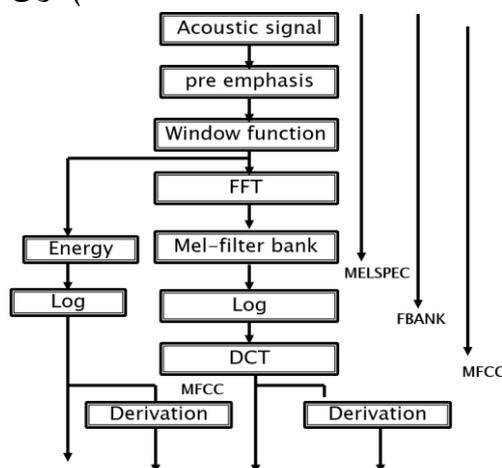
كما تم في المرجع [10] استخدام الخصائص البيولوجية المشتقة من بنك المرشحات لوظائف Gabor ثنائية الأبعاد والتي تعمل على تحليل كثافة الطاقة الطيفية المؤقتة إلى عناصر تلتقط أنماط التعديل المؤقتة الطيفية المرتبطة وقد تم افتراض أن وجود كمية كبيرة من التحليل الطيفي والمؤقت سينتج الخصائص التي تسمح بالتصنيف المرن.

تم أيضاً في المرجع [10,11] تقييم ومقارنة خوارزميات استخلاص الميزات المستخدمة في تمثيل الأصوات الأمامية والخلفية في البيئة التي تعاني من تداخل الضجيج. في حين تم في المرجع [12] تحسين كفاءة

التمييز للبنى الطيفية بين الأحداث الصوتية والكلامية التي تخفض من أداء مجموعات خصائص الإشارة الكلامية، وتم ذلك بتحديد المقدرة التمييزية لكل عنصر بناء على دقة Bayesian التقريبية واشتقاق مجموعة خاصة التمييز لاكتشاف الحدث الصوتي. وبناء عليه يكون الاكتشاف والتقييم الدقيق للحدث الصوتي في البيئة الحقيقية مهمة صعبة بسبب ظروف البيئة المحيطة والقيم المتغيرة للضجيج المتداخل عبر الزمن مما يحد من أداء نظام الكشف.

أيضاً يشير المرجع [13] إلى تحسين دقة الكشف عن الحدث الصوتي في شبكات الحساسات الصوتية بهدف المراقبة المنزلية حيث يتم هنا النقاط الأصوات من قبل عقد الحساسات اللاسلكية في المنزل وإرسالها بشكل متزامن إلى مركز المعالجة بهدف كشف الحدث الصوتي.

وبناء عليه فإن استخلاص خصائص الإشارة الصوتية يعد كمرحلة مهمة جداً من أجل نظام الكشف لأن مستوى أداء التشخيص يعتمد على جودة أشعة الخصائص المستخرجة، حيث يتم توصيف عمليات حساب معاملات خوارزميات الاستخلاص السابقة (MFCC, FBANK and MELSPEC coefficients) وفق المراحل الآتية [3]:



الشكل(2): مخطط صندوقي لاستخلاص معاملات MFCC ,FBANK ,MELPSEC [4]

بناء على الشكل (2) نجد أن التحليل الطيفي للإشارة الرقمية يعد كمرحلة أساسية ضمن السياق الحسابي لتشخيص إشارة الدخل الصوتية باستخدام تحويل فوريير السريع الذي يفترض تدفقاً مستمراً لإشارة رقمية تم تقطيعها وفق فاصل زمني ثابت يدعى زمن العينة يحدد بناء عليه ما يعرف بتردد الإشارة الرقمية.

بمقابل ذلك تتمثل الفكرة المقترحة في هذا البحث بتطبيق نظرية الكشف الصوتي ضمن إطار تطبيقات التتبع في شبكات الحساسات اللاسلكية دون اعتماد عينات منتظمة للإشارة الصوتية باستخدام الأدوات الرياضية لمعالجة الإشارة الرقمية وفق مخطط الإشارة البياني، لقد استحوذ هذا المجال مؤخراً على اهتمام الباحثين بهدف تطوير تقنيات معالجة الإشارة الرقمية وفق مخطط الإشارة البياني مدفوعين بالانتشار الواسع للتطبيقات التي تكون فيها المعطيات المعرفة ضمن هذه المجالات غير منتظمة العينة، كشبكات الحساسات اللاسلكية والنقل والشبكات الاجتماعية.

تزود النظرية الطيفية ضمن إطار التمثيل البياني امتداداً طبيعياً لمفهوم التردد والمجال الترددي لإشارات التمثيل البياني غير الموجهة، تمثل القيم الذاتية لمصفوفة التجاور في هذه الحالة ترددات الطيف المنفصلة، استخدم الباحثون مصفوفة التجاور كتمثيل لإزاحة العينة في الإشارات أحادية البعد وإنجاز عملية الترشيح اعتماداً على كثير حدود مصفوفة التجاور [14].

تستخدم العديد من أنظمة معالجة الإشارة الرقمية صياغة تحويل محددة بهدف تمثيل المعطيات في مجال إلى مجال آخر، استخدم DSP التحويل المويجي (wavelet) الذي يعد من أكثر التحويلات شيوعاً والذي ينجز تحليلاً

لخصائص التموضع الترددي والزمني كما يعتمد بشكل أساسي على بنك المرشحات ثنائي القنوات الذي يحقق إعادة البناء التام للإشارة الرقمية [15].

يستخدم بنك المرشحات كأداة مفيدة في العديد من تطبيقات معالجة الإشارة الرقمية كضغط الصوت والصورة والتحليل الترددي والزمني للإشارة، وضمن مجال DSP فقد استخدمت العديد من الخوارزميات بهدف تصميم بنك المرشحات ذو خاصية التعامد والتعامد الثنائي، وبنك المرشحات غير المنتظم ومتعدد الأبعاد [16]. من جهة أخرى وعلى اعتبار أن مخطط الإشارة البياني يزود نموذجاً عاماً لمعالجة المعطيات غير منتظمة العينة فإنه من الأدوات الهامة لمعالجة هذا النمط من الإشارات هو تحويل فوريرير وفق مخطط الإشارة البياني (GFT) وعملية الترشيح أيضاً. على نحو مماثل لبنك المرشحات الرقمي التقليدي وفي حال تم تجميع عدة مرشحات من نوع GSP سينتج لدينا بنك المرشحات وفق مخط الإشارة البياني مما يحقق تحسناً في كفاءة معالجة الإشارة وفق مخطط الإشارة البياني [5].

لقد تم دراسة وتقييم بنك المرشحات وفق GSP وتطبيقاتها في العديد من الأبحاث السابقة كما ورد في المرجع [15]. حيث تم التركيز في المرجع [16] على طريقة التحويل إلى تصميم بنك المرشحات الثنائي من نمط GSP انطلاقاً من بنك المرشحات التقليدي، كما تم في المرجع [17] تقييم البارامترات المثالية لتابع التقابل وذلك بتخفيض أخطاء التقريب لمرشحات GSP في المجال الطيفي، في حين تم في المرجع [18] دراسة تصميم بنك المرشحات المتعامد اعتماداً على المعرفة المسبقة للقيم الذاتية والأشعة الذاتية لمصفوفة لابلاسيان.

تم التركيز في هذا البحث على تطبيق بنك المرشحات وفق GSP واستخدام المفاهيم والأدوات التحليلية مثل مرشحات GSP من أجل تحليل الإشارات الرقمية (معطيات عقد التحسس اللاسلكية) المعرفة وفقاً لمخطط الإشارة البياني وتطبيق التقييم الموزع والتجميعي للإشارة الرقمية وإزالة الضجيج ثم إعادة بناء الإشارة في شبكات الحساسات اللاسلكية على اعتبار أن المعطيات التي تم تجميعها من عقد الحساسات عادة ما تكون غير منتظمة العينة وذات بنية معقدة بحيث لا يكون من الممكن معالجتها باستخدام أدوات DSP التقليدية.

2. أهمية البحث وأهدافه:

إن شبكات الحساسات اللاسلكية المجهزة بميكروفونات صوتية والتي يتم نشرها على مدى واسع النطاق ضمن إطار تطبيقات التتبع والاكتشاف تعالج كمية كبيرة من المعطيات الناتجة من كل عقدة تحسس بما يتسبب بضغط كبير على قناة الإرسال اللاسلكية في الشبكة، تندمج الأصوات المدروسة مع مستوى ملحوظ من الضجيج الخلفي في بيئة النشر الفعلية مما ينعكس سلباً على دقة تشخيص المصادر الصوتية.

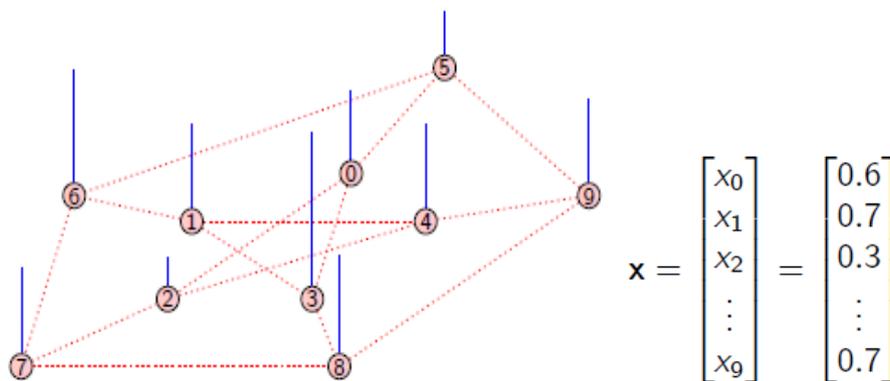
إن اعتماد عقد الحساسات اللاسلكية على بطارية محدودة القدرة في تطبيقات المراقبة طويلة الأمد يخفض من عمر الشبكة أيضاً، كما أن تجهيز عقد الحساسات بتدابير المقاومة الأخرى لا يعد كافياً لمقاومة عوامل الجو الخارجي، وبناء عليه لابد من عملية تطوير أدوات معالجة الإشارة الرقمية من أجل التشخيص الموثوق للأحداث الصوتية في شبكات الحساسات اللاسلكية، حيث تم تقديم حلاً عملياً قابلاً للتطبيق في شبكات الحساسات اللاسلكية المجهزة بميكروفونات صوتية تقوم باستقبال الأصوات وتخزين عيناتها من أجل تطبيق المعالجة المحلية بهدف الحصول على تقييم عن الأحداث الصوتية وتقديم معلومات إضافية في سبيل تشخيص هوية الأصوات المحدثة بغض النظر عن انتظام عينات الإشارة المستقبلية، وذلك اعتماداً على خصائص التحليل الطيفي على مستوى

الإشارة البياني من خلال تمرير الإشارة المصدر عبر بنك المرشحات من أجل إزالة الضجيج، ثم تطبيق عملية التحليل الطيفي واتخاذ الإجراء المناسب اعتماداً على مخطط التحليل الطيفي الناتج للصوت الحدث.

3. طرائق البحث ومواده:

1.3. مخطط الإشارة البياني:

ليكن لدينا $g = (v, \zeta, A)$ كمخطط رسم بياني حيث v مجموعة من العقد و ζ مجموعة من الحواف و A هي المصفوفة الموزونة في المجموعة $R^{N \times N}$ ، عندما يكون $A_{ij} = 0$ لا يكون هنالك ارتباط من العقدة i إلى العقدة j ، في حال كانت الحافة غير موجهة بين i و j يكون لدينا $A_{ij} = A_{ji}$ ، نعتمد هنا مصفوفة التجاور مع قيم موجبة أو صفرية $A_{ij} \geq 0$. كما يوضح الشكل (3) نموذج تصوري لإشارة الإشارة البياني [19].



الشكل (3): نموذج توضيحي لإشارة الإشارة البياني [19]

2.3. مخطط الإشارة البياني وشبكات الحساسات اللاسلكية:

بسبب محدودية مجال الاتصال لعقد الحساسات اللاسلكية، فإن كل عقدة تحسس في شبكة الحساسات اللاسلكية بمقدورها أن تتواصل مع عدد صغير من العقد الأخرى. بهدف محاكاة أنماط الاتصال في هذا المجال نفترض أن كل قمة من مخطط الإشارة البياني توافق عقدة تحسس لاسلكية في حين توافق كل حافة زوجاً من العقد المتواصلة، وعلى اعتبار أن مخطط الاتصال يكون تابعاً للمسافة بين العقد فهو يمثل الترابط المكاني بين قيم الحساسات أيضاً، ففي حال كانت العقدتين متقاربتين بما يكفي بهدف التواصل فإن معطيات العقد تكون مترابطة بشكل أكبر، حينئذ سيكون بمقدورنا أن نحدد قيم الترابط المكاني بإضافة أوزان إلى الحواف ومع وجود أوزان ذات قيم أعلى للحواف التي تربط بين عقد الحساسات اللاسلكية فهي تعني ترابطاً أكبر لقيم الحساسات اللاسلكية [20]، نفترض هنا نموذج شبكة التواصل مع مخطط الإشارة الموزون غير الموجه $g = (v, \zeta, A)$ الذي يتألف من مجموعة من القمم v والحواف ζ وتابع الوزن $A: \zeta \rightarrow R^+$ الذي يخصص قيم غير سالبة لكل حافة.

نفترض عدد العقد في الشبكة $N = |v|$ محدوداً ومخطط الإشارة البياني يكون متصلاً. إن مصفوفة التجاور أو المصفوفة الموزونة W من أجل مخطط رسم بياني موزون g تكون مصفوفة ذات أبعاد $N \times N$ مع مداخل $A_{m,n}$ وفق الصياغة الآتية [19]:

$$A_{m,n} = \begin{cases} A(e) & \text{if } e \in \zeta \text{ connects vertices } m, n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ومن أجل ذلك فإن مخطط الإشارة البياني الموزون g يكافئ تمثيلاً ثلاثياً (ν, ζ, A) ، تمثل درجة كل قمة كمجموع أوزان الحواف الداخلة إليها، نعرف هنا مصفوفة الدرجة D كمصفوفة قطرية مع دخل قطري $D_{n,n}$ يعادل مجموع المداخل في السطر n^{th} من A ، إن تابع الإشارة $f: V \rightarrow R$ المعروف ببناء على قمم مخطط الإشارة البياني يمكن أن يمثل كشعاع $f \in R^N$ حيث العنصر n^{th} من الشعاع f يمثل قيمة التابع لدى القمة n^{th} في V [19].

3.3. تحليل فوريير وفق مخطط الإشارة البياني (GRAPH FOURIER TRANSFORM):

كما هو موضح في الشكل (3) ليكن لدينا إشارة المخطط البياني التي تعد بمثابة شعاع $x \in R^N$ يعرف فيها الرمز x_i قيمة العنصر من أجل القمة i ، يتم تعريف تحويل فوريير باستخدام معامل مرجعي يتيح تطبيق عملية التحليل الطيفي حيث أن تمثيل إشارة المخطط البياني في المجال الطيفي يفسر على أنه GFT، لنعتبر المصفوفة $R \in R^{N \times N}$ كمعامل مرجعي يرافق مخطط الإشارة البياني ويكون فيه $R_{ij} = R_{ji}$ من أجل أي زوج من العقد $i \neq j$ بحيث يساوي الصفر إذا كان i أو j غير متصلين بهدف تحقيق شروط التطبيق الفعال للمرشحات وفق GSP، يتمثل التحليل الطيفي للمعامل R وفق الصيغة $R = U \Lambda U^{-1}$ مع اعتبار أن U و Λ تنتمي إلى $C^{N \times N}$ ، يشار إلى أعمدة U كأشعة القيم الذاتية من اليمين، في حين أسطر U^{-1} يشار إليها v_k^T هي أشعة القيم الذاتية من اليسار، أما Λ فهي مصفوفة قطرية من القيم الذاتية $\{\lambda_k\}$.

يهدف التحويل GFT لإشارة الإشارة البياني إلى تحويل الإشارة من مستوى العقد إلى مجال أسس الأشعة الذاتية، وبناء عليه يكون التعريف الرياضي لتحويل فوريير باستخدام المعامل المرجعي القطري $R = U \Lambda U^{-1}$ المرافق لمخطط الإشارة g للإشارة $x \in R^N$ وفق الصيغة الآتية [19]:

$$F_g x = \hat{x} = U^{-1} x \quad (2)$$

يتم تمثيل معاملات GFT بالأشعة الذاتية من جهة اليسار للمعامل R حيث يتم صياغة فوريير وفق [19]

$$\forall k = 1, \dots, N \quad (F_g x)_k = \hat{x}_k = v_k^T X \quad (3)$$

ومعكوس GFT يتم وفق الصيغة $U \hat{x} = U U^{-1} x = x$ ، بشكل عام لا تكون أنماط فوريير u_k العقدية متعامدة بالنسبة لبعضها البعض لكن ذلك يكون صحيحاً في حال كان R متناظراً [15].

4.3. ترددات إشارة المخطط البياني: هنالك ترابطاً بين مفهومي التردد والاهتزاز في GSP، لاستكمال

مفهوم GFT نحتاج أن نقدم تحليلاً ترددياً لأنماط فوريير وفق مخطط الإشارة البياني.

تعتمد صيغتان في الرياضيات لتقدير قيمة هذا التفاوت، تعتمد الأولى على الصيغة التربيعية لمعامل لابلاسيان، فمثلاً في حالة المخطط غير الموجه مع صياغة لابلاس التركيبية فإن المعادلة الآتية (4) [14,19]:

$$V_L(x) = X^T L X = \frac{1}{2} \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} A_{ij} (x_i - x_j)^2 \geq 0 \quad (4)$$

المطبقة من أجل نمط فوريير الموحد u_k المعروف ببناء على L ، وهنا تشير القيمة الأكبر للتفاوت التربيعي

المحلي u_k إلى القيمة الأكبر للتردد حيث يتم صياغتها وفق الآتي [14]:

$$V_L(u_k) = u_k^T L u_k = \frac{1}{2} \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} A_{ij} (u_k(i) - u_k(j))^2 = \lambda_k \|u_k\|_2^2 = \lambda_k \quad (5)$$

في حين يتمثل التعريف الثاني بتقييم التفاوت الكلي بين الإشارة ونسختها المزاحة وفق مخطط الإشارة البياني

$$L_d = I - \frac{A^T}{\|A\|_2} \quad (\text{حيث تكون الإزاحة هي نتيجة تطبيق مصفوفة التجاور إلى الإشارة الأصلية) وعلى اعتبار أنه لدينا}$$

يتم صياغة التفاوت وفق الآتي [14]:

$$V_{L_d}(x) = \left\| x - \frac{1}{\mu_{\max}} A^T x \right\|_2 = \|L_d x\|_2 \quad (6)$$

تمثل μ_i القيم الذاتية للمصفوفة A و μ_{\max} هو أحد القيم العظمى للمطال حيث يتم قراءة تفاوت نمط فوريير

u_k عن L_d كالآتي:

$$V_{L_d}(u_k) = \|L_d u_k\|_2 = |\lambda_k| \|u_k\|_2 = |\lambda_k| \quad (7)$$

يمثل التفاوت الكلي من أجل القيمة الأبعد ل u_k عن نسخته المزاحة عبر مخطط الإشارة البياني وتشير إلى

القيمة الأكبر للتردد [15,14].

5.3. المرشحات وفق مخطط الإشارة البياني:

اعتماداً على المعامل $R = U \Lambda U^{-1}$ لمخطط الإشارة البياني، سنقوم بدراسة تصميم المرشحات في GSP

ضمن فضاء الأشعة الذاتية $R = \sum_{\lambda} P_{r\lambda}$ حيث يشمل المجموع كامل القيم الذاتية المختلفة λ ويكون $P_{r\lambda}$ هو بمثابة

الاسقاط على فضاء الأشعة الذاتية المرافق لقيمة λ وفق الصياغة الآتية [15]:

$$P_{r\lambda} = \sum_{\lambda_k = \lambda} u_k v_k^T \quad (8)$$

تعطى الصيغة الرياضية لمرشح الإشارة البياني الذي ينتج تأثيراً متبايناً على كامل فضاء الأشعة الذاتية للمعامل

R بحسب ما تكون عليه القيمة الذاتية λ وكأي تابع وفق: $h: C \rightarrow R$ حيث $h(\lambda) \rightarrow \lambda$ يتم تعريف مرشح الإشارة

البياني H وفق المعادلة الآتية [15]:

$$H = \sum_{\lambda} h(\lambda) P_{r\lambda} = \sum_k h(\lambda_k) u_k v_k^T \quad (9)$$

لكل من فضاء الأشعة الذاتية R مع قيمة ذاتية λ يكون مرافقاً لوزن المرشح $h(\lambda)$ الذي يخمد أو يعزز أهمية

شعاع القيمة الذاتية في تحليل الإشارة المعنية، بمقدورنا صياغة تأثير H على الإشارة x وفق الآتي:

$$Hx = \sum_{\lambda} h(\lambda) P_{r\lambda} x \quad (10)$$

ومن أجل أي تابع g و المصفوفة $g(\lambda)$ كاختصار للمصفوفة القطرية $(g(\lambda_1), \dots, g(\lambda_2))$ يتم

حينها صياغة المعادلة الرياضية لمرشح الإشارة البياني وفق الآتي [15]:

$$H = U h(\lambda) U^{-1} \quad (11)$$

وعلى نحو مكافئ يمكن كتابة $H = h(R)$ بمعنى أن تطبيق R إلى إشارة الإشارة البياني في الواقع هو بمثابة

إجراء حساب محلي وفق مخطط الإشارة البياني وعلى مستوى كل عقدة تكون قيمة الإشارة المحولة الناتجة هي جمع

موزون لقيم الإشارة الأصلية لدى العقد المجاورة بصورة مباشرة على بعد قفزة واحدة، ومن أجل ذلك وعلى مستوى العقد

يتم تفسير المرشح $H=h(R)$ كمعامل يوزن المعلومات لدى الإشارة المنتشرة عبر حواف الإشارة البياني، أيضاً تبنى

المرشحات التقليدية بنفس الطريقة باستخدام معامل أساس للإزاحة الزمنية حيث يعتمد مصطلح المعامل المرجعي من الجانب الرياضي في GSP كمعامل إزاحة زمنية.

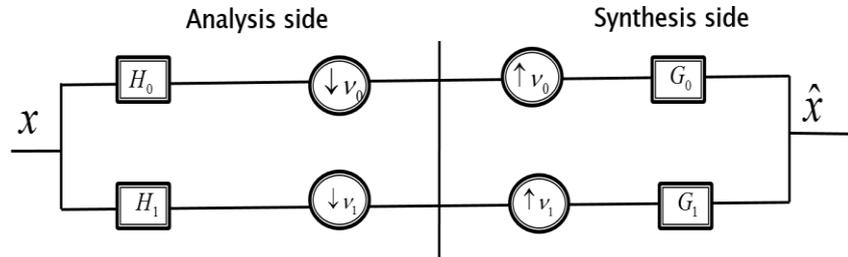
من ناحية أخرى وبهدف إيضاح مفهوم الترشيح وفقاً لمخطط الإشارة البياني في المجال الطيفي نعتبر هنا إشارة الإشارة البياني $x = \sum_k a_k u_k$ و $y = Hx$ ، إن عنصر فوريير من الدرجة k-th للإشارة x يتم الحصول عليه بتطبيق المعادلة $\hat{x}_k = v_k^T x = a_k$ حيث يتم صياغة النسخة المرشحة وفق $y = Hx = \sum_k h(\lambda_k) a_k u_k$ ، أما عنصر فوريير من الدرجة k-th للإشارة المرشحة يكون وفق $\hat{y}_k = h(\lambda_k) a_k$ التي تمثل التفسير التقليدي للترشيح بمقابلته بعملية الضرب في مجال فوريير حيث ندعو $h(\lambda)$ بالاستجابة الترددية للمرشح [15].

بناء على ما سبق يتضح أن الاستجابة الترددية للمرشح H تغير فقط من الترددات $v(\lambda)$ التي توافق مجموعة منقطع من القيم الذاتية لـ Rl وبشكل عام فالاستجابة الترددية للمرشح الإشارة البياني يتم تعريفها وفق مجال مستمر من القيم الذاتية مما يقود إلى المفهوم العام لتصميم المرشح، والذي من أجله يتم تصميم الاستجابة الترددية $h(\lambda)$ من أجل كامل قيم λ ولا تكون متكيفة فقط من أجل مجال محدد من القيم الذاتية لـ Rl .

تم التركيز في هذا البحث على نموذج المرشحات وفق مخطط الإشارة البياني التي تعطى في صيغة مرشحات الاستجابة النبضية المحدودة (FIR) التي تقابل كثير حدود محدود الدرجة يحقق بدوره ترشيح وسطي انتقالي موزون (MA) للإشارة. يتم تصميم المرشح بملاءمة الاستجابة المرغوبة $h(\lambda)$ مع كثير الحدود $\sum_{i=0}^{i=n} a_i \lambda^i$ ، إن قيم أكبر للمتغير n يعني مقارنة أكبر للاستجابة المرغوبة.

6.3. بنك المرشحات:

وجدنا من الدراسة السابقة أنه من المتاح معالجة وترشيح الإشارات غير منتظمة العينة وفقاً لمخطط الإشارة البياني، وبناء عليه سيكون من المناسب تطوير تحويلات أخرى إلى عدة مجالات ترددية كبنك المرشحات بهدف تجزئة الإشارة الأصلية إلى مجالات ترددية فرعية وفقاً لمخطط الإشارة البياني عن طريق تجميع المرشحات وتجزئة مخطط الإشارة البياني إلى مخططات جزئية، يتكون بنك المرشحات ثنائي القنوات كما هو موضح في الشكل (4) من مرحلة لتحليل الإشارة تدعى مرحلة التحليل وأخرى لإعادة بناء الإشارة تدعى بمرحلة التركيب على نحو مشابه لبنك المرشحات التقليدي في DSP [15,21].



الشكل (4): المخطط الصندوقي لبنك المرشحات الثنائي

يقوم معامل التخفيض بتقسيم مجموعة العقد v إلى مجموعتين v_0 و v_1 ، عندما يتم انجاز هذا التقسيم سيكون لدينا $v_0 \cup v_1 = v$ و أيضاً $v_0 \cap v_1 = 0$ ، يمثل المعامل $\downarrow v_i$ كمعامل التخفيض الملازم لـ v_i الذي يتم تعريفه وفق إشارة الإشارة البياني حيث $y_i = \downarrow v_i x$ هو تخفيض لـ x بالنسبة إلى $\downarrow v_i$ ، نعرف أيضاً

معامل الرفع وفق $\uparrow v_i = \downarrow v_i^T$ ، لنفترض لدينا الإشارة y_i المعرفة عبر v_i حينها تعد الصيغة $\uparrow v_i y_i$ هي نسخة تم اقامها بالأصفار من أجل y_i على كامل مخطط الإشارة البياني.

يتم صياغة كلا المعاملات وفق $\uparrow v_i \downarrow v_i = \text{diag}(Iv_i)$ حيث تكون Iv_i هي تابع مؤشر لـ v_i ، وبناء عليه نعرف: $J = 2 \uparrow v_0 \downarrow v_0 - I = \text{diag}(Iv_0) - \text{diag}(Iv_1)$.

نستخدم في مرحلة التحليل مرشح تمرير الترددات المنخفضة H_0 ومرشح تمرير الترددات المرتفعة H_1 ، بمقابل ذلك يوجد لدينا في مرحلة التركيب مرشح التمرير المرتفع والمنخفض للترددات G_1, G_0 ، كما تتمثل الاستجابات الترددية المرافقة لكل من المرشحات وفق الترتيب الآتي $h_0(\lambda), h_1(\lambda), g_0(\lambda), g_1(\lambda)$

تدعى الإشارة $y_0 = \downarrow v_0 H_0 x$ كتقريب للإشارة x في حين يكون $y_1 = \downarrow v_1 H_1 x$ هي المعطيات الضرورية لاستعادة الإشارة x من صياغتها التقريبية، بمقدور معامل التخفيض أن يعتمد عينة واحدة لكل عقدتين كما في الحالة $\tilde{x} = \uparrow 2 \downarrow 2 x$. بناء على الشكل (4) يتم صياغة الإشارة المعالجة \tilde{x} وفق الآتي [15]:

$$\tilde{x} = (G_0 \uparrow v_0 \downarrow v_0 H_0 + G_1 \uparrow v_1 \downarrow v_1 H_1) x = \quad (12)$$

$$\frac{1}{2} (G_0 H_0 + G_1 H_1) x + \frac{1}{2} (G_0 J H_0 - G_1 J H_1) x$$

بهدف تحقيق إعادة البناء التام للإشارة $\tilde{x} = x \quad \forall x \in R^N$ يتم صياغة معادلتين أساسيتين تربط المرشحات الأربعة والمصفوفة J وفق الآتي [15]:

$$G_0 H_0 + G_1 H_1 = 2I \quad (13)$$

$$G_0 J H_0 - G_1 J H_1 = 0$$

ركزنا في هذا البحث على تطبيق تحليل إشارة الإشارة البياني غير منتظمة العينة من خلال تمريرها على عدة مرشحات بأن واحد كمرحلة أولى وتطبيق التحليل الطيفي وفقاً لمخطط الإشارة البياني للتعرف على هوية الإشارة المصدر، ثم إعادة تركيب الإشارة نفسها باستخدام بنك المرشحات للتركيب، يمكن أن نعتبر الإشارة التقليدية أحادية البعد بمثابة مخطط رسم بياني دائري غير موجه كما تم تنظيم المحاكاة وفق المراحل الموضحة في الشكل (5).



الشكل (5): مراحل المحاكاة المعتمدة

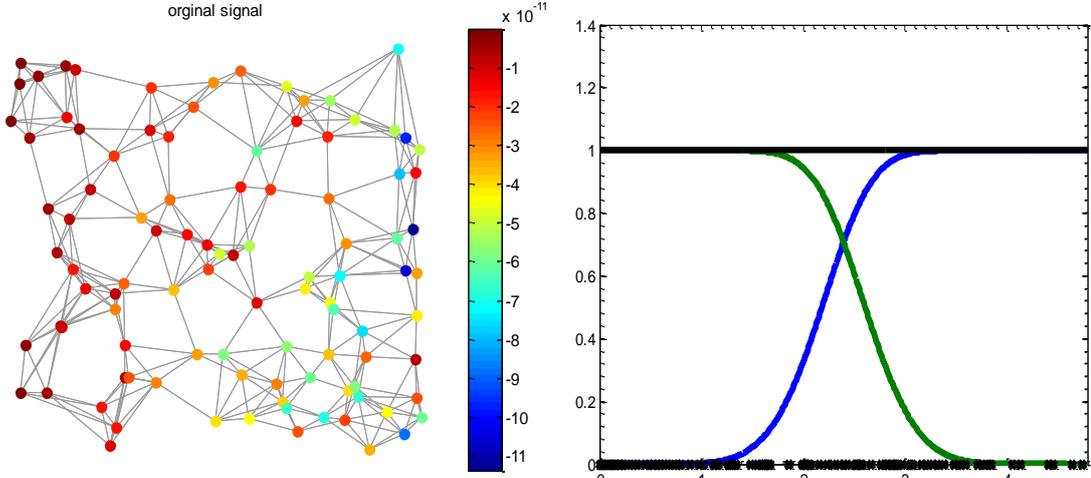
4. المناقشة:

تم استخدام توابع مكتبة GSP [22]، وتحقيق الارتباط مع مترجم Matlab بهدف تطبيق أدوات تصميم المرشحات والتحليل الطيفي وبنك المرشحات وإظهار المنحنيات اللازمة لإيضاح النتائج وفقاً لمخطط الإشارة البياني، اعتمدنا قاعدة معطيات من عينات الإشارة الصوتية التي تقابل مواضع عقد الحساسات اللاسلكية وفق مخطط الإشارة البياني.

تم في المرحلة الأولى تصميم بنك المرشحات للتحليل ثنائي القنوات وفق تابع GSP_DESIGN_REGULAR في مكتبة GSP للمرشحات، تتمثل الصياغة الرياضية لتابع التمرير المنخفض وفق $f_l = \sin\left(\frac{\pi}{4} x\right)$ ، أما فرع التمرير

المرتفع فقد تم تكييفه بحيث يشمل على جميع القمم التي لا يتيح فرع التمرير المنخفض تمريرها.

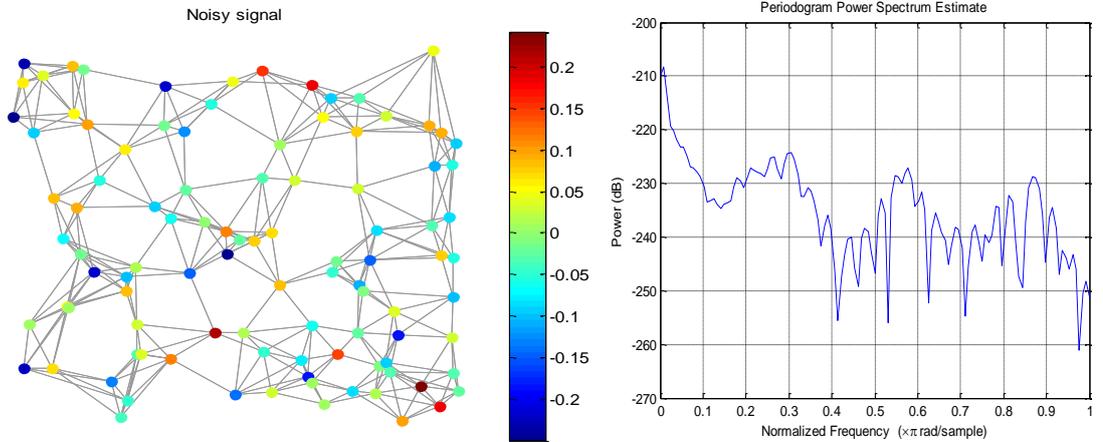
يمثل الفرع الأول مرشح التمرير المرتفع ويمثل الفرع الثاني مرشح التمرير المنخفض كما يوضح الشكل (6)، يبين بدوره الشكل (7) منحنى توزيع عينات الإشارة الصوتية الموزعة وفق GSP.



الشكل (7): منحنى توزيع عينات الإشارة الصوتية

الشكل (6): بنك مرشحات GSP ثنائي القنوات

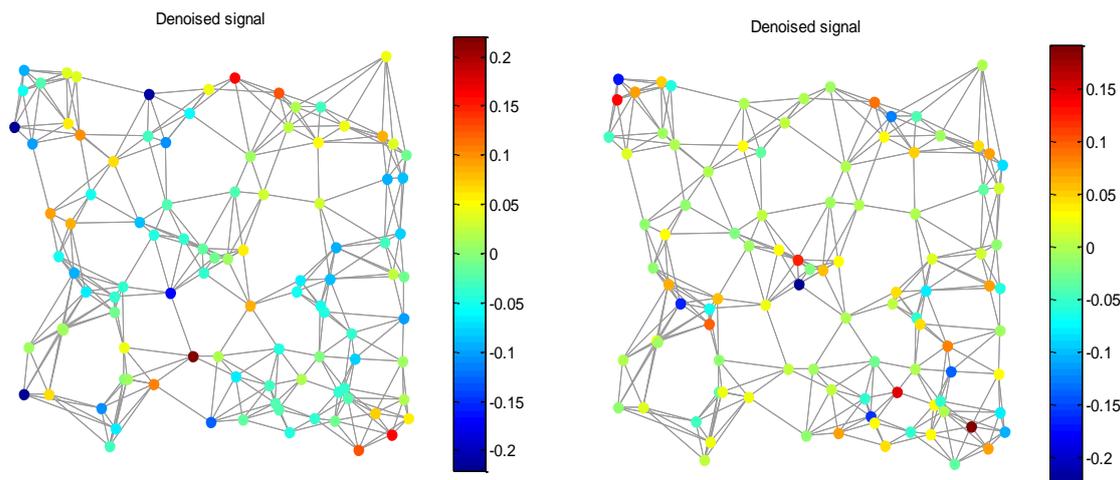
من أجل فهم دلالات الألوان في منحنى الإشارة البياني نعتمد مقابلة تدرج الألوان في العمود الموازي لرؤوس المخطط التي تمثل قيم العينات، فالقمة ذات اللون الأزرق الغامق مثلاً تشير إلى القيمة 11×10^{-11} وهكذا من أجل بقية الألوان وفق الشريط المتدرج، كما يوضح الشكل (8) توزيع طاقة الإشارة الصوتية المفترضة، يوضح الشكل (9) توزيع عينات الإشارة الصوتية بعد التداخل مع إشارة الضجيج.



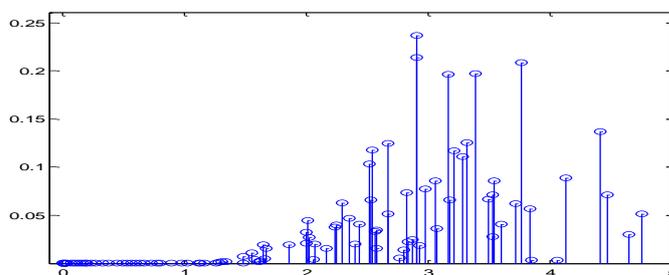
الشكل (8): توزيع طاقة العينات الصوتية المفترضة

الشكل (9): توزيع عينات إشارة الصوت بعد التعرض للضجيج

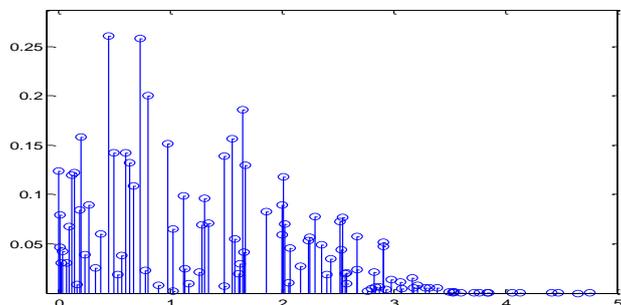
عندما يتم تمرير الإشارة المصدر عبر بنك مرشحات للتحليل وبصورة متزامنة ضمن مرشحين أحدهم للتمرير المرتفع يمثله الفرع الأول وآخر للتمرير المنخفض يمثله الفرع الثاني سيكون خرج كل منها كما هو موضح في الشكل (10) و(11).



الشكل(10): الإشارة الصوتية بعد ترشيح الضجيج في الفرع الأول الشكل (11): الإشارة الصوتية بعد ترشيح الضجيج في الفرع الثاني
كما يبين الشكلان (12) والشكل(13) مخطط التحليل الطيفي للإشارة الناتجة لكل من فرع التمرير العالي والمنخفض.

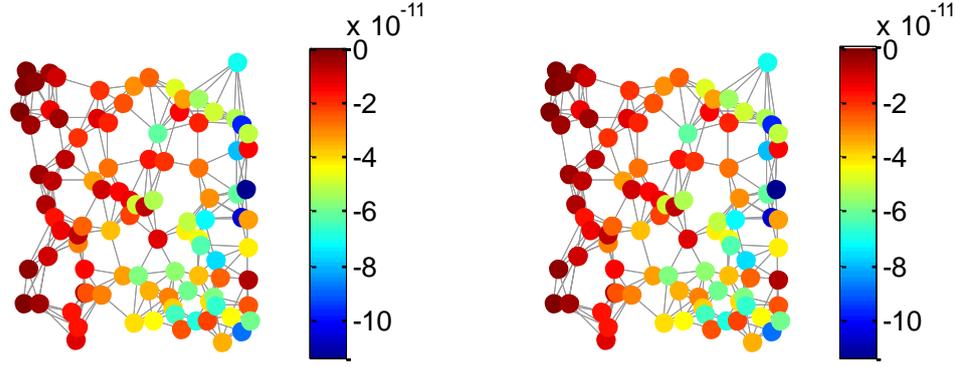


الشكل (12): المخطط الطيفي لإشارة الفرع الأول من بنك المرشحات بعد فصل الضجيج

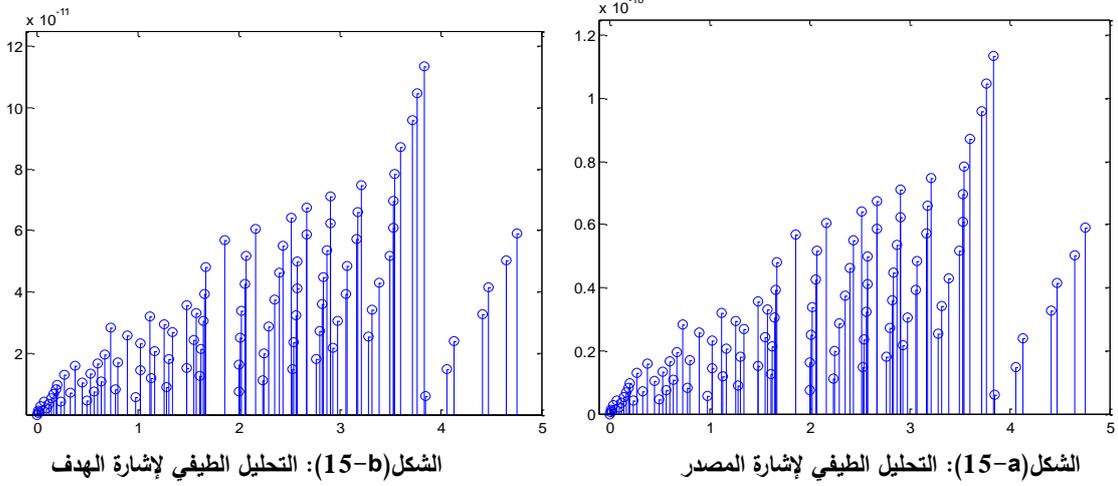


الشكل (13): التمثيل الطيفي لإشارة الفرع الثاني من بنك المرشحات بعد فصل الضجيج

بعد مرحلة التحليل الطيفي نعيد تجميع الإشارة في كل من فرعي التمرير المرتفع والمنخفض لنتج معاً إشارة واحدة مع التحقق من إعادة البناء التام للإشارة في هذه الحالة، يوضح الشكل(14) مقارنة بين الإشارة الأصلية والإشارة التي تم إعادة تجميعها على مستوى العينات كما يبين الشكل(15-a-b) مقارنة التحليل الطيفي لكل من إشارة المصدر والهدف في بنك المرشحات ثنائي القنوات في GSP.



الشكل(14): مقارنة توضح تطابق إشارة المصدر والهدف في بنك المرشحات



الشكل(15-b): التحليل الطيفي لإشارة الهدف

الشكل(15-a): التحليل الطيفي لإشارة المصدر

5.5. الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث دراسة وتقييم أحد أدوات معالجة الإشارة غير منتظمة العينة ضمن مجال تطبيقات التتبع والتشخيص في WSN باستخدام التوابع الرياضية لـ GSP من أجل تصميم بنك المرشحات من مرحلتي التحليل والتركيب، بحيث يتم انجاز التحليل الطيفي للإشارة الموزعة ضمن نطاق العينات غير المنتظمة وفق مخطط الإشارة البياني، فعند وجود مرشحين في مرحلة التحليل أحدهما لتمرير الترددات المنخفضة والآخر بهدف تمرير ترددات النطاق المرتفعة بهدف احتواء كامل مجال العينات المتاحة وتجنب حدوث الفقد في المعطيات المستقبلية من قبل عقد التحسس اللاسلكية، ثم يتم لاحقاً تجميع معطيات الإشارة السابقة في مرحلة التركيب بعد ترشيح الضجيج وتشخيص هوية الإشارة الناتجة، والتي قد تكون بمثابة الإشارة المطلوبة من أجل مراحل المعالجة اللاحقة في نظام التتبع وتشخيص الأهداف.

من الممكن أيضاً تطوير العمل السابق بحيث يتم تمرير إشارة المعطيات (العينات غير المنتظمة) إلى عدة مستويات متعاقبة من بنك المرشحات ثنائي القنوات بهدف تحليلها إلى عدة نطاقات ترددية فرعية وتنفيذ عمليات المعالجة المطلوبة وفق إطار مماثل لمعالجة الصورة كما هو الحال في تحليل wavelet.

المراجع:

- [1] Li, X. Y. 2008, *Wireless ad hoc and sensor networks: theory and applications*. Cambridge University Press.
- [2] ATREY, P. K., MADDAGE, N. C., KANKANHALLI, M. S. (2006, May), *Audio based event detection for multimedia surveillance*. In *2006 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings*, (Vol. 5, pp. V-V). IEEE.
- [3] LUO, L.; QIN, H.; SONG, X.; WANG, M.; QIU, H.; ZHOU, Z. 2020, *Wireless Sensor Networks for Noise Measurement and Acoustic Event Recognitions in Urban Environments*. *Sensors*, 20(7), 2093.
- [4] KIKTOVA, E.; LOJKA, M., Pleva, M., JUHAR, J., CIZMAR, A. (2013, June), *Comparison of different feature types for acoustic event detection system*. In *International Conference on Multimedia Communications, Services and Security* ,Springer, Berlin, Heidelberg, (pp. 288-297).
- [5] SAAD, L. B.; BEFERULL-LOZANO, B. 2020, *Accurate Graph Filtering in Wireless Sensor Networks*. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(12), 11431-11445.
- [6] SHUMAN, D. I.; VANDERGHEYNST, P.; KRESSNER, D.; FROSSARD, P. (2018), *Distributed signal processing via Chebyshev polynomial approximation*. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, 4(4), 736-751.
- [7] GeigerEIGER, J. T.; HELWANI, K. (2015, August), *Improving event detection for audio surveillance using gabor filterbank features*. In *2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*,(pp. 714-718). IEEE.
- [8] CROCCO, M.;CRISTANI, M.; TRUCCO, A.; MURINO,V. (2016), *Audio surveillance: A systematic review*. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 48(4), 1-46.
- [9] HANSLER, E.; SCHMIDT, G. (Eds.). (2008), *Speech and audio processing in adverse environments*. Springer Science & Business Media.
- [10] SCHRODER, J.; GOETZE, S.; ANEMULLER, J. (2015). *Spectro-temporal gabor filterbank features for acoustic event detection*. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 23(12), 2198-2208.
- [11] TEMKO, A.; NADEU, C.; MACHO, D.; MALKIN, R.; ZIEGER, C.; OMOLOGO, M. (2009). *Acoustic event detection and classification*. In *Computers in the human interaction loop*, Springer, London, (pp. 61-73).
- [12] ZHUANG, X.; ZHOU, X.; HUANG, T. S.;HASEGAWA-JOHNSON, M. (2008, March). *Feature analysis and selection for acoustic event detection*. In *2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, (pp. 17-20). IEEE.
- [13] KIM, H. G.; KIM, J. Y. (2017), *Environmental sound event detection in wireless acoustic sensor networks for home telemonitoring*. *China Communications*, 14(9), 1-10.
- [14] SANDRYHAILA, A.; MOURA, J. M. (2014). *Discrete signal processing on graphs: Frequency analysis*. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 62(12), 3042-3054.

- [15] TREMBLAY, N.; GONCALVES, P.; BORGNAT, P. (2018), *Design of graph filters and filterbanks*. In *Cooperative and Graph Signal Processing*, Academic Press, (pp. 299-324).
- [16] TSENG, C. C.; LEE, S. L. (2018, December), *Designs of Bipartite Graph Filter Bank Using Graph Fourier Transform and Digital Filter Bank*. In *2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, (pp. 197-200). IEEE.
- [17] SAKIYAMA, A.; WATANABE, K.; TANAKA, Y.; ORTEGA, A. (2019). *Two-channel critically sampled graph filter banks with spectral domain sampling*. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 67(6), 1447-1460.
- [18] TSENG, C. C., ; LEE, S. L. (2019), *Design of orthogonal graph filter bank with known eigenvalues of Laplacian matrix*. *IET Signal Processing*, 13(5), 551-561.
- [19] MARGUES,G.,A; SEGARRA,S.; RIBEIRO,A.2016, *Graph Signal Processing: Fundamentals and Applications to Diffusion Processes*. Massachusetts Institute of Technology, University of Pennsylvania,pp.11-16.
- [20] JABLONSKI, I. (2017), *Graph signal processing in applications to sensor networks, smart grids, and smart cities*. *IEEE Sensors Journal*, 17(23), 7659-7666.
- [21] VAISHNAV, N.; TATU, A. (2016). *A graph downsampling technique based on graph fourier transform*. *arXiv preprint arXiv:1612.07542*.
- [22] <https://lts2.epfl.ch/gsp/>