



المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

ماجستير اتصالات

اختصاص معالجة إشارة

أطروحة معدة لنيل شهادة الماجستير في نظم الاتصالات باختصاص معالجة إشارة

عنوان الرسالة

تحسين التزامن في أنظمة نشر الطيف بالقفز الترددي

**Synchronization Improvement of FHSS Systems**

إعداد

م. محمود هشام القائد

إشراف

د. خلدون خرزم

د. ياسر جعمور

٢٠١٦/٣/١٦



## الإهداء

إلى والديّ الغاليين أمدّ الله في عمرهما

إلى مرفيقة دمري نزوجتي الحبيبة

إلى مهجة قلبي أولادي

إلى كلّ من شجعني وساعدني على إتمام هذا العمل

## شكر وتقدير

أشكر الله تعالى الذي منَّ عليَّ بإتمام هذا العمل مع رجائي أن يتقبله مني ويجعله خالصاً لوجهه الكريم.

يسعدني أن أتقدم بجزيل الشكر والعرفان إلى أستاذي ومشرفي الدكتور ياسر جعموم الذي مرشحتني لإتمام دراستي العلمية وقدم لي العون والإرشاد والتوجيه السديد.

كما أوجه شكري وتقديري الخالصين إلى الدكتور خلدون خرنرم الذي أشرف على دراستي هذه أيضاً، وبذل كل ما في وسعه لتذليل المصاعب وتخطي العقبات التي واجهتني.

والشكر والتقدير موصولان لأعضاء لجنة المناقشة الدكتور محي الدين وايناخ، والدكتور نادر خضرو لتفضلهما بقبول مناقشة هذا البحث وتقييمهما وإبداء توجيهاتهما، وإلى الدكتور شكري مقداد والدكتورة أميمة دكالك لمساندتهما ودعمهما، وإلى جميع زملائي في العمل.

## المحتويات

### الفصل الأول : مقدمة الأطروحة

- مقدمة الفصل الأول ..... ١
- ١-١- حوافز العمل بأنظمة القفز الترددي ..... ١
- ٢-١- أثر المشوشات على أنظمة القفز الترددي ..... ٢
- ٣-١- أهمية التزامن في أنظمة القفز الترددي ..... ٣
- ٤-١- تعريف المسألة المطروحة ..... ٤
- ٥-١- الأعمال المنجزة ..... ٧
- ٦-١- هيكلية الأطروحة ..... ٨

### الفصل الثاني : التزامن في أنظمة القفز الترددي

- مقدمة الفصل الثاني ..... ٩
- ١-٢- استراتيجيات تحقيق التزامن الأولي في أنظمة القفز الترددي ..... ٩
- ١-١-٢- البحث التسلسلي عن التزامن الأولي ..... ٩
- ٢-١-٢- البحث عن التزامن الأولي باستخدام مرشح توافق ..... ١٢
- ٣-١-٢- التزامن باستخدام سلاسل قفز قصيرة ..... ١٣
- ٤-١-٢- المزامنة عبر إرسال معلومات تزامن خاصة ..... ١٣
- ٥-١-٢- المزامنة عن طريق الكشف والتقدير التسلسلي لرماز القفز ..... ١٣
- ٦-١-٢- المزامنة عبر تخصيص قفزات ترددية لإرسال معلومات التزامن ..... ١٤
- ٧-١-٢- المزامنة باستخدام النشر بالتتابع المباشر ..... ١٤
- ٢-٢- آليات حديثة للقفز الترددي ..... ١٥
- ١-٢-٢- القفز الترددي المترابط Correlated FH ..... ١٥
- ٢-٢-٢- القفز الترددي المحكوم بالمعطيات Message-Driven FH (MDFH) ..... ١٧
- ٣-٢- تصميم آليات التزامن والكشف وبناء كتلة المعالجة الرقمية للنظام المعمول عليه ..... ٢٠
- ١-٣-٢- مقترح آلية صلبة لتحقيق التزامن الخشن لطور سلسلة القفز ..... ٢١
- ٢-٣-٢- نوعية المعلومات الخاصة بالتزامن وكيفية إرسالها ..... ٢٢
- ٣-٣-٢- زمن استجابة المستقبل وعلاقته بسرعة القفز ..... ٢٤
- نتائج قياس التأخيرات لبعض المراحل الأساسية في القفز الترددي ..... ٢٤

- ٢٥ ..... الآلية المتبعة في قياس زمن استجابة المستقبل والنتائج
- ٢٧ ..... ٤-٣-٢ - مقترح آلية كشف إشارة القفز الترددي باستخدام الخصائص الزمنية للمعطيات
- ٢٨ ..... ٤-٣-٢ - تحديد سرعة القفز العظمى لنظام القفز الترددي
- ٢٩ ..... ٥-٣-٢ - تصميم إطار المعلومات لنظام القفز الترددي

## الفصل الثالث : استعادة الساعة والمعطيات

- ٣١ ..... مقدمة الفصل الثالث
- ٣٢ ..... ١-٣ - التقنيات والطرق التقليدية في استعادة الساعة والمعطيات
- ٣٢ ..... ١-١-٣ - استعادة الساعة والمعطيات بتقنية الترشيح Filter-Type CDR
- ٣٢ ..... ٢-١-٣ - استعادة الساعة والمعطيات بتقنية حلقة إقفال طور PLL-Based CDR
- ٣٤ ..... ٢-٣ - تقنيات استعادة المعطيات باستخدام الإعتيان الفائض
- ٣٥ ..... ١-٢-٣ - ملاحظة عين المعطيات بتقنية كشف الحواف (الإعتيان الفائض بفترات متغيرة)
- ٣٧ ..... ٢-٢-٣ - ملاحظة عين المعطيات بتقنية كشف فتحة العين
- ٣٩ ..... ٣-٢-٣ - تقنية الإعتيان الفائض الأعمى Blind Oversampling CDR (BO-CDR)
- ٤٢ ..... ٣-٣ - الآلية الجديدة المقترحة لاستعادة ساعة تزامن النظام وكشف وجود الإشارة
- ٤٢ ..... ١-٣-٣ - فكرة استخدام المراكم المقيّس للمسافات بين الحواف المكشوفة
- ٤٤ ..... ٢-٣-٣ - طريقة ترشيح النبضات العشوائية
- ٤٥ ..... ٤-٣ - المحاكاة والنتائج التي تم التوصل إليها
- ٤٧ ..... ١-٤-٣ - النتائج بوجود ارتعاش عشوائي
- ٤٨ ..... ٢-٤-٣ - النتائج بوجود ارتعاش جيبي

## الفصل الرابع : الخلاصة والآفاق المستقبلية

## فهرس الأشكال

- الشكل ١-١ : الإنزياحات المتراكمة لطور الرماز الناثر بدلالة الانزياح النسبي في معدل توليده بين المرسل والمستقبل خلال ساعة واحدة من الزمن وذلك لمعدلات قفز مختلفة ..... ٤
- الشكل ١-٢ : مخطط المرسل في نظام القفز الترددي، ويبين كتلة المعالجة الرقمية المراد تطويرها ..... ٦
- الشكل ٣-١ : مخطط المستقبل في نظام القفز الترددي، ويبين كتلة المعالجة الرقمية المراد تطويرها ..... ٦
- الشكل ١-٢ : المخطط الصندوقي لمستقبل في نظام FH يعمل بتقنية الربط الفعال [1: P.452] ..... ١٠
- الشكل ٢-٢ : استراتيجية المسح لمجال الارتياح في طور سلسلة القفز بالطريقة التسلسلية الدورية. .... ١١
- الشكل ٣-٢ : استراتيجية المسح لمجال الارتياح في طور سلسلة القفز باستخدام النوافذ المتسعة ..... ١١
- الشكل ٤-٢ : المخطط الصندوقي لمستقبل في نظام FH يعمل بتقنية المرشح الموافق [1: P450] ..... ١٢
- الشكل ٥-٢ : مثال توضيحي لتعريشة الانتقالات الترددية ..... ١٦
- الشكل ٦-٢ : المخطط الصندوقي للمرسل في نظام القفز الترددي المحكوم بالمعطيات MDFH [12] ..... ١٨
- الشكل ٧-٢ : المخطط الصندوقي للمستقبل في نظام القفز الترددي المحكوم بالمعطيات MDFH [12] ..... ١٨
- الشكل ٨-٢ : مثال لتعريشة الانتقالات الترددية لمجموعة مؤلفة من ٨ ترددات ..... ٢١
- الشكل ٩-٢ : تابع الترابط الذاتي لسلسلة نثر بالتتال المباشر طولها يساوي ١١ بت ..... ٢٢
- الشكل ١٠-٢ : إشارة القفز الترددي على دخل المستقبل والإشارات المقابلة لها على خرج الكاشف، في (أ) قيمة RSSI وفي (ب) إشارة المعطيات المكشوفة. .... ٢٥
- الشكل ١١-٢ : منحنيات مؤشر قوة الإشارة المستقبلية والمعطيات على خرج الكاشف أثناء القفز عند قيم استطاعة دخل مختلفة، كالتالي: (أ)  $-30\text{ dBm}$  ، (ب)  $-60\text{ dBm}$  ، (ت)  $-80\text{ dBm}$  ، (ث)  $-100\text{ dBm}$  ، (ج) ..... ٢٦
- الشكل ١٢-٢ : الفترات الزمنية في نبضة القفز الترددي [3] ..... ٢٧
- الشكل ١٣-٢ : بيان توضيحي للطريقة المقترحة للتغلب على تأخيرات الاستقبال وزيادة سرعة القفز ..... ٢٨
- الشكل ١٤-٢ : بنية إطار المعلومات المقترح لنظام القفز الترددي ..... ٢٩
- الشكل ١٥-٢ : الترابط الذاتي لكلمة التزامن SYNCWORD ..... ٣٠
- الشكل ١-٣ : بنية دائرة CDR تعمل بتقنية الترشيح ..... ٣٢
- الشكل ٢-٣ : البنية العامة لاستعادة الساعة والمعطيات بطريقة حلقة إقفال الطور ..... ٣٣
- الشكل ٣-٣ : بنية CDR باستخدام كاشف إثنائي BANG-BANG PD ..... ٣٤

- الشكل ٣-٤ : تموضع نقطة أخذ عينة المعطيات بطريقة كشف الحواف في حالة اعتيان فائض 3XO وذلك تبعاً لنوعية الارتعاش (أ) ارتعاش بتوزيع متناظر وبالتالي الاعتيان يتم في منتصف عين المعطيات (ب) ارتعاش بتوزيع غير متناظر وبالتالي لن يتم الاعتيان في مركز العين ..... ٣٥
- الشكل ٣-٥ : ضبط ساعات إعتيان المعطيات بوجود ارتعاش بكثافة احتمالية غير متناظرة ..... ٣٥
- الشكل ٣-٦ : بنية دائرة CDR المقترحة في [22] والتي تم فيها دمج عمل دائرة VCO مع دائرة تأخير VCDL لتنفيذ ملاحظة عين المعطيات بوجود ارتعاش غير متناظر ..... ٣٦
- الشكل ٣-٧ : بنية كاشف الطور في حالة اعتيان فائض 3XO ..... ٣٦
- الشكل ٣-٨ : طريقة ملاحظة فتحة عين المعطيات في دوائر CDR باعتيان فائض 3XO ..... ٣٧
- الشكل ٣-٩ : بنية دائرة CDR الرقمية والمقترحة في [23] بهدف ملاحظة فتحة عين المعطيات ..... ٣٨
- الشكل ٣-١٠ : المخطط الصندوقي لدائرة BO-CDR (من أجل معدل اعتيان فائض M يساوي 4) [16] .... ٣٩
- الشكل ٣-١١ : آلية انتقاء طور ساعة الإعتيان الأمل من أجل M=5 ..... ٤٠
- الشكل ٣-١٢ : بنية كتلة كشف الحواف واختيار الطور المثالي كما هو مقترح في [16]. ..... ٤١
- الشكل ٣-١٣ : المخطط الصندوقي للبنية الجديدة والمقترحة لاستعادة ساعة النظام واستخلاص المعطيات بالاعتماد على الجمع المقيس للمسافات بين الحواف ..... ٤٣
- الشكل ٣-١٤ : الاستجابة الترددية لمرشح التمرير المنخفض الرقمي المستخدم في ترشيح المعطيات ..... ٤٤
- الشكل ٣-١٥ : بنية محاكي نظام CDR المقترح باستخدام برنامج MATLAB SIMULINK ..... ٤٥
- الشكل ٣-١٦ : البنية الداخلية لكتلة كشف حافة البت الصحيحة بطريقة المراكم المقيس للمسافات بين الحواف .. ٤٥
- الشكل ٣-١٧ : خرج مراحل معالجة المعطيات ضمن كتلة كشف حافة البت الصحيحة بطريقة المراكم المقيس للمسافات بين الحواف ..... ٤٦
- الشكل ٣-١٨ : منحني معدل الخطأ بالبت للطريقة المقترحة بالمقارنة مع الطريقة المرجعية وذلك بدلالة مقلوب تشتت الارتعاش العشوائي المقاس على خرج المرسل ..... ٤٧
- الشكل ٣-١٩ : نتائج محاكاة اختبار سماحية الارتعاش الجيبي للطريقة المقترحة وبالمقارنة مع الطريقة المرجعية ..... ٤٨

## قائمة المصطلحات العلمية

Ad-hoc Networks	الشبكات الغائية أو الاعتيادية
Average Phase Picking (APP)	انتقاء الطور بشكل وسطي
Bang-Bang Phase Detector (BBPD)	كاشف طور إثنائي
Bit Error Rate (BER)	معدل الخطأ بالبت
Blind Oversampling	إعتيان فائض أعمى
Broadband Noise (BBN)	ضجيج على كامل الحزمة الترددية
Clock and Data Recovery (CDR)	استعادة الساعة والمعطيات
Clock Recovery Circuit (CRC)	دائرة استعادة الساعة
Clock Skew	تأرجح الساعة
Closed-Loop	حلقة مغلقة
Code phase	طور الرماز
Correlated FH	القفز الترددي المترابط
Correlated Hopping Enhanced Spread Spectrum (CHESS)	نثر الطيف المحسن باستخدام القفز المترابط
Course Acquisition	التزامن الخشن
Delay Locked Loop (DLL)	حلقة إقفال التأخير
Deterministic	حتمي أو محدد
Differential Frequency Hopping (DFH)	القفز الترددي التفاضلي
Direct Phase Picking (DPP)	انتقاء الطور بشكل مباشر
Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)	نثر الطيف بالتالي المباشر
Diversity	تباعدية
Duty Cycle Distortion	تشويه عرض النبضة
Early-Late PD	كاشف طور إثنائي
Fall Time	زمن الهبوط
Fast Frequency Hopping (FFH)	القفز الترددي السريع
Filter-Type CDR	استعادة الساعة والمعطيات بتقنية الترشيح
Fine Acquisition	التزامن الدقيق
Finite Impulse Response (FIR)	استجابة نبضيه محدودة
Follower Jammer	المشوش الملاحق
Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)	نثر الطيف بالقفز الترددي
Frequency Shift Keying (FSK)	الترميم بالإزاحة الترددية
Hopping Sequence	سلسلة القفز
Initial Synchronization	التزامن البدئي
Intercept	الاعتراض
Intermediate Frequency	التردد البيني

Inter-Symbol-Interference (ISI)	التداخل بين الرموز
Jamming	التشويش
Jitter	ارتعاش
Jitter Tolerance	سماحية الارتعاش
Late Entry	الدخول المتأخر
Low Pass Filter (LPF)	مرشح تمرير منخفض
Master-Slave	رئيس وتابع
Message-Driven FH (MDFH)	القفز الترددي المحكوم بالمعطيات
Modulation	ترنيم
Modulus	جمع مقيس
Moving Average Filter	مرشح الوسطي المتحرك
Multiple Tone Jammer	المشوش متعدد النغمات
Non Return to Zero (NRZ)	ترميز عدم العودة إلى الصفر
Open-Loop	حلقة مفتوحة
Oversampling	إعتيان فائض
Partial-Band Noise (PBN)	ضجيج على مجال ترددي جزئي
Partial-band Noise Jamming (PBNJ)	التشويش ذو الطابع الضجيجي على حزمة جزئية
peer-to-peer	ند لند
Phase Detector (PD)	كاشف طور
Phase Picking	انتقاء الطور
Phase-Locked Loop (PLL)	حلقة إقفال الطور
preamble	البادئة
Pseudo Noise (PN)	عشوائية مفترضة / شبه عشوائية
Received Signal Strength Indicator (RSSI)	مؤشر قوة الإشارة المستقبلية
Replay Attack	هجوم إعادة الإرسال
Rise Time	زمن الصعود
Seed	بذرة
Signal Detection	كشف وجود الإشارة
Signal-to-Noise Ratio (SNR)	نسبة الإشارة إلى الضجيج
Slow Frequency Hopping (SFH)	القفز الترددي البطيء
Tracking	تعقب
Tracking Bandwidth	عرض حزمة الملاحقة
Trellis	تعريشة أو تشبيكة
Tunable Filter	المرشح المولف
Voltage-Controlled Delay Line (VC DL)	خط تأخير محكوم بالجهد
Voltage-Controlled Oscillator (VCO)	مهتز محكوم بالجهد

## مقدمة

يعتبر نشر الطيف بالقفز الترددي (FHSS) Frequency Hopping Spread Spectrum من التقنيات التي تؤمن مناعة لأنظمة الاتصالات الحديثة ضد التشويش Jamming والاعتراض Intercept لدرجة تعتبر نوعاً ما جيدة. ولكن يبقى هذا النظام عرضة للهجوم وخاصة إذا ما تواجدت ثغرات في تصميم النظام ككل، وبمراحل وخوارزميات التزامن على وجه الخصوص؛ لما تمثله من أهداف سهلة للهجوم الإلكتروني.

يتم تنفيذ نشر الطيف بالقفز الترددي بتغيير حامل الإشارة المرسل من تردد راديوي إلى آخر عند مجالات زمنية ثابتة وبشكل شبه عشوائي بحيث يكون تسلسل هذه الترددات متعارف عليه مسبقاً بين عقد الاتصال ومحدد تماماً بالاعتماد على سلسلة عشوائية مفترضة Pseudo Noise (PN) تسمى سلسلة القفز Hopping Sequence. وتنقسم أنظمة القفز الترددي إلى نوعين تبعاً لعدد البتات المرسل في زمن القفزة الواحدة. فهناك أنظمة القفز البطيء Slow Frequency Hopping (SFH)، وفيها يكون زمن القفزة من مضاعفات زمن البت. وهناك أنظمة القفز السريع Fast Frequency Hopping (FFH)، وفيها يكون زمن البت الواحد يحوي قفزة واحدة أو أكثر.

### ١-١ - حوافز العمل بأنظمة القفز الترددي

هناك العديد من الفوائد من استخدام تقنية القفز الترددي تميزه عن الإرسال على تردد وحيد ثابت. فأنظمة الاتصالات ذات الحزمة الترددية الضيقة تعاني من التداخلات بين المستخدمين الذين يتشاركون العمل ضمن الحزمة الترددية ذاتها، وكذلك فإن الخفوت أو التشويش على قناة الاتصال يؤثر سلبياً على كامل النظام. وبالتالي فإن تغيير الحامل الترددي بشكل مستمر بوجود خفوت انتقائي أو تشويش على حزمة ترددية جزئية أو على عدد من قنوات الاتصال سيؤدي لفقد جزء صغير فقط من المعلومات المرسل، وبوجود ترميز قناة مع مبعثر بيئي مناسبين بما يحقق الاستفادة من التباعدية Diversity الزمنية والترددية بأن واحد يمكن إعادة تصحيح الأخطاء الناتجة عن ذلك الفقد.

كما تتيح أنظمة الطيف المنثور مشاركة المجال الترددي بين عدة مستخدمين أو أنظمة اتصال باختيار سلاسل قفز متعامدة أو سلاسل بأقل ترابط ممكن بما يمنع حدوث تداخل كبير أثناء القفز. حيث يمكن اعتبار إشارة القفز الترددي بأنها تكافئ زيادة لحظية في ضجيج استقبال بقية المستخدمين. كما يمكن أن يكون القفز الترددي متكيفاً بحيث يمكن انتقاء قنوات القفز بحيث يتم استبعاد القنوات المتأثرة بالضجيج أو الخفوت بشكل كلي عن نموذج القفز. وهناك ما يميز النشر بالقفز الترددي عن تقنيات النشر الأخرى كالنشر بالتالي المباشر Direct Sequence (DS) هو إمكانية تنفيذ النشر على عرض حزمة ترددية أكبر بكثير وعلى النقيض عن النشر بال DS فليس لزاماً أن يكون المجال الترددي مستمراً وهو ما يسمح باستثمار أمثلي للطيف المتاح.

تستخدم تقنية القفز الترددي في الأنظمة العسكرية بشكل كبير. فبالإضافة لقدرتها على تحييد أثر مختلف أنواع الخفوت والتشويش المتعمد فإنها كذلك تزيد من أمن النظام على اعتبار أن اعتراض الاتصال هو صعب دون معرفة سلسلة القفز الصحيحة. وبملك القفز السريع ميزات مهمة مقارنة بالبطيء منه -على حساب الزيادة في التعقيد التنفيذي- وأهمها زيادة مناعة النظام ضد التشويش والاعتراض، وامتلاكه ميزة الاستفادة المباشرة من التباعدية الترددية، وذلك من مبدأ أن الخفوت الناتج عن تعدد المسارات في المستقبل له ارتباط بالتردد وبالتالي ارسال المعطيات ذاتها على ترددات مختلفة يزيد احتمالية وصولها للمستقبل بشكل صحيح.

## ١-٢- أثر المشوشات على أنظمة القفز الترددي

المشوش التقليدي الذي يقوم بإرسال إشارة ضجيجية بتردد وحيد له أثر قليل على أداء نظام القفز الترددي. وهو مما يجبر المشوش على الأقل باتجاه زيادة مجاله الترددي بحيث يغطي كامل مجال القفز (BBN Broadband Noise)، أو جزء منه (PBN Partial-Band Noise) أو اتباع أساليب أكثر تعقيداً في هجومه الالكتروني. المشوشات الذكية تحاول تركيز كامل استطاعتها المحدودة ببث إشارات -ليست بالضرورة ذات طابع ضجيجي- على قناة واحدة مع ملاحظة ترددات القفز للنظام المراد جعله خارج الخدمة وهو ما يطلق عليه اسم المشوش الملاحق Follower Jammer، أو يتم توزيع الاستطاعة على عدة قنوات مختارة كما في حالة المشوش متعدد النغمات Multiple Tone Jammer. من الممكن أن تتم عملية انتقاء هذه القنوات بشكل عشوائي بحيث يكون الهدف فقط جعل الاتصال رديء أو خارج الفاعلية، أو أن تكون هذه القنوات محددة تماماً بهدف ضرب تزامن النظام ككل وذلك بعد تحليل نظام القفز واستقراء المعلومات المفيدة عنه. في الاتصالات الصوتية يمكن للتشويش على جزء من المعلومات المتبادلة أن يكون كافياً لجعل الاتصال ككل غير فعال بسبب رداءة الجودة وانعدام الوضوح بالكلام. فعلياً التشويش على ٣٠% من الاتصال الصوتي التماثلي (أو أقل منه في الاتصالات الرقمية) هو كاف تماماً ويعتبر هدفاً ومعياراً جيداً للمهاجم الالكتروني يسعى لتحقيقه [1: p.468].

المشوش الملاحق البارح له القدرة على التحديد اللحظي للحميز الترددي من الطيف الذي يتم استخدامه حالياً، ومن ثم يقوم بتوليد إشارة تشويش بما يتوافق مع تسلسل القفز. من الطرق المتبعة للتخلص من المشوش الملاحق هو استخدام معدلات قفز سريعة بما يحقق حرمان المشوش الملاحق من الوقت الكافي لمسح الطيف وتحديد الترددات المستخدمة.

## ١-٣- أهمية التزامن في أنظمة القفز الترددي

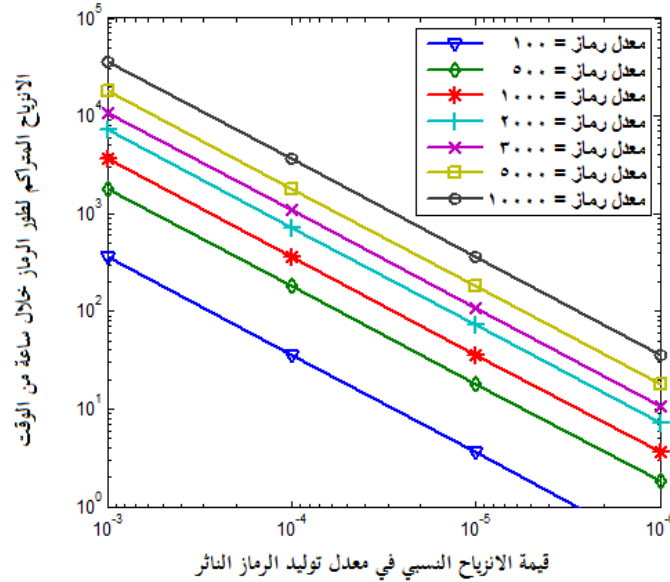
يمكن الانتفاع من جميع ميزات تقنية نثر الطيف بافتراض وجود تزامن جيد بين المرسل والمستقبل. يقصد بالتزامن الجيد هو أن يتم وصول الإشارات المرسل إلى المستقبل بتوافق دقيق في موضع القفز الحالي في نموذج القفز لكل منهما - أي تزامن طور الرماز الناثر code phase - ومع ضمان التوافق أيضاً في معدل سرعة توليد الرماز (code rate). فالرماز هو المفتاح لإعادة فك نثر المعلومات المرغوبة وأيضاً لنثر الإشارات الغير مرغوبة، وبالتالي غياب هذا التزامن يجعل كامل النظام خارج الخدمة.

غياب التزامن ينتج عادة بسبب وجود مشاكل الارتفاع بطور وتردد الحامل وكذلك الإنزياحات في معدل سرعة الرماز. من الجيد أن معظم هذه الإشكاليات يمكن التغلب عليها باستخدام منابع ترددية وزمنية دقيقة في عقد الاتصال. من الناحية النظرية، معرفة المستقبل للزمن الحقيقي عند المرسل والمسافة التي تفصله عنه بدقة جيدة تكفي لإلغاء مشكلة التزامن بينهما. كما يجب أخذ أثر دوبلر بالحسبان في الأنظمة التي تتميز بعقد متحركة. حيث تساهم هذه الحركة في إحداث إنزياحات ترددية على كل من تردد الحامل ومعدل الرماز. كما يمكن للتغيرات النسبية الطارئة على مسافة الاتصال أو تغير طول مسار انتشار الإشارة أن تؤدي لحدوث تغير نسبي في تزامن طور الرماز. يمكن إهمال دوبلر في حال كان زمن التأخير الناتج عن انتشار الموجة ضمن مسافة الاتصال أقل من دور ساعة الرماز (أي إذا كانت المسافة أقل من  $c/R$ ، حيث  $c$  هي سرعة الضوء و  $R$  هي معدل القفز). بشكل عام قد تكون هذه المتطلبات غير متوفرة أو مكلفة جداً، وبالتالي فإن وجود أي انزياح في تردد ساعة مولد الرماز مهما كان صغيراً عن قيمته الحقيقية سيؤدي لحدوث أخطاء وانحرافات متراكمة في طور الرماز، وهو ما يستدعي بالضرورة إجراء عمليات إعادة تصحيح لتموضع طور الرماز وملاحقة التزامن بشكل دوري.

يعتبر التزامن البدئي للاتصال بأنه المشكلة الأصعب في أنظمة الطيف المشور، وخاصة عند الانطلاق من حالة غياب أي معرفة مسبقة بالتوقيت أو وجود معلومات ضئيلة غير كافية لاسترجاع تزامن العقد في الشبكة. فمثلاً تستدعي طبيعة الاتصالات التكتيكية بالضرورة العمل بنظم الشبكات التي يكون الانضمام إليها أو/ والخروج منها بشكل "ديناميكي" عشوائي (كما في الشبكات الغائية مثلاً). وبالتالي إمكانية ضم عقدة جديدة لشبكة تعمل بتقنية القفز الترددي تستدعي معرفة تلك العقدة للتردد المستخدم لحظياً في الشبكة، كما أنها بحاجة لمعرفة سلسلة القفز الخاصة بالشبكة أو نقطة الانطلاق فيها (أو بحاجة معرفة القفزات المخصصة لحمل معلومات التزامن). كما يمكن للاتصال في الشبكات التكتيكية أن ينقطع لفترات مما يجعل المهترزات في عقد الشبكة تنحرف وتنحاز عن قيمتها الفعلية بشكل كبير بحيث يصبح خطأ التوقيت كبيراً لا يمكن ملاحظته أو إيجاداه بالسرعة المطلوبة. ولذلك تلجأ بعض أنظمة القفز الترددي لاستخدام رموز مرجعية تساعد على تقليل خطأ التوقيت. ولكن يمكن للاستخدام المتكرر لهذه الرموز أن

يعرض تلك الآلية في التزامن للرصد ويجعلها فريسة سهلة الاستهداف من قبل أطراف غير مرغوبة. وبالتالي فإن التزامن هو قضية حرجة ومهمة جداً لهذه الشبكات.

يبين الشكل (١-١) قيمة الإنزياحات المتراكمة لطور الرماز الناثر بدلالة الانزياح النسبي في معدل توليده بين المرسل والمستقبل خلال ساعة واحدة من الزمن وذلك عند سرعات قفز مختلفة. كما هو واضح فإن ازدياد دقة المنابع الزمنية المستخدمة يقلل من الارتياح الحاصل بطور سلسلة القفز. كما يفيد الشكل بحساب بعض المعاملات التصميمية لنظام القفز الترددي، مثل تقدير أقل مجال ارتياح بطور سلسلة القفز الذي يجب البحث ضمنه على التزامن، وتحديد الفترة الزمنية التي يجب إعادة مزامنة العقد مع بعضها البعض بشكل دوري قبل فقدان التزامن بشكل كلي، وكذلك فإنه يعطي فكرة عن الفترة الزمنية المفيدة لملاحقة التزامن [2: p.223].



الشكل ١-١ الإنزياحات المتراكمة لطور الرماز الناثر بدلالة الانزياح النسبي في معدل توليده بين المرسل والمستقبل خلال ساعة واحدة من الزمن وذلك لمعدلات قفز مختلفة

#### ١-٤-٤-٤ تعريف المسألة المطروحة

يوجد العديد من المنهجيات والطرق المتبعة في مزامنة القفز الترددي. المطلوب في هذا البحث هو التركيز على آليات تحقيق التزامن الحشن للقفز الترددي لأهميتها في المحافظة على فاعلية النظام ككل وبقائه ضمن الخدمة المرجوة منه، وكونها إحدى التحديات في أنظمة الطيف المنثور. كما يجب الاهتمام بطرق وحلول استرجاع تزامن النظام انطلاقاً من حالة غياب أي معرفة مسبقة بالتوقيت أو وجود معلومات ضئيلة غير كافية لاسترجاع تزامن العقد في الشبكة.

قد تكون مراحل التزامن التقليدية لبعض أنظمة القفز الترددي غير كافية، حيث من الممكن أن تبقى بعض الأخطاء بالتوقيت بعد إجراء التزامن الدقيق للقفز الترددي، وهو ما يسبب عدم تحصيل المعطيات بشكل أمثلي - أي ابتعاد

توقيت اعتيان الإشارة عن منتصف زمن البت. هذه الأخطاء تنشأ من التأخيرات الزمنية المتغيرة الناتجة عن حركية أحد طرفي الاتصال أو كليهما. ولذلك يمكن استخدام مرحلة تزامن خاصة إضافية هدفها معالجة هذه التأخيرات واسترجاع تزامن توقيت القفز وذلك لكل إطار ترسل. وبالتالي يجب تصميم النظام بحيث يكون كل إطار يجوي رموز مرجعية محددة تساعد على استرجاع هذا التوقيت.

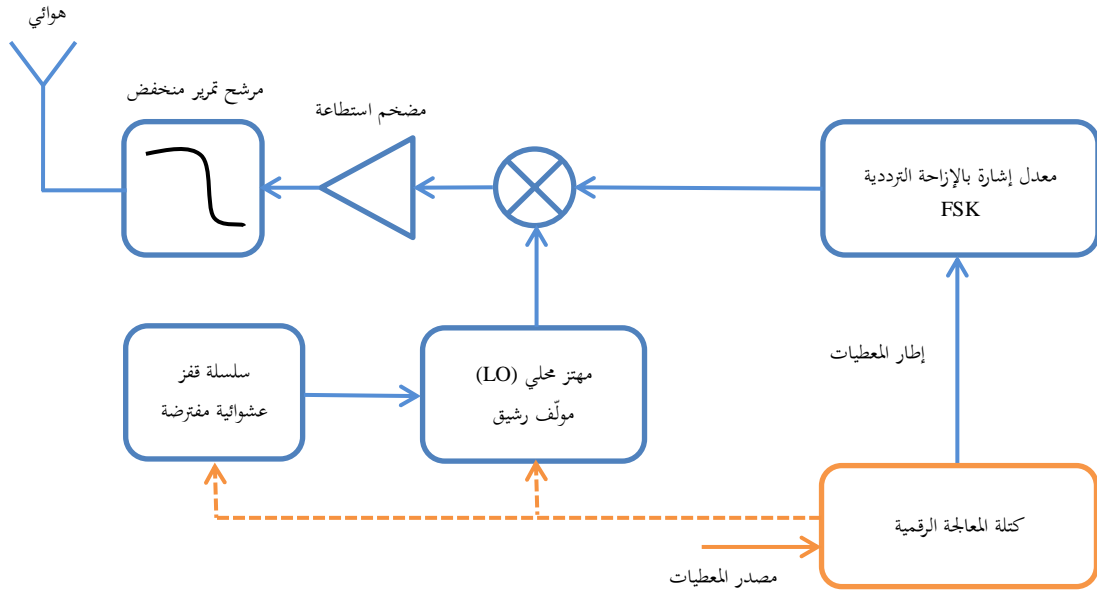
كما أن عملية كشف وجود إشارة القفز الترددي على دخل المستقبل لها أهمية بالغة وخاصة ضمن ظروف اتصال صعبة من خفوت وتشويش أو عند الاتصال بمحدود حساسية المستقبل. ولذلك فالاعتماد على قياس الاستطاعة المستقبلية بالكشف له محدودات كثيرة، وذلك من حيث التأخيرات في استجابة المستقبل وكذلك أثر الضجيج والتشويش الكبير على الاستطاعة المستقبلية والحد من القدرة على الكشف الصحيح، وخاصة في مجال الترددات العالية جداً VHF والذي يستخدم في نظام القفز الترددي المعمول عليه والمراد تطويره.

النظام الذي تم العمل عليه هو نظام اتصالات معد للعمل بتقنية القفز الترددي في مجال الترددات العالية جداً VHF. في هذا النظام تأخذ القناة عرض حزمة 25KHz، وبالمجموع يوجد 2400 قناة متاحة للاستخدام. وكما الشائع في أنظمة القفز الترددي الرقمية؛ يُستخدم الترميز بالإزاحة الترددية FSK (Frequency Shift Keying) للتعديل مع كشف غير متماسك في المستقبل. يبين الشكل (1-2) والشكل (1-3) بنية كل من المرسل والمستقبل وتموضع كتلة المعالجة الرقمية فيهما على التوالي. كما هو واضح؛ مهمة كتلة المعالجة في المرسل هي استلام المعطيات من المصدر وتأييرها ومن ثم تجزئتها بما يتناسب مع فترة القفز المتبعة وإرسالها لتعديلها على ترددات مختلفة تبعاً لسلسلة القفز التي يتم العمل بها. أما في المستقبل، فتبدأ مهمة كتلة المعالجة بكشف وجود الإشارة (Signal Detection) يليها البحث عن التزامن البدئي للقفز الترددي واستعادة الساعة والمعطيات (Clock and Data Recovery) CDR وبعدها يتم تعقب تزامن سلسلة القفز وفك تأيير المعطيات. وبالتالي فإن هدف البحث بالمجموع هو تصميم كتلة المعالجة الرقمية وتنفيذها مع مراعاة أن يتم تصميم إطار معلومات نظام القفز الترددي بما يضمن كشف وجود الإشارة في المستقبل وتحقيق التزامن الكافية كاسترجاع ساعة النظام و إعادة توقيت القفز. وتحديد زمن البت بما يحقق معدل معطيات مقبولاً وسرعة قفز عالية وتزامناً أمثلياً.

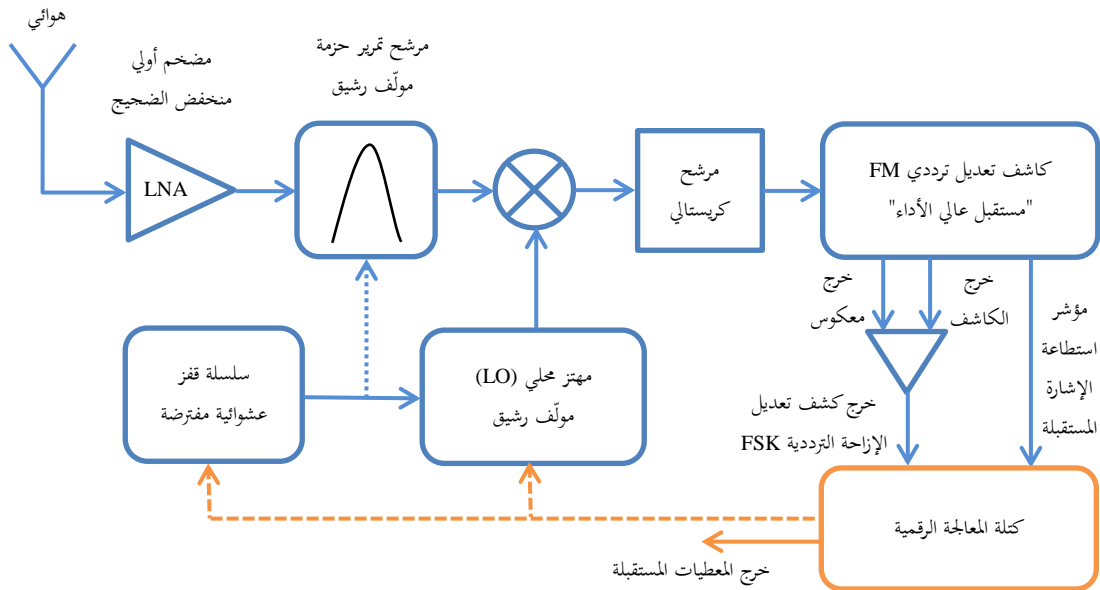
تكمن مشكلة البحث في بناء تزامن النظام ككل بشكل أمثلي بما يحقق صلابة مقبولة للنظام عند العمل بظروف محيطية مناوئة من ضجيج وتشويش وبالأخص المشوش الملاحق. الأمثلة تُحقق عن طريق اتباع منهجيات وطرائق جيدة للترزامن بحيث تزيد من صعوبة رصد تزامن النظام واستهدافه، مع العمل على زيادة سرعة القفز بشكل كافٍ لتحديد عمل المشوش الملاحق.

من أهم ما يحد من سرعة القفز ويؤثر بشكل أساسي على تزامن النظام هو سرعة استجابة المستقبل، وذلك من لحظة وصول الإشارة إلى الهوائي وانتهاء بكشف تعديل المعطيات وتحصيل قيمة الاستطاعة المستقبلية على خرج المستقبل.

هذه الاستجابة قد تتغير مع تغير قيمة تردد القفز وقوة الإشارة المستقبلية، وبالتالي فهي غير ثابتة. هنا تكمن أهمية قياس أو تقدير التأخيرات في مراحل الاستقبال والناجحة عن الفلتر والتوليف على ترددات القفز وكشف تعديل الإشارة.



الشكل ١-٢ : مخطط مخطط المرسل في نظام القفز الترددي، ويبين كتلة المعالجة الرقمية المراد تطويرها



الشكل ١-٣ : مخطط المستقبل في نظام القفز الترددي، ويبين كتلة المعالجة الرقمية المراد تطويرها

## ١-٥- الأعمال المنجزة

يمكن تلخيص الأعمال التي تم إنجازها من خلال هذا العمل بما يلي:

- ❖ التوصل لآلية تزامن بدئي لنظام القفز الترددي صلبة وقادرة على ممانعة التشويش والضجيج مع تقليل احتمالية رصد هذه الآلية واستهدافها بالاستخدام المتكرر، وذلك بما يتناسب مع إمكانيات النظام الذي يتم العمل عليه وضمن غياب المرجعية الزمنية الدقيقة. تعتمد هذه الآلية المقترحة على الدمج بين تقنيتي القفز الترددي التفاضلي *DFH* والقفز الترددي المحكوم بالمعطيات *MDFH* بالإضافة إلى استغلال الكشف الجيد للمرباط في تقنية الطيف المنثور بالتتالي المباشر *DS*. كما تمكن هذه الآلية في التزامن من تجنب العمل بفلسفة رئيس وتابع، وتعطي حلاً لمشكلة الدخول المتأخر لعقد اتصال النظام.
- ❖ اقتراح مفهوم جديد لشكل القفزة الترددية بعيداً عن الشكل التقليدي المتبع للتغلب على تأخيرات الاستقبال بتوظيف زمن "ميت" في بداية ونهاية كل قفزة. هذا المفهوم مبني على فكرة كشف القفزات الترددية اعتماداً على المعطيات المكشوفة كبديل عن مؤشر قوة الاستطاعة المستقبلية *RSSI* الذي يعاني من تأخيرات استجابة كبيرة ومتغيرة تبعاً لقيمة تردد القفز واستطاعة الإشارة المستقبلية. هذا المفهوم الجديد لشكل القفزة الترددية يسمح بزيادة سرعة القفز العظمى التي يمكن للنظام العمل عليها وبالتالي زيادة أمن النظام وقدرته على إقصاء أثر المشوش الملاحق.
- ❖ تحسين طرق كشف وجود الإشارة بوجود ضجيج محيطي عالٍ وذلك بالاعتماد على عدد التقاطعات الصفرية للمعطيات المكشوفة بدلاً عن معيار الاستطاعة المستقبلية وعتبة الكشف المرفقة بها.
- ❖ اقتراح طريقة جديدة خاصة بمزامنة ساعة النظام واستعادة المعطيات بالاعتماد على بنية رقمية تماماً وباستخدام مفهوم الإعتيان الفائض الأعمى للمعطيات المستقبلية. هذه الطريقة باستعادة الساعة تحقق كشف سريعاً وموثوقاً للتوقيت وذلك أخذاً بالاعتبار وجود ارتعاش *Jitter* وضجيج نبضي يشوه خرج كاشف التعديل الرقمي. تمت مقارنة هذه الطريقة بأخرى تستخدم تقنية الإعتيان الفائض الأعمى ذاتها واعتبارها مرجعية لفحص الأداء، حيث تم بناء محاكي باستخدام بيئة *Simulink* والبيئة البرمجية في *Matab* لكل من الطريقتين المقترحة والمرجعية، وبالنتيجة تم تحقيق أداء مميز بحالتي ارتعاش عشوائي وجيبي (ستاتيكي).

## ١-٦- هيكلية الأطروحة

نوجز مراحل العمل ضمن هذه الأطروحة وفق فصلين على النحو التالي:

في الفصل الثاني من هذه الأطروحة تم عرض استراتيجيات وآليات تحقيق التزامن البدئي للقفز الترددي وتم أيضاً تسليط الضوء على آليات حديثة في القفز الترددي كالقفز الترددي المترابط (أو التفاضلي) والقفز الترددي المحكوم بالمعطيات، ويليها شرح للآلية المقترحة للترزامن، وتوضيح فكرة كشف الإشارة باعتماد المعطيات بدلاً عن استطاعة الإشارة المستقبلية، ثم عرض لنتائج القياسات العملية لتأخيرات استجابة المستقبل وكيفية التغلب عليها، وأخيراً عرض التصميم الكلي لإطار المعلومات بما يحقق أعلى سرعة قفز ممكنة.

في الفصل الثالث تم عرض المبادئ والطرق التقليدية لاستعادة الساعة والمعطيات، وتم التركيز على تقنيات الإعتيان الفائض للمعطيات وذلك لأنها تمتلك بمعظمها تصاميم بنية رقمية كاملة أو جزئية، وهو ما يتيح إمكانية تنفيذها بشكل برمجي في كتلة المعالجة المراد تصميمها في نظام القفز الترددي المعمول عليه. ثم يليها شرح للخوارزمية الجديدة المقترحة لاستعادة الساعة (التوقيت) والمعطيات ومقارنة أدائها بالطريقة المرجعية عبر المحاكي.

وفي نهاية الأطروحة تم عرض الملخص وتحديد الآفاق المستقبلية لهذا العمل وإمكانيات التطوير والمتابعة.

## مقدمة

يشكل التزامن طور سلسلة النشر أهمية بالغة في الأنظمة التي تعتمد تقنية القفز. ولضمان نجاح الاتصال يجب أن تحافظ تلك الأنظمة أيضاً على التزامن محكم لتوقيت القفز بين المرسل والمستقبل. وبشكل عام يمر التزامن بمرحلتين، حيث تقوم هذه الأنظمة أولاً بتصحيح الإنزياحات الكبيرة بالتوقيت وتسمى مرحلة التزامن البدئي للاتصال Initial Synchronization، وحالما تصبح هذه الإنزياحات صغيرة كفاية للحصول على قياس ترابط مقبول بين سلسلتي القفز؛ تبدأ عملية الملاحقة للتغيرات الطفيفة وتسمى مرحلة تعقب التزامن tracking [2: p.209].

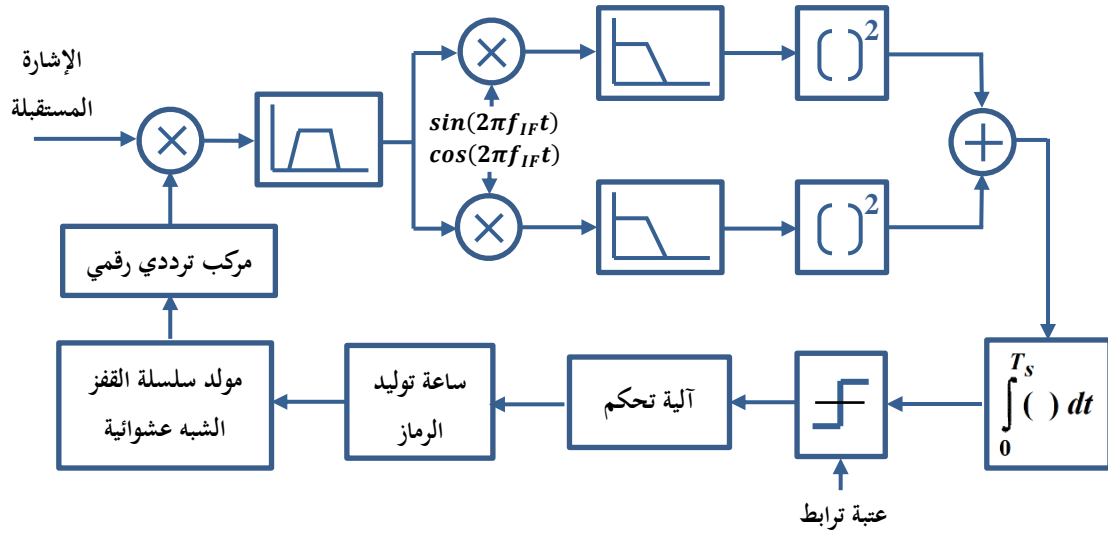
التزامن البدئي هدفه إعادة التزامن سلسلة القفز حتى الوصول لتطابق جزئي في فترات القفز، وهو ما يكافئ نموذجياً جعل خطأ التوقيت من رتبة جزء من زمن القفزة الواحدة، ولذلك تسمى هذه المرحلة أيضاً بمرحلة التزامن الخشن Course Acquisition. وهنا يأتي دور مرحلة التعقب للوصول إلى التزامن الدقيق Fine Acquisition لسلسلة القفز والتي تقوم بخفض خطأ التوقيت لرتبة أجزاء من زمن الرمز. ويمكن لهذه المرحلة أن تستخدم بشكل تكراري على عدة قفزات وذلك بغية الوصول لتقارب صحيح للتوقيت.

سيتم في هذه الفقرة التركيز على آليات تحقيق التزامن الخشن لأهميتها في المحافظة على فاعلية النظام ككل وبقاءه ضمن الخدمة المرجوة منه، وكونها المشكلة الأصعب في أنظمة الطيف المنثور. كما تم الاهتمام بعرض طرق وحلول خاصة باسترجاع التزامن النظام انطلاقاً من حالة غياب أي معرفة مسبقة بالتوقيت أو وجود معلومات ضئيلة غير كافية لاسترجاع التزامن العقد في الشبكة. وأخيراً تم عرض بعض تقنيات القفز الترددي الحديثة التي تختلف عن القفز التقليدي بشكل أساسي باستغنائها عن المولد الشبه عشوائي لسلسلة القفز.

## ٢-١-١- استراتيجيات تحقيق التزامن الأولي في أنظمة القفز الترددي

### ٢-١-١-١- البحث التسلسلي عن التزامن الأولي

يبين الشكل (٢-١) المخطط الصندوقي لمستقبل يعمل بتقنية البحث التسلسلي أو ما يعرف بالمرابط الفعال أو المرابط المنزلق. يقوم المستقبل بهذه التقنية أثناء البحث عن التزامن بجعل مولد الرماز لديه يعمل بمعدل مختلف عن ذلك الموجود في طرف الإرسال. ويتم حساب الترابط مع إشارة القفز الترددي عن طريق مزج الإشارة المستقبلية -المصحوبة بالضجيج- مع إشارة المولد الترددي المحكوم رقمياً بقيمة رماز النشر الصادر عن المولد الشبه عشوائي PN (تردد المولد يجب أن يولّف على قيمة التردد المراد استقباله مضافاً إليه قيمة التردد البيني (Intermediate Frequency (IF)). وبعد ترشيح خرج المازج الترددي يتم كشف طاقة الإشارة بواسطة كاشف غير متماسك بالحزمة القاعدية. ولتعزيز القدرة على الكشف تتم مكاملة الطاقة على فترة زمنية محددة - تكافئ عدداً من القفزات- ومن بعدها يتم اتخاذ القرار.



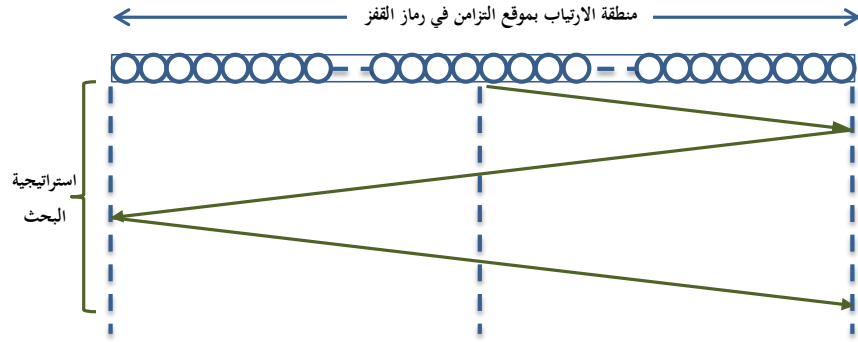
الشكل ٢-١ : المخطط الصندوقي لمستقبل في نظام FH يعمل بتقنية المرابط الفعال [1: p.452]

في حال عدم وجود التزامن بالقفز فإن إشارة الضجيج وحدها هي ما يتم كشفها وبالتالي يكون متوسط خرج المكامل هو الصفر. أما عند حدوث تطابق ولو كان جزئياً بسلاسل القفز (أي وجود عدم توافق بالتوقيت أقل من زمن فقرة واحدة) فإن إشارة الفرق على خرج المازج الترددي ستحتوي المركبة الترددية للتردد البيئي وبالتالي قيمة الترابط ستكون أكبر حتماً من الصفر تبعاً لدرجة التطابق. بنهاية زمن حساب الترابط والمكاملة لكل مرحلة من مراحل البحث التسلسلي يتم النظر لقيمة الطاقة المتراكمة على عدد من القفزات، فإذا ما تجاوزت تلك القيمة عتبة محددة يتم اتخاذ القرار بتحقيق التزامن البدئي للقفز الترددي ووقف عملية البحث، وإلا فإنه يتم إزاحة طور الرماز الناتج لقيمة جديدة والاستمرار بعملية البحث.

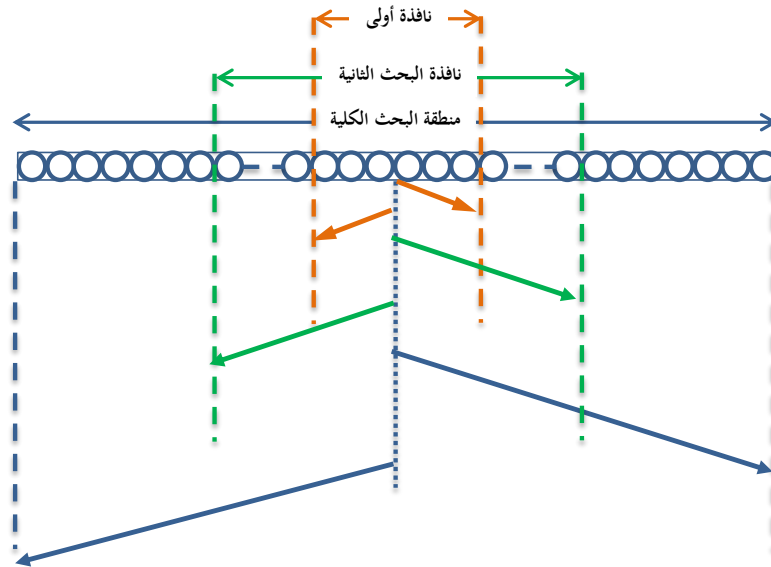
إجرائية البحث التسلسلي عن التزامن طور سلسلة القفز تتم بعملية مسح لجميع مواقع السلسلة التي من المتوقع أن تنحصر ضمنها الإنزياحات وتسمى منطقة الارتباب. وترتبط آلية المسح بالتصور السابق لطبيعة هذه الإنزياحات واحتمالات حدوثها. فإذا ما كان لموقع التزامن الصحيح احتمال حدوث متساوٍ ضمن جميع الإنزياحات الممكنة ضمن مجال الارتباب - أي أنه يتبع توزيعاً منتظماً - فإن استراتيجية المسح المثلى هي القيام بالمرور على جميع المواقع بشكل تسلسلي ودوري كما هو مبين بالشكل (٢-٢).

أما في حال وجود معرفة مسبقة بأن احتمالات موقع التزامن تتبع توزيعاً غير منتظم، فمن الممكن أمثلة استراتيجية المسح بما يسمح بجعل زمن البحث أصغرياً. فمثلاً إذا افترضنا أن منطقة الارتباب هي ضمن ما يكافئ زمن  $\pm 10ms$  مع احتمال 90% أن يكون التوقيت الصحيح للرماز هو ضمن  $\pm 2ms$ . وبالتالي فإنه من البديهي أن تركز استراتيجية المسح على البحث أولاً ضمن مجال الارتباب الصغير ذي الاحتمالية الكبيرة ومن ثم متابعة البحث على المجال الأكبر.

وبالتالي هذه الاستراتيجية تتبع طريقة تقسيم مجال الارتياح الكلي إلى مجالات بحث أصغر فأصغر اعتماداً على معرفة مسبقة لشكل تابع الكثافة الاحتمالية لإنزياحات طور الرماز [2: p88-94][3: p195]. الشكل (٢-٣) يوضح آلية تقسيم مجال الارتياح لنوافذ بحث صغيرة.



الشكل ٢-٢ : استراتيجية المسح لمجال الارتياح في طور سلسلة القفز بالطريقة التسلسلية الدورية.

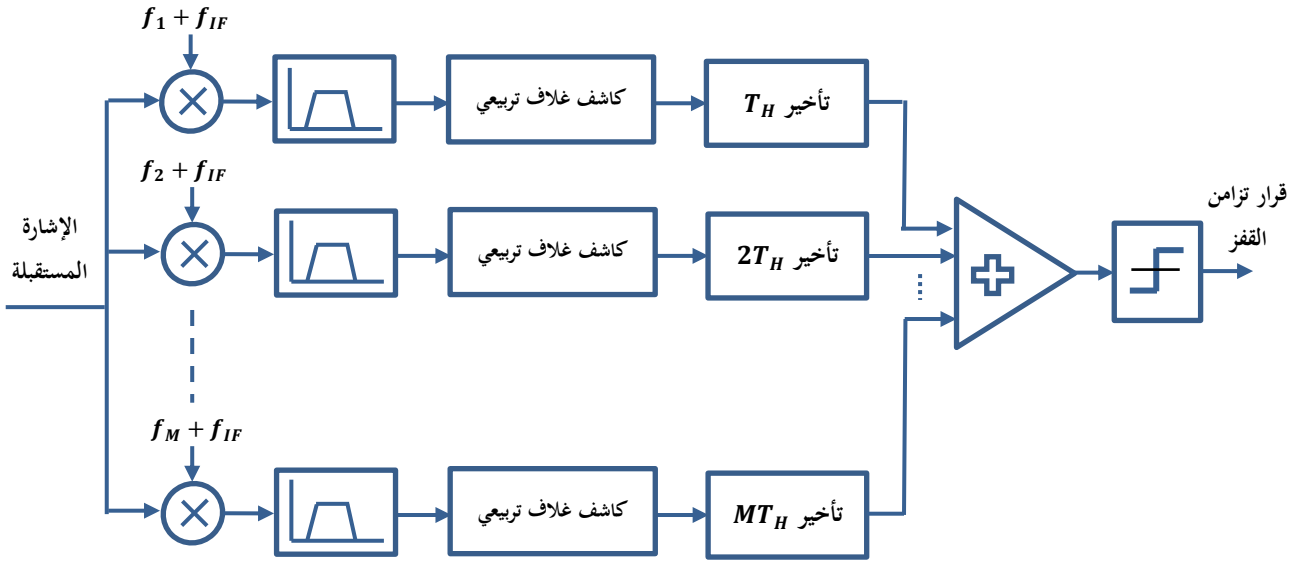


الشكل ٢-٣ : استراتيجية المسح لمجال الارتياح في طور سلسلة القفز باستخدام النوافذ المتسعة

إن ميزة تقنية البحث التسلسلي هي بساطتها في التنفيذ ومن مساوئها أن زمن البحث عن التزامن عن طريق مسح جميع الإزاحات الممكنة لموضع طور الرماز قد يستغرق زمناً طويلاً وفي حال حدوث ارتياح كبير بالطور فإن عملية البحث تلك تصبح غير عملية. ومن الممكن لعملية التزامن أن تستغرق ساعات أو حتى أياماً في حال اعتماد هذه التقنية فقط. عملياً يستخدم المرابط الفعال دائماً مسبقاً بطرق داعمة أخرى تساعد على تقليص مسافة الخطأ بتموضع طور الرماز ما يساهم بالحد من دائرة البحث ويعطي للمرابط المنزلق فاعلية أكبر.

## ٢-١-٢- البحث عن التزامن الأولي باستخدام مرشح توافق

تعتبر بنية المرباط المؤلف من عدة مرشحات توافق من أولى التقنيات المتبعة في مزامنة أنظمة FHSS والتي تعمل على التوازي لكشف تسلسل عدد من القفزات الترددية. يوضح الشكل (٢-٤) بنية المستقبل في هذه التقنية، حيث يتم اختيار سلسلة مقتطفة من رماز النثر لتوليد عدد من القفزات الترددية المتتابعة وليكن عددها  $M$  والتي يمكن اعتبارها كنموذج تزامن يحاول المستقبل أن يتوافق معها عن طريق المزج الترددي للإشارة المستقبلية مع جميع هذه الترددات (مع إضافة إزاحة بمقدار قيمة التردد البيئي). وبعد ذلك يتم حساب طاقة الإشارات على مخارج عمليات الترباط بواسطة مرشح حزمة وكاشف غلاف تريبي. وبإجراء عملية تأخير مناسبة لخرج كل كاشف يكون مجموع هذه القيم معبراً عن طاقة الترباط ل  $M$  قفزة متتالية ويصبح بالإمكان مقارنتها مع عتبة محددة لاتخاذ القرار بانتهاء مرحلة التزامن الأولي.



الشكل ٢-٤: المخطط الصندوقي لمستقبل في نظام FH يعمل بتقنية المرشح الموافق [1: p450]

يحقق مرشح التوافق تزامناً سريعاً لنماذج قفز ترددي قصيرة على حساب احتمالية كبيرة للكشف الكاذب. كما أنه يتطلب إمكانية توليد عدة ترددات في وقت واحد وبنياً ضخماً يتضمن عدة كواشف ومرشحات. أي الأداء مقابل الكلفة والتعقيد البنائي. كما يمكن استخدام مرشح التوافق لكشف نماذج قصيرة متضمنة داخل نماذج قفز أطول بكثير، كما أن هذا الكشف يمكن أن يستخدم لتهيئة التزامن بالبحث التسلسلي الذي يعتبر أكثر وثوقية وأكثر تلائماً لمزامنة السلاسل الطويلة. وبالتالي فإن دمج مرشح التوافق وآلية البحث التسلسلي يعطي طريقة هجينة بالبحث عن التزامن الخشن للقفز الترددي، حيث تؤمن هذه الطريقة موازنة لأداء الطريقتين من حيث سرعة البحث الجيدة لمرشح التوافق واحتمالية الكشف الخاطيء القليلة للبحث التسلسلي.

### ٢-١-٣- التزامن باستخدام سلاسل قفز قصيرة

هناك آلية أخرى للترزامن تستخدم سلسلتي قفز مختلفتين، واحدة قصيرة خاصة بالترزامن والثانية طويلة خاصة بنقل المعطيات. تستخدم السلسلة القصيرة لتأمين مرحلة التزامن الخشن للسلسلة الطويلة إما عن طريق جعل الارتفاع بطور سلسلة النثر صغيراً وضمن الحدود المقبولة أو عن طريق إرسال معلومات تساعد على التزامن. هذه الطريقة فعالة نوعاً ما ولكن من ناحية أمن النظام فإن سلسلة التزامن ممكن أن تصبح عرضة للكشف عند الاستخدام المتكرر لعمليات المزامنة. وبالتالي تقوم العقدة الفاقدة للترزامن بمسح كل قناة من قنوات الشبكة لمدة محددة من الوقت إلى أن يتم كشف وجود الشبكة وإعادة سلسلة القفز بما يماثل نموذج القفز المكتشف للشبكة. سيئة هذه الآلية في التزامن هي القفز المتكرر على الرمز الناثر القصير ما يسمح لأي طرف خارجي بمسح جميع قنوات الاتصال وتسجيل لحظات الاستقبال إلى أن يتم تحديد سلسلة القفز بشكل كامل.

### ٢-١-٤- المزامنة عبر إرسال معلومات تزامن خاصة

يمكن زيادة أمن الاتصال عن طريق استخدام سلسلة قفز طويلة جداً ويتم فيما بعد بهدف المزامنة مشاركة معلومات توقيت خاصة تساعد على كشف الطور الحالي في رماز النثر. ممكن للعقد استخدام توقيت مرجعي (GPS مثلاً). المشكلة هنا تكمن في إيجاد طريقة آمنة لمشاركة معلومات التزامن.

أبسط طريقة لتحقيق تزامن دائم بين عقد الاتصال هو أن يتم تخصيص قناة ترددية لهذا الغرض يتم عن طريقها تبادل معلومات التزامن، ولكن يمكن للتشويش على هذه القناة أن يجعل كامل النظام خارج الخدمة. ومن الطرق أيضاً أن يتم إرسال معلومات التزامن على جميع قنوات الاتصال أثناء القفز إما بإطار تزامن خاص أو بتضمينها في ترويسة رزم المعطيات. وبالتالي فإن المستقبل ببساطة يقوم بالإصغاء إلى أية قناة لحين استقبال معلومات التزامن الخاصة بالشبكة.

### ٢-١-٥- المزامنة عن طريق الكشف والتقدير التسلسلي لرماز القفز

طريقة الكشف التسلسلي تطبق بشكل عام عبر أنظمة النثر بالتالي المباشر [4: p233]. في [5] تم اقتراح حوارزمية لكشف نموذج القفز الترددي عن طريق كشف عدد كافٍ من القفزات، ولكن يتم ذلك بافتراض أن كل تردد يظهر مرة واحدة فقط في النموذج. وبالتالي فهي حالة خاصة لا يمكن تعميمها على سلاسل القفز الطويلة المصممة لتكون شبه عشوائية.

## ٢-١-٦- المزامنة عبر تخصيص قفزات ترددية لإرسال معلومات التزامن

تتبع هذه الآلية طريقة إقحام معلومات التزامن ضمن معطيات نظام القفز الترددي، بما يفيد تحقيق كل من المزامنة الأولية والملاحقة. يتم تصنيف القنوات المتاحة للقفز في النظام لنوعين، قنوات خاصة بالتزامن وقنوات خاصة لنقل المعطيات. حيث يتم التصنيف بالاستعانة بمعلومات تعريف خاصة بالشبكة. يتم إرسال رسالة التزامن ضمن زمن قفزة واحدة من القفزات المحددة لكل إطار. أي أن النظام يعتمد تقنية القفز الترددي البطيء.

يتم قبيل إرسال أي إطار تحديد عدة معاملات، كاختيار قناة من قنوات التزامن لإرسال معلومات التزامن ضمنها، وكذلك ترتيب القفزة ضمن تسلسل القفزات في إطار المعلومات التي ستقابل موضع قناة التزامن المختارة، وكذلك تحديد قنوات إرسال المعطيات لبقية القفزات ضمن الإطار. يوّد المرسل بدايةً رسالة التزامن بشكل عشوائي ويقوم بإقحامها كقيمة ابتدائية أو بذرة Seed انطلاقاً للمولد الشبه عشوائي PN لسلسلة القفز. ثم يتم تشغيل المولد وتحديد المعاملات المذكورة سابقاً والمميزة للإطار. وفي الأطارات اللاحقة يقوم المرسل بإضافة قيمة اعتباطية محددة مسبقاً للقيمة الحالية لطور سلسلة القفز ويستخدمه كمعلومة تزامن جديدة ويقوم بتحميلها للمولد PN لتحديد معاملات الإطار التالي. هذا يجعل إمكانية إعادة بناء أو توقع سلسلة القفز المستقبلية عن طريق مراقبة تسلسل القفزات صعبة جداً [6]. أما فيما يخص المستقبل، فإنه يقوم لإعادة كسب التزامن مع الشبكة بالانتظار على أحد قنوات التزامن إلى أن يتم استقبال معلومات التزامن. وإذا لم يتم استقبال التزامن خلال فترة محددة يقوم المستقبل بالانتقال لقناة تزامن أخرى حرصاً على أن تكون القناة السابقة قد تعرضت لخفوت قوي أو حدوث تشويش متعمد أو أي تداخل مع شبكات أخرى.

تتميز هذه الطريقة ببساطتها وقدرة تنفيذها باستخدام كاشف وحيد ولكنها متاحة فقط لأنظمة القفز الترددي البطيء والبطيء جداً، حيث أن كامل معلومات التزامن يتم إرسالها في فترة قفز واحدة، وبالتالي فإن إمكانية تجنب التشويش وبالأخص المشوش الملاحق لا يمكن تحقيقها.

## ٢-١-٧- المزامنة باستخدام النثر بالتتال المباشر

تعتمد هذه الطريقة على نثر معلومات التزامن المفيدة للقفز الترددي باستخدام سلسلة نثر DS خاصة. هذا الدمج بين تقنيتي نثر الطيف يعطي صلابة لآلية التزامن ضد الاعتراض والتشويش. تم طرح هذه الآلية في [7] من أجل مزامنة القفز الترددي في الشبكات الغائية Ad-hoc. وكما هو مقترح فإن المرسل يقوم ببث ثلاث رسائل تفيد على الترتيب في مزامنة طور سلسلة DS وتقدير توقيت القفز الترددي وأخيراً إيصال معلومات التزامن الخاصة بال FH.

الرسالة الأولى هي عبارة عن معطيات بقيمة واحدة منشورة بسلسلة DS بحيث تساعد المستقبل على تقدير طور سلسلة التتال المباشر بما يقابل اللحظة التي يتم فيها الحصول على أعظم قيمة ترابط على خرج مرشح توافق سلسلة

النشر DS. والرسالة الثانية تحوي على كلمة عشوائية W منثورة أيضاً بسلسلة DS حيث يتم في المستقبل اعتيان خرج المرابط باللحظات المتوافقة مع الطور المقدّر سابقاً لسلسلة النشر DS. ومن ثم يتم تمرير الناتج على مرشح متوافق مع الكلمة W لتقدير التوقيت الصحيح للقفز الترددي. أما الرسالة الثالثة فتحوي معلومات التزامن الخاصة للقفز الترددي.

يفترض في هذا النظام أن جميع العقد لديها معرفة بالتوقيت الصحيح بوحدة الساعة، وبالتالي فإن رسالة التزامن تتضمن فقط قيمة الثواني أو أجزاء الثواني ضمن ساعة واحدة. يتم بث الرسائل الثلاثة على جميع الترددات بما يسمح للمستقبل باختيار أي قناة للتصت. وبالتالي هذا يعطي صلابة إضافية للنظام لتجنب التداخلات والتشويش في حال كان للمستقبل القدرة على كشف حالة القناة. كما أن هذه الآلية مناسبة لسلاسل القفز الطويلة جداً والتي لا تتمتع بنماذج معروفة.

## ٢-٢-٢- آليات حديثة للقفز الترددي

### ٢-٢-١- القفز الترددي المترابط Correlated FH

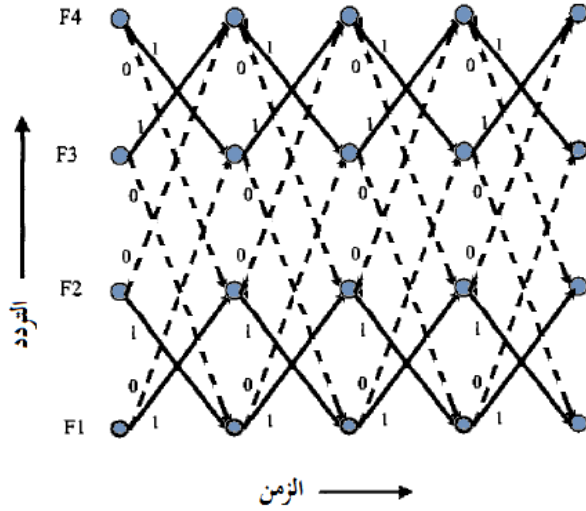
تم اقتراح هذه التقنية عام ١٩٩٦ من قبل شركة Sanders الأمريكية وأطلقوا عليها مصطلح *Correlated Hopping* تحسين نظم القفز الترددي التقليدية العاملة ضمن حزمة ترددات HF بما يحقق زيادة في معدل معطيات الإرسال وزيادة في سرعة القفز. وبالنتيجة تم الحصول على نظام صلب بمعدل معطيات 19.2kbps وسرعة قفز 5khps وبمعدل خطأ بالبت ممتاز [8].

يعتمد نظام القفز الترددي المترابط على تقنية القفز الترددي التفاضلي *Differential Frequency Hopping* (DFH) في ترميز المعطيات. حيث يتم تحديد قيمة التردد المرسل آنياً اعتماداً على كل من قيمة رمز المعطيات المراد إرساله وتردد القفزة السابقة، وبالتالي فإن تسلسل ترددات القفز محكوم بتسلسل المعطيات المرسل. ويمكن كشف الرموز المستقبلية عن طريق العلاقة بين ترددات القفزات المتجاورة. أي إذا افترضنا  $X_n$  هو رمز المعطيات الحالي و  $F_{n-1}$  هو تردد القفزة السابقة فإن تردد القفزة الحالية يكون:

$$F_n = G(F_{n-1}, X_n)$$

حيث  $G$  هو تابع الانتقال الترددي المتعارف عليه بين عقد الاتصال. يمكن النظر إلى التابع  $G$  على أنه نموذج قفز خاص ضمن بيان موجه تمثل العقد فيه مجموعة الترددات المتاحة، بينما كل وصلة من الوصلات بين العقد تكون معنونة بأحد كلمات ترميز المعطيات المحتملة. وبناء عليه فإن سلسلة الترددات المرسل تشكل تعريشة خاصة *trellis* كتلك المستخدمة في توضيح وتحليل الترميز التلغرافية، كما في الشكل (٢-٥). من أجل مجموعة من الترددات المتاحة للقفز وليكن عددها  $N_H$  يتم إنشاء مخطط بياني مؤلف من  $N_H$  عقدة وكل عقدة ترتبط بـ  $2^{N_{BPH}}$  عقدة، حيث  $N_{BPH}$  هو

عدد البتات المرسل بالقفزة الواحدة. وبالتالي لتحديد تسلسل القفزات الترددية لكتلة معطيات محددة يتم أولاً تجزئة هذه المعطيات لكلمات مؤلفة من  $N_{BPH}$  بت، ومن ثم إجراء الانتقال بين العقد ضمن المخطط البياني ابتداءً من عقدة مختارة، ويتم إرسال قفزة جديدة عند كل انتقال وقيمة التردد المخصص بالعقدة التالية.



الشكل ٢-٥ : مثال توضيحي لتعريشة الانتقالات الترددية

في طرف الاستقبال يتم كشف الترددات المستقبلية بالاعتماد على قوة الاستطاعة المستقبلية على كل القنوات الترددية المتاحة. ويتم استخلاص المعطيات المرسل من تسلسل القفزات الترددية عن طريق تابع الانتقال الترددي العكسي، أي:

$$X_n = G^{-1}(F_{n-1}, F_n)$$

يمكن للمستقبل اعتماد أحد طريقتين في الكشف. إما أن يتم كشف الرموز بشكل إفرادي؛ وإما أن يتم الكشف بشكل تسلسلي للرموز باعتماد إحدى خوارزميات فك ترميز التعريشة. يتميز الكشف التسلسلي بقدرته على اتخاذ قرارات لينة لتقدير قيمة المعطيات المستقبلية، حيث يقوم المستقبل بتمرير الترددات المكشوفة على تعريشة فك الترميز، والتي بدورها لها القدرة على نبذ إشارات التشويش والتداخل بشكل تدريجي طالما أن هذه الإشارات لا يتبعها تسلسل عقد صحيح بما يوافق التعريشة، كما أن لها القدرة على ملاحظة وتدارك فقدان الكشف لبعض القفزات بين العقد وذلك بمتابعة تسلسل القفزات الصحيحة التي تم كشفها.

يعتبر نظام القفز الترددي المترابط مناسباً لتطبيقات النفاذ المتعدد نظراً لأدائه، ويتم ذلك باستخدام تعريشات مختلفة لعدة مستخدمين. وعلى الرغم من أن القفز الترددي المترابط هو بالأصل يعتمد القفز الترددي البطيء فإنه تبين في [9] لدى مقارنة أداء  $DFH$  مع القفز الترددي السريع  $FFH$  من ناحية القدرة على تحمل التداخل بين المستخدمين،

أن  $DFH$  من الناحية النظرية يسمح لوجود عدد مستخدمين أكثر منه في  $FFH$  وبالتالي فهو أكثر تفضيلاً في شبكات *ad hoc*.

تمت في [10] مقارنة نظام القفز التفاضلي بالتقليدي من حيث القدرة على نبد التشويش ذو الطابع الضجيجي على حزمة جزئية من طيف النظام *Partial-band Noise Jamming (PBNJ)*. وقد تبين أن نظام  $DFH$  مع كشف إفرادي للرموز يعطي نتائج أسوأ مما هو عليه في القفز التقليدي وذلك بسبب انتشار أخطاء الكشف في الترميز التفاضلي، بينما باستخدام الكشف التسلسلي فإن نظام  $DFH$  يعطي نتائج أداء أفضل بكثير من القفز الترددي التقليدي.

على الرغم من أن هذه التقنية قد تم اقتراحها أصلاً للعمل في الاتصالات ضمن حزمة  $HF$ ؛ إلا أنه تم تعميمها فيما بعد للعمل في أي مجال ترددي. حيث تم في [11] استغلال أداء  $DFH$  بهدف تخفيف أثر الخفوت الناتج عن المسارات المتعددة ومقاومة التداخلات في الاتصالات تحت الماء.

نستخلص مما سبق أن الدمج بين تعديل المعطيات ونموذج القفز الترددي هو أهم ما يميز القفز الترددي المترابط عن القفز الترددي التقليدي. حيث أن المعطيات صارت مخفية ضمن القفزات مما يعطيها حصانة ضد فك الترميز من قبل المستقبلات الغير مرغوبة، والقفزات أصبحت عبارة عن نغمات خالية من أي ترينيم، وهذا ما يضمن على النظام مناعة ضد المشوش الملاحق. كما أن القفز في هذا النظام هو متزامن بشكل آلي. ولكن يجب الانتباه إلى أن كشف التعريشة التي تمثل نموذج القفز يفقد النظام أمانه، كما أن المستقبل يجب أن يكون له الإمكانية لاستقبال كافة الترددات المتاحة عند كل قفزة ليقيم بكشف الترددات المرسلة.

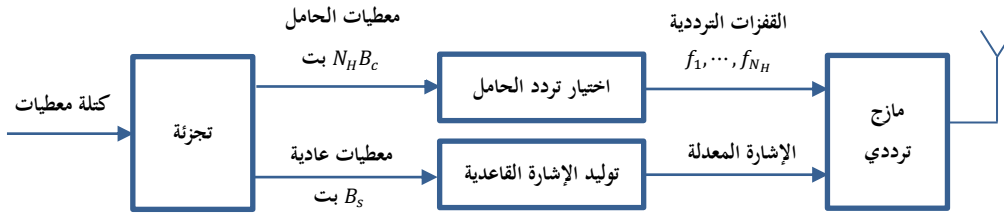
### ٢-٢-٢ القفز الترددي المحكوم بالمعطيات (MDFH) Message-Driven FH

بالرغم من أن تقنية القفز الترددي هدفها هو تأمين مناعة ضد التشويش إلا أن ذلك يتم على حساب خسارة كبيرة في كفاءة استغلال الحزمة الترددية. والطرق التقليدية لتحسين الكفاءة الطيفية باستخدام فضاء أكبر لكوكبة ترينيم المعطيات (مثلاً استخدام  $M-FSK$  بدلاً عن  $BFSK$ ) تبقى قاصرة ومحدودة. ولتحسين هذه الكفاءة الطيفية تم في [12] اقتراح نظام قفز ترددي قادرة على استثمار بعد إضافي لترينيم المعطيات إضافة لبعدي الزمن وفضاء كوكبة الترميز، يعتمد هذا البعد الجديد على التحكم بترددات القفز. كما تم أيضاً اقتراح تطوير لهذه التقنية تسمح بنقل المعطيات على حوامل متعددة بهدف تحقيق زيادة إضافية بالكفاءة الطيفية.

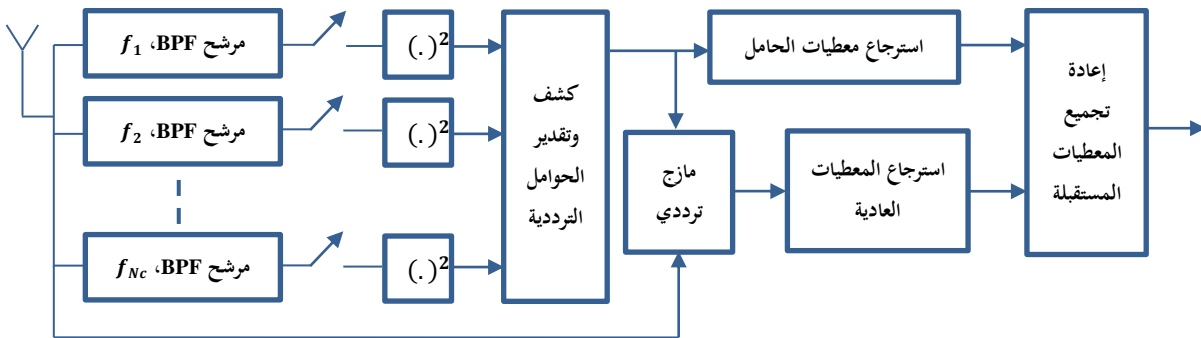
الفكرة الأساسية هي أن جزءاً ضخماً من رسالة المعطيات يستخدم لاختيار تردد القفز بدلاً عن السلسلة شبه العشوائية في القفز الترددي التقليدي وذلك ما يمكن من تحقيق إرسال معطيات إضافية بدون أي كلفة إضافية من

حيث الحزمة الترددية والاستطاعة. أطلق على هذا النظام مصطلح *Message-Driven FH (MDFH)* أي القفز الترددي المحكوم بالمعطيات.

فمثلاً إذا افترضنا نظام قفز ترددي سريع بحيث يكون عدد القفزات ضمن زمن الرمز هو  $N_H \geq 1$ ، وأن لهذا النظام القدرة على القفز ضمن مجموعة من القنوات الترددية عددها  $N_C = 2^{B_c}$  (حيث  $B_c$  هو عدد البتات الكافية لتمثيل قناة ترددية واحدة) وأن للنظام كوكبة ترقيم من  $M$  موضع (مثلاً في حالة *M-FSK*) وبالتالي كل رمز مرسل يمكن تمثيله باستخدام  $B_s = \log_2(M)$  بت). وبالتالي في طرف الإرسال كما هو مبين في الشكل (٦-٢) يتم تجزئة المعطيات إلى كتل بطول يساوي  $L = N_H B_c + B_s$ . أي أن كل كتلة تحوي  $N_H B_c$  بت لتحديد ترددات القفز ضمن فترة الرمز وتسمى معطيات الحوامل و  $B_s$  بت معطيات عادية يتم ترقيم الحوامل الترددية بها. في المستقبل المبين بالشكل (٧-٢) يتم كشف الترددات المرسله بشكل أعمى عن طريق استخدام بنك مرشحات يغطي جميع القنوات المتاحة، ويتم اتخاذ قرار كشف القناة الصحيحة بالاعتماد على قوة استطاعة الإشارة المستقبلية على خرج كل مرشح. ويتم استخراج معطيات الحوامل بعد إجراء عملية تقدير لتسلسل الترددات ل  $N_H$  قفزة. أما المعطيات العادية فيتم تقديرها بشكل مستقل لكل قفزة ومن ثم باستخدام مبدأ غالبية التصويت لجميع التقديرات وعددها  $N_H$  يتم اتخاذ القرار النهائي لقيمة هذه البتات.



الشكل ٦-٢ : المخطط الصندوقي للمرسل في نظام القفز الترددي المحكوم بالمعطيات MDFH [12]



الشكل ٧-٢ : المخطط الصندوقي للمستقبل في نظام القفز الترددي المحكوم بالمعطيات MDFH [12]

كما ذكرنا سابقاً فإن كشف وتحديد الترددات المستقبلية يتم عن طريق بنك مرشحات، وبالتالي لا حاجة لإجراء عمليات تزامن لترددات القفز والتي هي من المتطلبات القاسية في القفز الترددي التقليدي. وهذا يتيح للنظام استخدام معدلات قفز أسرع. وبما أن القفز يتم عبر المعطيات فإن القفزات لا يمكن توقعها، وهو ما يزيد من مناعة النظام. ولكن بالمقابل فإن طبيعة اتخاذ قرار بالكشف اعتماداً على قوة الإشارة المستقبلية تضعف من قدرة نظام *MDFH* على ممانعة التشويش. بفرض وجود تشويش أحادي الحزمة؛ تعتبر تقنية *MDFH* فعالة جزئياً ضمن سيناريو تشويش قوي وتفوق كثيراً بأدائها القفز الترددي التقليدي وذلك أن وجود تشويش قوي على الإشارة من شأنه أن يحسن استطاعة الإشارة الفعلية في طرف الاستقبال مما يزيد احتمالية كشفها بشكل صحيح. ولكن إذا ما كانت استطاعة المشوش قريبة من استطاعة الإشارة - يسمى بهذه الحالة بالتشويش المزيف - فإنه يصبح من الصعب لمستقبل *MDFH* التمييز بين الإشارة الصحيحة وإشارة التشويش وهو ما يسبب انخفاضاً بالأداء. ولذلك فإن التطويرات التي تم العمل عليها لهذا النظام تصب في مجملها على تحسين قدرته على نبذ الإشارات الغير مرغوبة.

تم في [13] اقتراح مخطط *MDFH* ممانع للتشويش عن طريق استبدال المعطيات العادية بمعلومات تعريف *ID* أثناء عملية الإرسال. هذه المعلومات *ID* تولد عن طريق خوارزميات تعمية بمفتاح مشترك بين المرسل والمستقبل وعن طريقها يمكن للمستقبل أن يحدد الحامل الترددي الحقيقي للإشارة. وفي [14][15] تم إضافة ترميز لتصحيح الأخطاء بهدف تحسين أداء نظام *MDFH* في قنوات الخفوت. حيث تتم في *MDFH* مقابلة معطيات الحوامل مباشرة بأحد الترددات المتاحة وذلك بدون أي ترميز لتصحيح الأخطاء، وبالتالي عند حدوث خطأ أثناء عملية كشف الحامل الترددي الصحيح فإن هذا الخطأ لا يمكن تداركه.

### ٢-٣- تصميم آليات التزامن والكشف وبناء كتلة المعالجة الرقمية للنظام المعمول عليه

متطلبات الأمان في الاتصالات التكتيكية تستدعي أن يتم القفز الترددي وفق نموذج نثر طويل جداً بحيث تكون فترة إعادة تكرار تسلسل الترددات المولدة من رتبة أيام أو أسابيع أو أكثر من ذلك. وبالتالي فإن مزامنة رماز بهذا الطول مع الحفاظ على أعلى درجات الأمان هي ليست مهمة سهلة يمكن حلها بالطرق التقليدية، التي كما تبين سابقاً أهما عرضة للكشف وخاصة عند ضرورة إرسال معلومات التزامن بشكل منتظم ومتكرر. كما أن إجراءات التزامن يجب أن تتم دائماً بشكل خفي وغير ملحوظ لأي عقدة من خارج النظام.

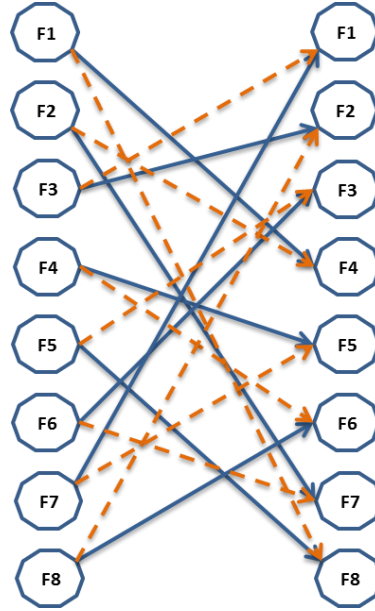
كما هو واضح في مخطط النظام في الشكل (١-٣)، فإن المستقبل معد لكشف تردد وحيد بشكل غير متماسك. وبالتالي لا يمكن تنفيذ أي من القفز الترددي المحكوم بالمعطيات والقفز الترددي التفاضلي بالشكل الذي تم عرضه في الفقرات السابقة. ولذلك السبب أيضاً فقط آلية البحث التسلسلي لتزامن طور رماز القفز ممكن تطبيقها.

يحتوي نظام القفز الترددي الذي نعمل به على مولد سلاسل شبه عشوائية  $PN$  بطول 580 رقيقة. وهو ما يؤمن سلسلة نثر طويلة جداً بزمن تكرار من رتبة عدة سنين من التشغيل الدائم. وهو ما يجعل إمكانية رصد أو تحليل نموذج القفز بغية القدرة على التنبؤ بالقفزات هي شبه مستحيلة. ولكن بسبب طبيعة الاتصالات التكتيكية من غياب الاتصال لفترات طويلة من الزمن؛ وبنسبة الاختلافات الصغيرة في دقة توليد ساعة التحكم بمعدل القفز؛ فإن الإنزياحات المتراكمة في طور سلسلة القفز ممكن أن تتجاوز قدرة النظام على إعادة التصحيح باستخدام آلية البحث التسلسلي وخاصة ضمن ظروف غياب المرجعية الزمنية الدقيقة في عقد الاتصال. وبالتالي لاسترجاع تزامن النظام لابد لعقد الاتصال من إجراء تبادل لمعلومات خاصة تفيد في تحقيق التزامن البدئي للقفز الترددي. هذه المعلومات يجب أن يتم إرسالها وفق ما يحقق متطلبات أمن الاتصال، ويتضمن ذلك التوصل لاحتمالية ضعيفة لكل من إمكانية التشويش والاعتراض والاستغلال. وهو ما يمثل الهدف لهذا البحث.

المنحى الذي تم اتباعه في هذا البحث هو التفكير في كيفية الاستفادة من آليات التزامن وتقنيات القفز الترددي التي تم سردها في الفقرات السابقة، مع محاولة إيجاد حلول مشتقة - بما يناسب إمكانيات النظام الحالية - عن طريق دمج طرق مختلفة بما يعزز إيجابيات كل طريقة ويلغي سلبياتها. وبالنتيجة تم التوصل لآلية تزامن صلبة وقادرة على ممانعة التشويش عن طريق الدمج بين تقنيتي القفز الترددي التفاضلي  $DFH$  والقفز الترددي المحكوم بالمعطيات  $MDFH$  بالإضافة إلى استغلال الكشف الجيد للمرابط في تقنية الطيف المنشور بالتالي المباشر  $DS$ .

### ٢-٣-١- مقترح آلية صلبة لتحقيق التزامن الحشن لطور سلسلة القفز

متطلبات الأمان تستدعي عدم اعتماد آلية التزامن على ترددات ثابتة أو نماذج قفز ثابتة أو قصيرة يمكن رصدها وكشفها بسهولة. ولذلك تم الاعتماد على تقنية القفز التفاضلي بهدف تحقيق قفز ترددي بتزامن آلي مضمون لتتابع القفزات أثناء تبادل معلومات التزامن  $S_D$ . وهذا القفز يتم بشكل شبه عشوائي بما يتوافق مع المعلومات  $S_D$  وتسلسل العقد المقابلة لها في تعريشة الانتقالات الترددية وذلك ابتداءً من عقدة مختارة، كما في المثال المبين في الشكل (٢-٨). وبسبب عدم قدرة النظام على كشف أكثر من تردد واحد في الاستقبال فإن المعلومات المستقبلية على التردد الموافق لعقدة ما في التعريشة تفيد فقط في تحديد القفزة التالية. وبالتالي لا يمكن الإفادة من ميزة الكشف التسلسلي للرموز كما في القفز التفاضلي. وهذا يتطلب بالمقابل التفكير بآلية جديدة لتعزيز كشف الرموز في المستقبل باحتمالية قليلة للخطأ وإمكانية جيدة لنبد التشويش والضجيج على قناة الاتصال مع إلغاء اعتماد الكشف على قوة الاستطاعة المستقبلية.

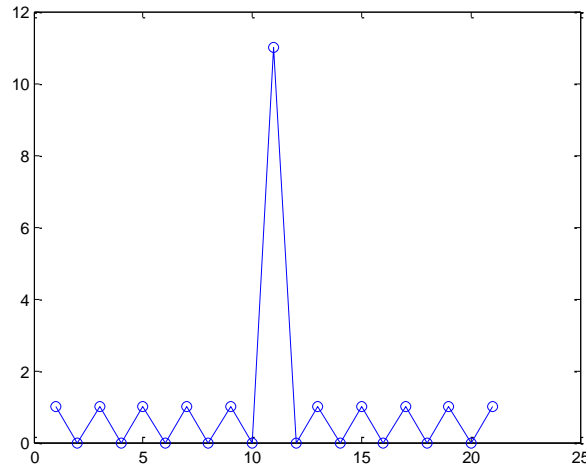


الشكل ٢-٨ : مثال لتعريشة الانتقالات الترددية لمجموعة مؤلفة من ٨ ترددات

تم الاعتماد على تقنية نثر الطيف بالتتابع المباشر للإفادة من الكشف الجيد للمرابط في الاستقبال مع الحفاظ على عرض الحزمة لقناة الاتصال ثابت. أي بمعنى آخر يتم إرسال معلومات التزامن بمعدل رمز بطيء بحيث تصبح فترة الرمز بما يقابل الزمن لعدد من البتات وليكن  $N_S$ . أي أن النثر الزمني للرموز يتم باستخدام سلسلة نثر فريدة وقصيرة طولها  $N_S$ . يتم اختيار  $N_S$  بما يضمن تحقيق قفز ترددي بطيء أثناء عملية التزامن بمعدل سرعة مقبول - حسب إمكانيات المشوش الملاحق المراد تجنبه، مع مراعاة الحفاظ على احتمالية كشف جيدة لسلسلة النثر  $DS$ . إذا افترضنا  $T_B$  هو زمن البت في النظام وبالتالي سرعة القفز العظمى أثناء مرحلة التزامن الأولي تساوي  $1/(N_S \times T_B)$ .

وفي طرف الاستقبال يتم كشف التردد المرسل عن طريق توليف المركب الترددي الرشيق على ذات التردد المتوقع كشفه - طبعاً بعد إضافة قيمة التردد الوسيط- ومن ثم قياس قوة الترابط بين سلسلة DS المتبعة في النثر والمعطيات المستقبلية على خرج الكاشف الغير المتناسك. وهذه القيمة تصبح أعلى ما يمكن عندما تكون السلسلة المرسله والمستقبلة على ارتصاف تام. وللحصول على كشف جيد يجب أن تحظى سلسلة النثر DS على تابع ترابط ذاتي أمثلي. الشكل (٢-٩) يظهر الترابط الذاتي لسلسلة النثر التي تم اختيارها بطول  $N_S = 11$  رقيقة وبقيمة وسطية صفرية.

يمكن اعتبار مجموعة الترددات المستخدمة في تعريشة الانتقالات الترددية - وليكن عددها  $M$  - كقناة تحكم خاصة للترامن. يمكن إنشاء قنوات تحكم متعددة وليكن عددها  $N_{ch}$  بحيث يكون لكل قناة مجموعة ترددات مختلفة عن تلك المستخدمة في القنوات الأخرى. يمكن لهذه القنوات أن تتبع التعريشة ذاتها أو تعريشات مختلفة لتحديد الانتقالات الترددية. وهذا يتوجب بالمقابل أن يتم إرسال معلومات التزامن ذاتها على جميع تلك القنوات. هذا يزيد طبعاً في عدد الترددات المستخدمة أثناء عملية التزامن، كما أنه يعطي أرباحية بالنسبة للمستقبل في انتقاء أحد تلك القنوات لاستقبال معلومات التزامن، والتي يمكن اختيارها وفق معيار وجود أعلى نسبة إشارة إلى الضجيج SNR. يسمح استخدام المرابط في الكشف بوجود فاصل زمني بين القفزات المتسلسلة لقناة التحكم الواحدة. وبالتالي يمكن جعل قنوات التحكم تتداخل فيما بينها بشكل مرتب أو بشكل عشوائي، وبالنتيجة نحصل على قفزات شبه عشوائية على ترددات كثيرة - عددها يساوي  $M \times N_{ch}$  - وتصبح إمكانية رصد التعريشة من أي طرف خارجي شبه مستحيلة.



الشكل ٢-٩ : تابع الترابط الذاتي لسلسلة نثر بالتتال المباشر طولها يساوي ١١ بت

### ٢-٣-٢- نوعية المعلومات الخاصة بالترامن وكيفية إرسالها

هناك العديد من أنظمة القفز الترددي التي تتبع في هيكلتها على مبدأ رئيس وتابع *Master-Slave*. حيث تكون العقدة الرئيس هي من تعرف التوقيت الصحيح للشبكة وبالتالي هي المسؤولة عن بقاء الشبكة متزامنة بشكل دائم عن طريق إرسال معلومات التزامن لجميع الأتباع بشكل دوري. تكمن المشكلة هنا أن حدوث فشل في العقدة الرئيس

سيؤثر على الشبكة ككل. طبعاً هذه الهيكلية غير محبذة حالياً في الاتصالات العسكرية التكتيكية لضرورتها لها علاقة بصلاية النظام بحال وجود فقد لعقد ضمن الشبكة وكذلك بهدف التوفير في الطاقة [3]. وبالتالي فإن هيكلية ند لند *peer-to-peer* هي الأفضل، حيث تتيح هذه الهيكلية لأي عقدة إمكانية المزامنة مباشرة مع العقد المجاورة لها في الشبكة، وهو ما يعطي مرونة مرغوبة للشبكة.

ضمن ظروف غياب المرجعية الزمنية الدقيقة في عقد الاتصال في تصميم النظام؛ فقد تم اعتماد بذرة (أو *Seed*) مولد سلسلة القفز كمعلومة خاصة لل التزامن. وبالتالي فإن إعادة حقن هذه البذرة في جميع مولدات عقد الشبكة من شأنه أن يعيد التزامن. بهذه الطريقة تم تحقيق التخلص من فلسفة الرئيس والتابع، كما تم حل مشكلة الدخول المتأخر للشبكة.

*Late Entry*

طبعاً رسالة التزامن يجب أن تكون غير قابلة للفهم أو الاستغلال من قبل أي طرف خارجي مراقب للشبكة. كما أن زمن التزامن الأولي يجب أن يكون قصيراً بحيث لا يؤثر على جودة الاتصال. فمثلاً أكبر تأخير ممكن السماح به في الاتصالات الصوتية هو حوالي 0.5 ثانية. وبما أننا بحاجة لإرسال معلومات تزامن ضخمة من طول مولد السلاسل شبه العشوائية ويساوي 580 بت على جميع قنوات التحكم؛ تم التفكير بالاستعانة بتقنية القفز الترددي المحكوم بالمعطيات *MDFH* بهدف زيادة الكفاءة الطيفية.

يتم تخزين رموز عشوائية *PN* مقابلة لرقم ترتيب كل تردد في التعريشة - أي أنه غير مرتبط بالتردد الحقيقي المرسل بل فقط برقم التردد ضمن التعريشة- بحيث يكون كل رمز بطول 32 بت. وبالتالي لدينا  $M$  رمز مشترك ومخزن عند جميع عقد الاتصال. وبالتالي إذا افترضنا أن للتعريشة مجموعة من العقد  $V_j$  حيث  $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ . وبالتالي فإنه في كل قناة تحكم  $i$ ، حيث  $i \in \{1, 2, \dots, N_{ch}\}$ ، يكون تردد القفز الفعلي المقابل للعقدة  $V_j$  هو  $f_{i,j}$ ، بينما تكون كلمة الترميز العشوائية المقابلة لهذه العقدة هي  $PN_{mod M(shift+j)}$ . حيث *Shift* هي قيمة إزاحة في علاقة التقابل بين ترتيب رقم العقد والرموز العشوائية، ويتم استخدامها لاعتبارات أداء المولد شبه العشوائي.

يتوجب على الطرف الذي يريد المبادرة بالاتصال - بعد انقطاع زمني محدد- أن يقوم بداية بتوليد كلمة عشوائية من  $K$  بت، يتم عن طريقها تحديد البذرة الجديدة للمولد شبه العشوائي، والتي سيتم العمل عليها عند انتهاء مرحلة التزامن الأولي والبدء بإرسال المعطيات الحقيقية. ويقوم بعدها المرسل بتوليد كلمة عشوائية أخرى مؤلفة من  $\log_2 M$  بت لتحديد قيمة الإزاحة *Shift* في علاقة التقابل بين ترتيب رقم التردد والرموز العشوائية. وبالمجمل يصبح لدينا احتمالية مختلفة لقيمة البذرة المولدة. وبعد ذلك يقوم المرسل بتوجيه ال  $(K + \log_2 M)$  بت - التي أصبحت تمثل كلمة التزامن - إلى تعريشة الانتقالات لتحديد تنالي القفزات ابتداءً من العقدة الأولى. ويتم نشر كل بت على  $N_s$  بت باستخدام سلسلة *DS*. يفيد استخدام كلمة تزامن عشوائية أيضاً في تجنب هجوم إعادة الإرسال

*Replay Attack*. عند التصميم يجب مراعاة أن يكون زمن عدد البتات الكلي المرسل على جميع قنوات التحكم محكوماً بالعلاقة التالية:

$$N_{ch} \times N_s \times (K + \log_2 M) \times T_B \leq 0.5 \text{ second}$$

### ٢-٣-٣- زمن استجابة المستقبل وعلاقته بسرعة القفز

من أهم ما يحد من سرعة القفز ويؤثر بشكل أساسي على تزامن النظام هو سرعة استجابة المستقبل، وذلك من لحظة وصول الإشارة إلى الهوائي وانتهاء بكشف تعديل المعطيات وتحصيل قيمة الاستطاعة المستقبلية على خرج المستقبل. هذه الاستجابة قد تتغير مع تغير قيمة تردد القفز وقوة الإشارة المستقبلية، وبالتالي فهي غير ثابتة. هنا تكمن أهمية قياس أو تقدير التأخيرات في مراحل الاستقبال والناجحة عن الترشيح والتوليف على ترددات القفز وكشف تعديل الإشارة.

### نتائج قياس التأخيرات لبعض المراحل الأساسية في القفز الترددي

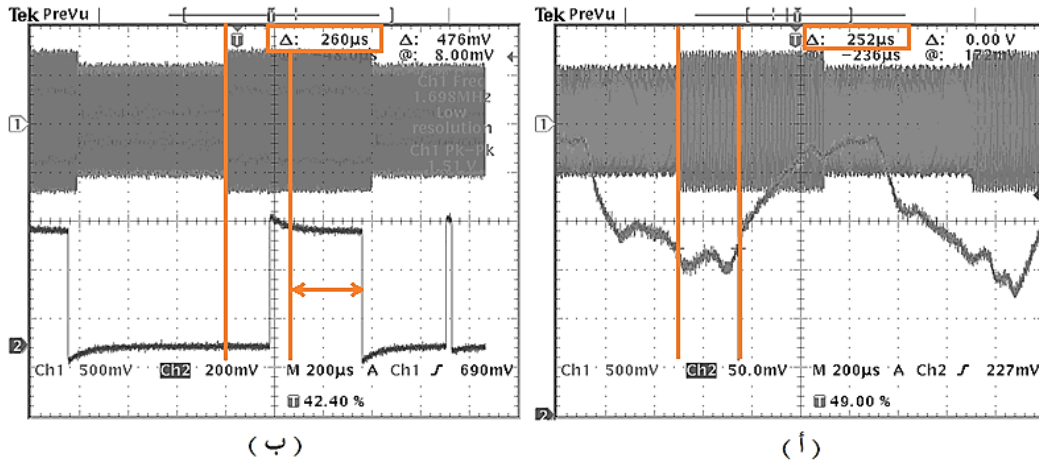
تم قياس التأخيرات في النظام الحالي وكانت النتائج كالتالي:

- ❖ زمن التأخير في استقرار التردد الجديد هو حوالي  $10\mu s$  وذلك من لحظة إرسال أمر القفز للمركب الترددي إلى لحظة استقرار خرج على التردد المطلوب.
- ❖ كما أن زمن استجابة المرشح المولّف Tunable Filter في نقل حزمة التمرير حول التردد الجديد من لحظة إرسال أمر القفز يساوي تقريباً  $10\mu s$ .
- ❖ وفيما يتعلق بالتأخيرات الطارئة على مؤشر قوة الإشارة المستقبلية Received Signal Strength Indicator (RSSI) على خرج الكاشف الغير متماسك، وكما هو مصرح عنه في النشرة الفنية، يكون زمن استجابة الكشف - أو ما يسمى زمن الصعود Rise Time - هو بجوالي  $7\mu s$  وذلك من لحظة كشف وجود إشارة التردد الوسيط على دخل الكاشف، في حين يكون زمن مسك الإشارة - أو ما يسمى زمن الهبوط Fall Time - وذلك من لحظة غياب إشارة التردد الوسيط بعد التوليف على التردد الجديد هو ضمن المجال  $10 \sim 35 \mu s$  وذلك تبعاً لقوة استطاعة الإشارة المستقبلية (أقوى إشارة استقبال تقابل أكبر زمن هبوط). ويتبقى حساب التأخيرات الناتجة عن مراحل الفلتر.

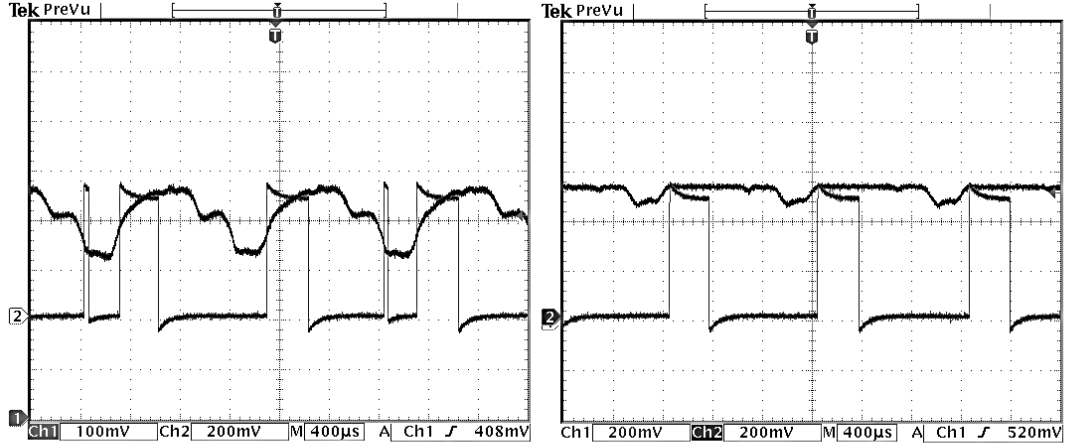
### الآلية المتبعة في قياس زمن استجابة المستقبل والناتج

من أجل قياس زمن استجابة المستقبل، يتم تهيئة المرسل للقفز على ترددتين ثابتين بحيث تحوي كل قفزة على بيتي معطيات بقيم متناوبة '1' ثم '0' وبزمن  $300\mu\text{s}$  للبت الواحد. وبالمقابل يكون المستقبل معد لكشف أحد الترددتين السابقتين بشكل دائم. تم الوصل بين الجهازين عن طريق سلسلة مخمدات متغيرة لدراسة علاقة الاستجابة بقوة الاستطاعة المستقبلية. وتمت الاستعانة براسم إشارة رقمي من طراز Tektronix لإظهار الإشارات المستقبلية بشكل متزامن.

يبين الشكل (٢-١٠ أ) إشارة القفز الترددي على دخل المستقبل وقيمة مؤشر قوة الإشارة، بينما يبين الشكل (٢-١٠ ب) إشارة القفز الترددي على دخل المستقبل وقيمة المعطيات على خرج الكاشف. ومنه يتبين أن زمن التأخير في استجابة المستقبل بالنسبة لكشف المعطيات هو حوالي  $260\mu\text{s}$ . بينما بالنسبة لمؤشر RSSI فبالإضافة لزمن التأخير السابق، استغرق زمن الاستجابة المساعد للوصول للقيمة الفعلية لقوة الاستطاعة المستقبلية حوالي  $280\mu\text{s}$ ، وزمن الاستجابة الهابط هو حوالي  $400\mu\text{s}$ . تبين نتائج القياس أيضاً أن زمن تأخير الاستجابة في كشف المعطيات هو ثابت غير مرتبط بقوة الاستطاعة المستقبلية أو بالتردد ضمن المجال المستخدم، وعلى النقيض تختلف أزمنة الصعود والهبوط في استجابة كشف الاستطاعة تبعاً لتغيرات قوة الإشارة المطبقة، وهو ما يبينه الشكل (٢-١١). في الشكل ذاته يمكن ملاحظة أثر قوة الإشارة المستقبلية على جودة كشف المعطيات عند وجود توافق بين التردد المرسل والمستقبل، كما أنه يبين شكل خرج معطيات الكاشف الغير متماسك بحالة غياب الترابط بين ترددي عمل كل من المرسل والمستقبل، حيث أنه يتم كشف فقط إشارة الضجيج وتظهر على الخرج على شكل نبضات عشوائية الموقع والمدة.

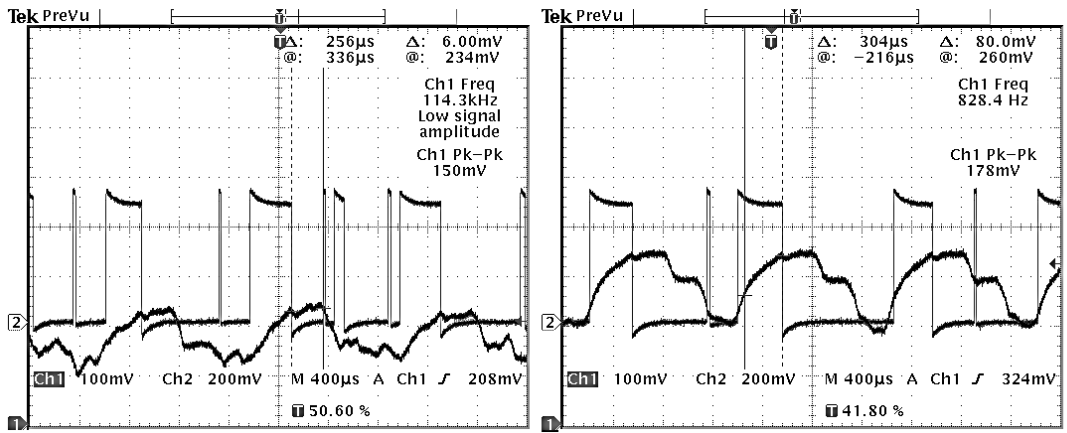


الشكل ٢-١٠ : إشارة القفز الترددي على دخل المستقبل والإشارات المقابلة لها على خرج الكاشف، في (أ) قيمة RSSI وفي (ب) إشارة المعطيات المكشوفة.



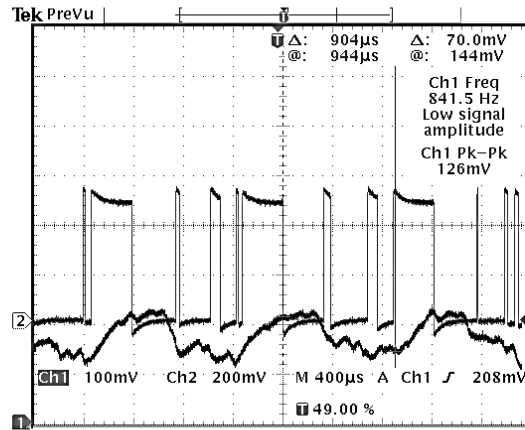
(ب)

(أ)



(ث)

(د)



(ج)

الشكل ٢-١١: منحنيات مؤشر قوة الإشارة المستقبلية والمعطيات على خرج الكاشف أثناء القفز عند قيم استطاعة دخل

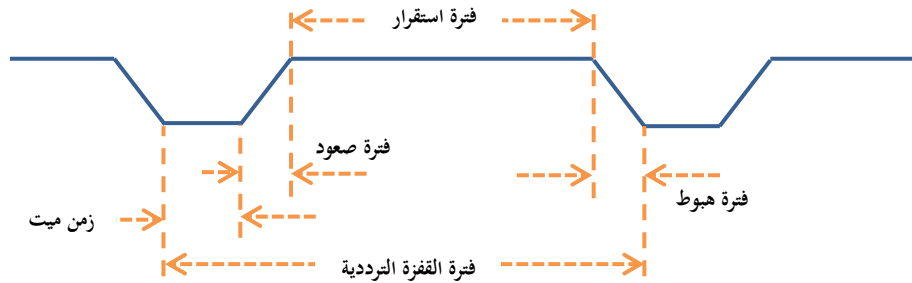
مختلفة، كالتالي: (أ) -30 dBm ، (ب) -60 dBm ، (ت) -80 dBm ، (ث) -100 dBm ، (ج)

. -120 dBm

### ٢-٣-٤- مقترح آلية كشف إشارة القفز الترددي باستخدام الخصائص الزمنية للمعطيات

تعتمد جميع استراتيجيات التزامن لأنظمة القفز الترددي في عملية الكشف بشكل مباشر على استطاعة الإشارة المستقبلية لعدد من القفزات المتتابعة. وبالتالي يتم تحديد زمن القفزة الأصغري للنظام بالأخذ بعين الاعتبار التأخيرات الطارئة على عملية الكشف في مرحلة الاستقبال وزمن التهيئة للمركبات الترددية.

الطريقة التقليدية المتبعة للتغلب على هذه التأخيرات هي أن يقوم النظام بتوظيف زمن "ميت" في بداية ونهاية كل قفزة، وفي هذه الفترات لا يقوم المرسل بإرسال معطيات مفيدة. بينما في الجزء الزمني الفعال للقفزة الذي يقابل فترة الاستقرار الترددي أو ما تسمى dwell time فيتم إرسال رموز المعطيات. يبين الشكل (٢-١٢) تمثيلاً لفترة القفزة الترددية، حيث تمثل فترتي الصعود وهبوط أزمنة التبديل أثناء توليف المركب الترددي. وحتى إن لم يكن هناك في الإرسال أزمنة تبديل، فإنها ستظهر في المستقبل أثناء إرجاع القفزات إلى التردد الوسيط أو إلى الحزمة القاعدية، وذلك بسبب عدم إمكانية تحقيق تزامن تام في توقيت القفز، كما أن الترشيح من شأنه أن يجعل كلاً من فترتي الصعود والهبوط من رتبة زمن الرمز [3]، وهو ما يتطابق مع نتائج القياس في الفقرة السابقة من حيث قوة الإشارة المستقبلية على خرج الكاشف. وبشكل عام، بعد أن يتم تحصيل معطيات القفزة الحالية يقوم المستقبل بإرسال إشارات التحكم للقفز على التردد التالي وتهيئة المستقبل بشكل تام قبل نهاية الزمن الميت وذلك لضمان استقبال كامل الإشارة المرسله بشكل سليم.



الشكل ٢-١٢ : الفترات الزمنية في نبضة القفز الترددي [٣]

وبالتالي إذا افترضنا أن التأخيرات ضمن النظام هي  $T_D$ ، وأن زمن الرمز هو  $T_B$ ، تكون سرعة القفز العظمى للنظام

هي:

$$\max(R_H) = 1/(T_B + T_D)$$

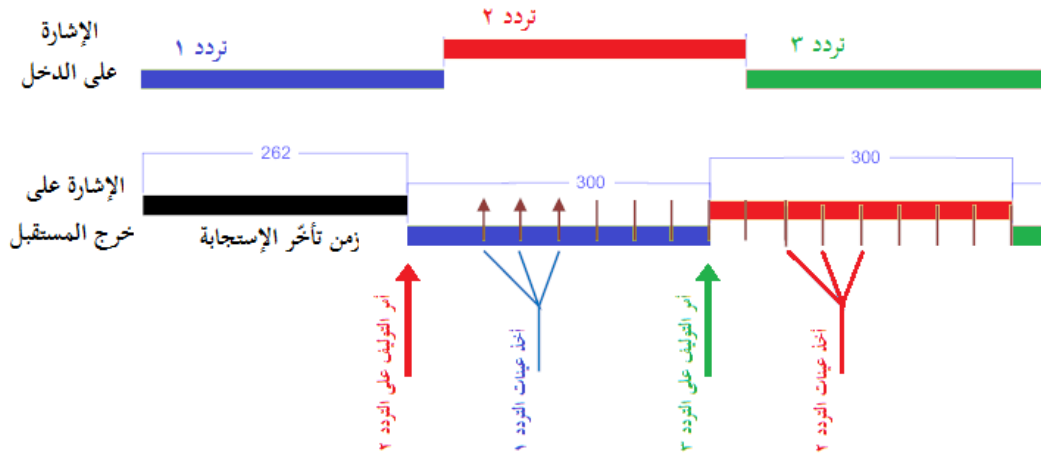
هذه النتيجة التي تم التوصل إليها؛ هي كما ذكرنا للطرق التقليدية في كشف القفزات الترددية بالاعتماد على قوة الإشارة المستقبلية. وبالتالي وبمراعاة نتائج القياس السابقة بأن زمن تأخير الاستجابة في كشف المعطيات هو ثابت وغير مرتبط بقوة الاستطاعة المستقبلية أو بالتردد المستخدم؛ تم اقتراح طريقة جديدة لكشف القفزات الترددية اعتماداً على المعطيات المكشوفة كبديل عن مؤشر RSSI. الهدف من هذه الطريقة هو زيادة سرعة القفز العظمى التي يمكن للنظام

العمل عليها، وكذلك تحقيق كشف موثوق وصلب للقفزات الترددية يعتمد على الخصائص الزمنية للمعطيات المكشوفة بدلاً عن معيار الاستطاعة المستقبلية وعتبة الكشف المرفقة بها. وبالتالي يمكن زيادة قدرة الكاشف على ممانعة الضجيج والتشويش ومنه زيادة احتمالية الكشف وتقليل إنذارات الكشف الكاذب.

### ٢-٣-٤- تحديد سرعة القفز العظمى لنظام القفز الترددي

الطريقة المقترحة مبينة بالشكل (٢-١٣) وفيها نعتبر أن تزامن القفز محقق وأن القفز سريع ويتم بزمن بت واحد. تعتمد الفكرة على مواكبة أوامر القفز في المستقبل بما يتزامن مع إشارة القفز الترددي على دخل المستقبل وليس من منظور خرج الكاشف المتأخر عنه. عند وصول القفزة الأولى إلى خرج الكاشف باللحظة  $T_D$  يكون الزمن الباقي لبدء القفزة التالي هو  $(T_B - T_D)$  وهذا الزمن يجب أن يحقق  $(T_B - T_D) \geq T_{SW}$  حيث  $T_{SW}$  هو الزمن الذي يتطلبه إعداد واستقرار المركب الترددي على التردد الجديد المطلوب. وبالتالي يجب عند اللحظة  $(T_B - T_{SW})$  إرسال أمر القفز للتردد التالي في سلسلة القفز. بينما يتم تحصيل معطيات القفزة الحالية في اللحظة  $(T_D + T_B/2)$  أي في منتصف زمن البت. بهذه الطريقة يمكن اعتبار فقط أول قفزة يقوم بها المرسل هي فترة ميتة لا تحوي معطيات. وبذلك تكون أقصى سرعة قفز ممكنة بوجود تزامن دقيق بتوقيت القفز هي:

$$\max(R_H) = \frac{1}{(T_D + T_{SW})}$$



الشكل ٢-١٣ : بيان توضيحي للطريقة المقترحة للتغلب على تأخيرات الاستقبال وزيادة سرعة القفز

طبعاً زمن البت يجب أن يراعى في اختياره أيضاً بأن يكون أكبر من الزمن اللازم لكافة عمليات المعالجة والتحكميات المطلوبة. كما يجب إضافة هامش أمان لاعتبارات دقة التزامن الممكن الوصول إليها، وذلك بزيادة زمن القفزة بنسبة 10% (بما يتوافق مع دقة تقنية استرجاع الساعة بالاعتيان الفائص 8XO).

### ٢-٣-٥- تصميم إطار المعلومات لنظام القفز الترددي

تم تأمين التزامن الحشن للنظام حسب الطريقة المقترحة سابقاً، وبقي تحقيق التزامن الدقيق للقفز الترددي. الهدف الآن هو الوصول لخطأ توقيت بالقفز لمرتبة أجزاء صغيرة من زمن البت. في التصميم سيتم الاعتماد على تحقيق هذا التزامن بشكل تكراري لكل إطار معلومات، وذلك لمنع تراكم أخطاء التوقيت والقدرة على التكيف مع التأخيرات الزمنية المتغيرة الناتجة عن حركية أحد طرفي الاتصال أو كليهما، وهو ما يسبب عدم تحصيل المعطيات بشكل أمثلي - أي ابتعاد توقيت اعتيان الإشارة عن منتصف زمن البت. وبالتالي يجب أن يحوي كل إطار على رموز مرجعية محددة تساعد على تقدير خطأ التوقيت واسترجاع التوقيت الدقيق.

أثناء تصميم إطار معلومات نظام القفز الترددي تم اتباع مبدأ القفز الترددي البطيء في بداية كل إطار بما يضمن كشف وجود الإشارة في المستقبل وتحقيق التزامنات الكافية كاسترجاع ساعة النظام و إعادة توقيت القفز، وبعد ذلك يتم إرسال معطيات التحكم ومعطيات الاتصال باعتماد القفز السريع بحيث يتم إرسال رمز واحد (أو بت واحد في حالة FSK) على كل قفزة ترددية. الشكل (٢-١٤) يبين بنية الإطار المقترح. يجب أثناء التصميم أن يتم تحديد طول كل من حقل البادئة وحقل التزامن في الإطار بشكل أمثلي بما يحقق أفضل كشف وتزامن مع أعلى سرعة قفز ممكنة. كما يمكن للنظام توظيف معدل معطيات متغير تبعاً لعدد البتات المرسل في كل قفزة.

معطيات	معلومات تحكم	كلمة تزامن	بادئة
--------	--------------	------------	-------

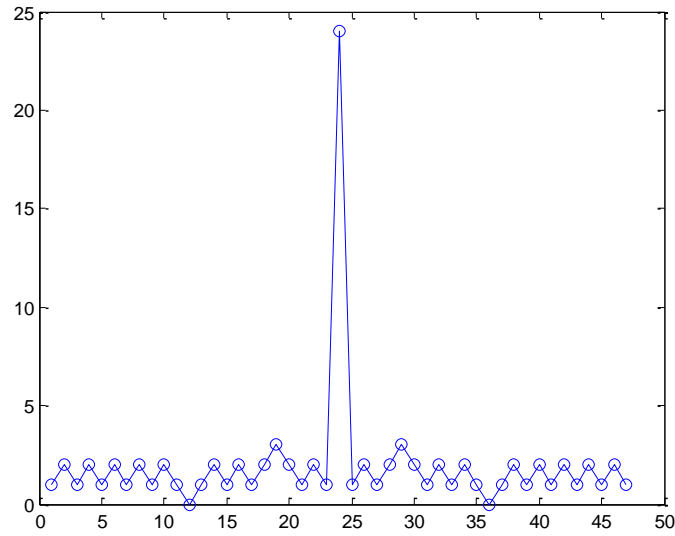
الشكل ٢-١٤ : بنية إطار المعلومات المقترح لنظام القفز الترددي

حقل البادئة preamble هو عبارة عن نموذج بتات متناوبة القيم - أي من الشكل 101010- بطول محدد. يتم استخدام هذا النموذج في المستقبل لكشف وجود الإشارة على خرج المستقبل، كما أنها تفيد المستقبل في تحسس التوقيت وتحديد فيما إذا كان توقيت ساعة تحصيل المعطيات لديه مبكراً أو متأخراً ومن ثم تحقيق مزامنة التوقيت لساعة النظام. طول هذا الحقل يحدده زمن معالجة وأداء كل من خوارزمية الكشف وخوارزمية استعادة ساعة النظام clock recovery (كما سيتم تفصيله في الفصل الثالث).

لم يتم الاعتماد في خوارزمية كشف وجود الإشارة على مؤشر الاستطاعة المستقبلية لأسباب ذكرت سابقاً. وبدلاً عن ذلك يتم الكشف باستغلال الخواص الزمنية لنموذج البادئة عن طريق حساب عدد التقاطعات الصفرية في المعطيات المستقبلية ضمن نافذة زمنية منزلة من نافذة على شكل سجل إزاحة من نمط FIFO وبحيث يكون طول هذه النافذة متناسب مع طول هذه البادئة، وعند تجاوز عدد الحواف المكشوفة لعتبة معينة يتم اعتبار عدم وجود كشف جيد

للإشارة. وكما سيتم تفصيله في الفصل القادم فقد تم اقتراح خوارزمية تقوم بكشف الإشارة واسترجاع الساعة معاً بأن واحد، مع الاكتفاء ببداية بطول صغير يساوي بايت واحد فقط.

حققت كلمة التزامن Sync Word الهدف منه مزامنة بداية الإطار وذلك ضمن ظروف صعبة من خفوت أو ضجيج عال أو إنشاء اتصال عند حدود حساسية المستقبل. ويتم ذلك عن طريق قياس قوة الترابط بين كلمة التزامن والإشارة المستقبلية، حيث يتم الحصول على أعلى قيمة للترابط عند حدوث الارتصاف التام بينهما. تم اختيار كلمة تزامن بطول 24 بت، تؤمن كشف جيد بما يحقق الأداء المطلوب وذات تابع ترابط ذاتي جيد كما هو مبين في الشكل (٢-١٥).



الشكل ٢-١٥ : الترابط الذاتي لكلمة التزامن SyncWord

## مقدمة

ترسل معظم أنظمة الاتصالات المعطيات باتباع ترميز خط هو عدم العودة إلى الصفر NRZ، وذلك بهدف توفير بعرض حزمة الإرسال. وبالتالي فهي تفتقر لوجود إشارة الساعة المتزامنة معها والمسؤولة عن أخذ عيناتها في منتصف زمن البت. وهنا تكمن أهمية وجود كتلة لاستعادة الساعة والمعطيات في طرف الاستقبال من أجل توليد إشارة ساعة هي أقرب ما تكون لساعة النظام المستخدمة في المرسل من حيث تردد العمل والطور وبما يتيح أمثلة توقيت أخذ عينات إشارة المعطيات المستقبلية للحصول على أقل نسبة خطأ BER. وبالتالي فإن هذه الكتلة لها أثر كبير ومباشر على أداء النظام ككل.

توجد طرائق ومنهجيات كثيرة لحل مشكلة استعادة الساعة والمعطيات، معظمها يعتمد على تقنية حلقة إقفال الطور phase-locked loop (PLL). ولكن في العديد من التطبيقات تكون هذه التقنية غير أمثلة لعدة أسباب أهمها الطبيعة التماثلية لحلقة إقفال الطور، وزمن إقفال الطور الطويل نسبياً، واستهلاك الطاقة العالي لهذه التقنية، والكلفة العالية في التنفيذ [16].

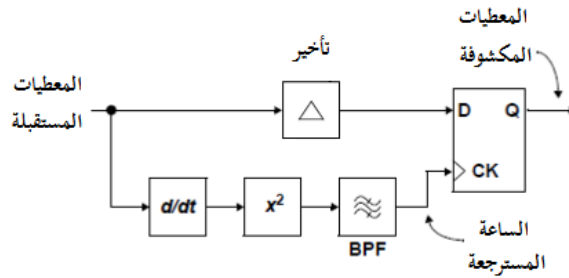
تتكون دائرة استعادة الساعة والمعطيات CDR بشكل عام من قسمين، دائرة استعادة الساعة Clock Recovery Circuit (CRC)، ودائرة اتخاذ القرار التي تكون مهمتها إعادة توليد المعطيات - أو توقيت اعتبارها- باستخدام الساعة المسترجعة. ويمكن تصنيف دارات استرجاع الساعة والمعطيات CDR لصنفين، الصنف الأول يعتمد على مبدأ الحلقة المغلقة Closed-loop ويستخدم تقنية حلقة إقفال الطور PLL أو أحد أشكالها. أما الصنف الثاني لدارات CDR فيعتمد مبدأ الحلقة المفتوحة Open-loop باستخدام المرشحات الغير فعّالة، حيث تتميز هذه الطريقة عن سابقتها بسهولة التنفيذ وقلة التكلفة.

حديثاً، تتمثل حوافز البحث والتطوير على تقنيات استعادة الساعة والمعطيات في اعتماد التصميم الرقمي التام للدائرة بهدف زيادة سرعة الأداء وتوفير إمكانية التصنيع بشكل كامل على دائرة تكاملية واحدة مما يتيح توفير في الحجم والكلفة وزيادة الوثوقية والمحمولية.

### ١-٣-١ - التقنيات والطرق التقليدية في استعادة الساعة والمعطيات

#### ١-١-٣-١ - استعادة الساعة والمعطيات بتقنية الترشيح Filter-Type CDR

تحتاج هذه الطريقة لاسترجاع الساعة من المعطيات المستقبلية والمرمزة بترميز NRZ إلى استخدام دائرة لاختطية مع مرشح حزمة ضيقة بمعامل جودة Q مرتفع. الغرض من الدارة للاختطية هو إعادة إنتاج المركبة الترددية للساعة والتي هي أساساً غير متواجدة في طيف هذه المعطيات، ويكون بالتالي دور المرشح هو انتقاء هذه المركبة الترددية. يبين الشكل (١-٣) بنية نظام استرجاع الساعة والمعطيات باستخدام الترشيح [17]. يمكن تنفيذ الدارة للاختطية بتقنيات مختلفة؛ منها مقوم الموجة الكامل Full-wave Rectifier أو دائرة خيار مقصور XOR مع تأخير [18].



الشكل ١-٣ : بنية دائرة CDR تعمل بتقنية الترشيح

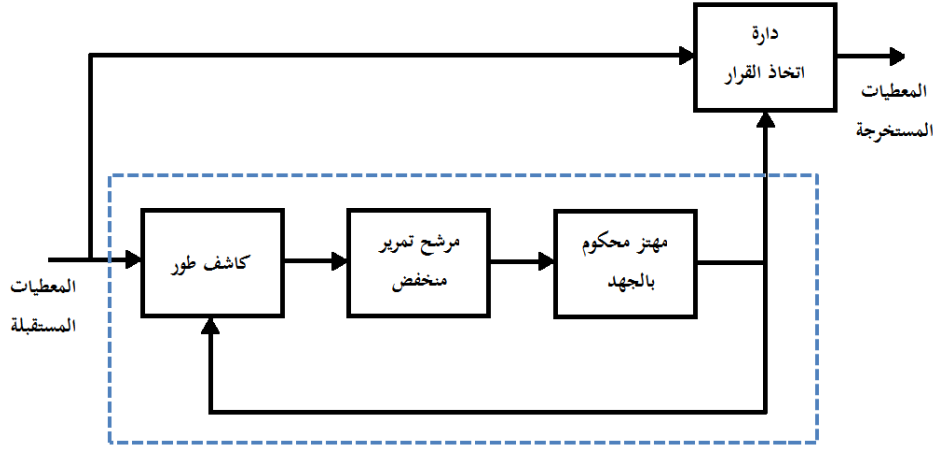
بشكل عام تتميز هذه البنية لاسترجاع الساعة ببساطتها، ولكن من مساوئها صعوبة التجميع المتكامل للمرشح مع بقية العناصر الالكترونية على دائرة تكاملية واحدة [19].

#### ١-٣-٢ - استعادة الساعة والمعطيات بتقنية حلقة إقفال الطور PLL-Based CDR

تُستخدم حلقة إقفال الطور بهدف إزاحة طور الساعة المرجعية في المستقبل بشكل ديناميكي بما يتوافق مع الإنزياحات الطارئة على الساعة المسترجعة من المعطيات وذلك باستخدام مبدأ دائرة التغذية الراجعة. ويحصل الإقفال عندما يصبح فرق الطور بين خرج الحلقة والساعة المسترجعة صغيراً لدرجة مقبولة. وتتكون دائرة حلقة إقفال الطور بشكل أساسي من ثلاث كتل وهي عبارة عن مهتر محكوم بالجهد Voltage-Controlled Oscillator (VCO) وكاشف طور Phase Detector (PD) ومرشح تمرير منخفض LPF كما هو موضح بالشكل (٢-٣). المهتر المحكوم بالجهد يعتبر الساعة المرجعية في المستقبل، ويستخدم لضبط توقيت إعتيان المعطيات المستقبلية، حيث يقوم بتوليد إشارة يتغير ترددها تبعاً لتغيرات الجهد المطبق على دخله. أما كاشف الصفحة فمهمته تتمثل بإيجاد فرق الطور بين إشارة المعطيات المستقبلية وإشارة المهتر المرجعي. يُمرّر خرج كاشف الصفحة على مرشح التمرير المنخفض الذي قد يكون من الدرجة الأولى أو الثانية أو حتى الثالثة بهدف تنعيم تغيرات جهد التحكم بالمهتر، والحد من ضجيج الطور العالي التردد المرافق لخرج المهتر، ولهذا المرشح ومعاملاته أهمية كبيرة في تحديد زمن إقفال الحلقة وضمان ثباتية واستقرارية عمل الحلقة.

بما أن هذه التقنية تعتمد مبدأ التغذية الراجعة فلا بد من الأخذ بالحسبان مشاكل استقرار عمل الحلقة. ولضمان هذه الاستقرارية يتم عادة تصميم عرض حزمة الحلقة لأقل من عُشر تردد الساعة الداخلية [26]. وهذا ما يجد من إمكانية الحلقة من ملاحقة الارتعاش الطارئ على الساعة وبالتالي يقل عرض حزمة الملاحقة Tracking Bandwidth لهذه التقنية. كما أن التأخير الناجم عن الحلقة يجعل إمكانية ملاحقة ضجيج الطور العالي التردد غير ممكنة. فإذا ما كان

خطأ الطور مستقلاً بين انتقالين متتاليين لطور المعطيات فإن تصحيح الطور اعتماداً على معلومات الانتقال الأول يمكن أن يزيد خطأ الطور في استقبال الانتقال الثاني.

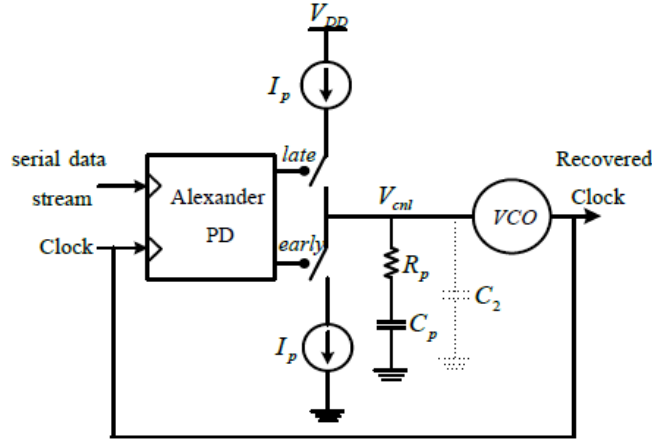


الشكل ٣-٢ : البنية العامة لاستعادة الساعة والمعطيات بطريقة حلقة إقفال الطور

يمكن النظر لدائرة PLL كمرشح حزمة فعال بمعامل جودة  $Q$  عالٍ مع إمكانية التبديل بشكل الكتروني بين تردد وآخر بحال وجود مقسم ترددي في جزء التغذية الراجعة من الحلقة. وكما هو واضح؛ تحتاج تقنية استرجاع الساعة بحلقة إقفال الطور للكثير من العناصر الخارجية كالمرشحات والمهتزازات الحكومة بالجهد، حيث أن طبيعة البنية التماثلية لهذه العناصر والترددات العالية التي تعمل بها تمنع هذه التقنية من إمكانية التجميع المتكامل [19].

تصنف طرق استعادة الساعة والمعطيات التي تعتمد تقنية حلقة إقفال الطور إلى صنفين أساسيين، خطية أو لاقطية، تبعاً لبنية كاشف الطور PD المستخدم. تستخدم دوائر CDR الخطية كاشف الطور الذي أوجده Hogge - أو أحد الأنواع المستنبطة عنه - حيث يكون عرض النبضة على خرج كاشف الطور متناسباً بشكل خطي مع فرق الطور بين الإشارات على دخله. أما الدوائر اللاخطية فتستخدم كاشف الطور الإثنائي الذي أوجده Alexander بخروج له قيمتين فقط كما هو مبين بالشكل (٣-٣)، وبما يتيح للكاشف التنويه للمهتزاز إما بأنه متأخر أو بأنه مبكر ولذلك يطلق عليه اصطلاحاً اسم Early-Late PD أو اسم Bang-Bang Phase Detector (BBPD).

تتميز كواشف الطور الخطية عن اللاخطية منها بتحقيق ربح ثابت للحلقة في طور الإقفال العابر وعند الوصول للإقفال تصبح دائرة التغذية الراجعة تعمل بأقل نشاط ممكن وهو ما يقلل بشكل كبير من قيمة الارتعاش على خرج المهتزاز. أما في الدوائر اللاخطية، فإن المهتزاز سيولد بالقيمة الوسطية التردد الصحيح مع البقاء بحالة التسارع والتباطؤ بشكل مستمر، مما يسبب توليد ارتعاش حتمي *deterministic jitter* على خرج المهتزاز. وللتخفيف من هذا الارتعاش تلجأ كواشف الطور الحديثة التي تعتمد Bang-Bang CDR إلى إضافة حالة ثالثة على الخرج للتعبير عن حالة الثبات للمهتزاز - أي بدون تسارع أو إبطاء - وذلك عند انعدام تواجد تغيرات أو حواف على دخل الكاشف تمكنه من اتخاذ قرار جديد للمهتزاز [20].



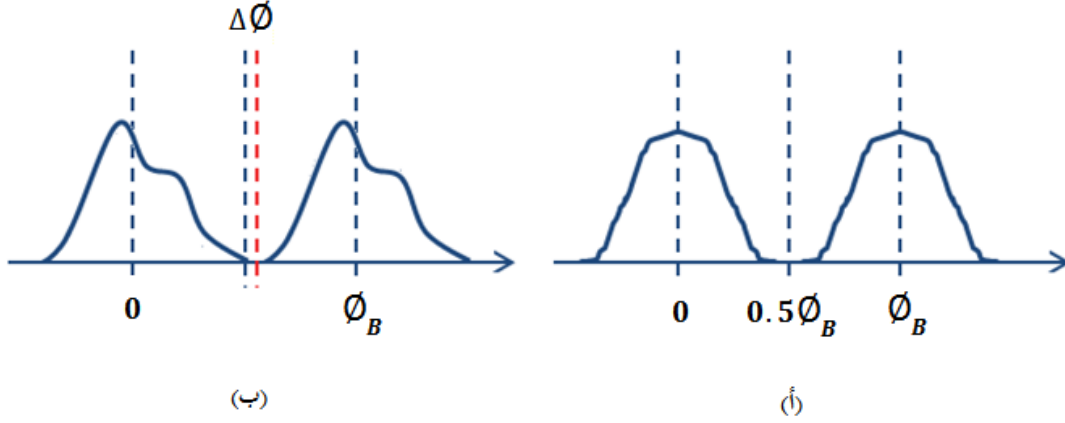
الشكل ٣-٣ : بنية CDR باستخدام كاشف إثنائي Bang-Bang PD

وبالمقابل، يتميز الكاشف اللاخطي ببساطة التصميم حيث يتم الكشف باستخدام دائرة قلاب بسيطة، وهو ما يمكن من تشغيل دائرة استرجاع الساعة والمعطيات على ترددات عمل عالية وبالتالي القدرة على التعامل مع معطيات بمعدلات إرسال أسرع إذا ما قورنت مع نظرائها التي تستخدم التقنيات الخطية في الكشف [21].

### ٣-٢- تقنيات استعادة المعطيات باستخدام الإعتيان الفائض

يتم في دارات كشف الساعة واستخلاص المعطيات CDR التي تستخدم كاشف الطور الثنائي BBPD اعتماد اعتيان فائض بمقدار عينتين لكل بت من معطيات الدخل ونرمز له  $2X$  Oversampling ( $2XO$ ). وبالتالي تكون إحدى هاتين العينتين مقادة بساعة خاصة لإعتيان الحواف وملاحقة مركز منطقة الارتعاش، في حين تكون ساعة تحصيل المعطيات مزاحة عنها بمقدار نصف زمن البت. وبالتالي إذا كان الارتعاش ذو توزيع متناظر فإن تحصيل المعطيات سيتم تماماً في مركز مخطط العين للمعطيات. ولكن بحال كان توزيع الكثافة الاحتمالية للارتعاش غير متناظر - كما هو موضح بالشكل (٣-٤) - فإنه ستتواجد إزاحة بالطور عن نقطة المنتصف وهو ما ينتج عنه زيادة كبيرة بمعدل الخطأ بالبت BER.

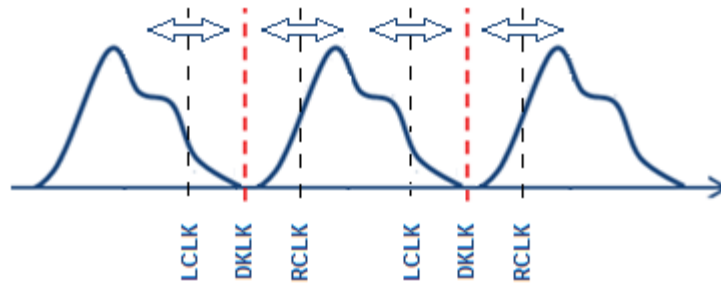
تم تطوير تقنيات جديدة لتحسين الأداء في ظل وجود ارتعاش غير متناظر تعتمد بالمبدأ على قياس وملاحقة عين المعطيات بما يضمن تموضع ساعة اعتيان المعطيات في مركز العين تماماً. ولضمان كشف العين يجب اعتماد اعتيان فائض بحيث يكون على أقل تقدير  $3XO$  أي ثلاث عينات لكل بت معطيات، حيث يمكن ذلك من كشف طريقي العين ونقطة المركز فيها. ولكشف عين المعطيات يمكن اتباع ثلاث منهجيات للعمل، إما كشف وملاحقة مركزي الحواف واعتيان المعطيات بمنتصف المسافة بينهما كما في [22]، أو كشف فتحة العين مباشرة عوضاً عن الحواف ووضع نقطة الإعتيان بمركز العين تماماً كما في [17][23]، أو أن يتم الإعتيان الفائض للمعطيات بشكل أعمى وبتردد من المضاعفات الفردية لمعدل البت - أكثر أو يساوي  $5XO$  - بحيث يتم تقسيم زمن البت لنطاقات كشف حواف، وبالتالي يتم انتخاب طور الساعة الذي يحقق إزاحة بمقدار نصف زمن البت للطور المقابل للنطاق الذي تم ضمنه كشف أعلى نسبة للحواف خلال فترة كشف محددة [16].



الشكل ٣-٤ : تموضع نقطة أخذ عينة المعطيات بطريقة كشف الحواف في حالة إعتيان فائض  $3XO$  وذلك تبعاً لنوعية الارتعاش (أ) ارتعاش بتوزيع متناظر وبالتالي الإعتيان يتم في منتصف عين المعطيات (ب) ارتعاش بتوزيع غير متناظر وبالتالي لن يتم الإعتيان في مركز العين

### ٣-٢-١- ملاحظة عين المعطيات بتقنية كشف الحواف (الإعتيان الفائض بفترات متغيرة)

في هذه التقنية يتم ملاحظة حواف الانتقال في قيم المعطيات ومن ثم وضع نقطة الإعتيان في مركز أو منتصف المسافة بين وسطي حافتي البت الصاعدة والهابطة. أي أن هناك ساعة خاصة لإعتيان المعطيات DCLK وساعتين إضافيتين لأخذ عينات الحواف اليمينية RCLK واليسارية LCLK بحيث تنتج هاتان الساعتان عن ساعة المعطيات بتطبيق إزاحة طور موجبة وسالبة على الترتيب، كما هو موضح بالشكل (٣-٥). وقيمة الإزاحة في الطور تكون متغيرة بما يتوافق مع خرج آلية ملاحظة الحواف وكشف عين المعطيات وبما يستجيب لشكل ومطال الارتعاش المصحوب بالإشارة. أي أن DCLK تلاحق مركز عين المعطيات وإن لم يكن الارتعاش متناظراً وبالتالي يتم الحصول على سماحية ارتعاش أكبر ومع تحقيق معدل خطأ بالبت أمثلي.



الشكل ٣-٥ : ضبط ساعات إعتيان المعطيات بوجود ارتعاش بكثافة احتمالية غير متناظرة

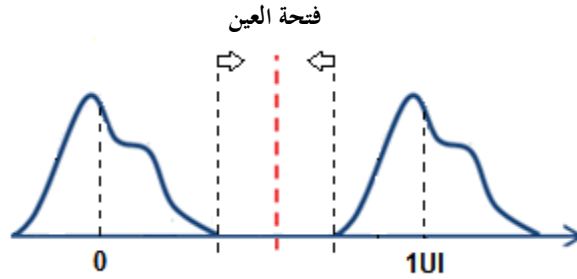
تتكون البنية المقترحة في [22] من كاشف طور وحلقتين أساسيتين، كما هو مبين بالشكل (٣-٦). الحلقة الأولى هي حلقة ملاحظة التردد يتم فيها قفل تردد الساعة على تردد الساعة المرجعية المحلية باستخدام مهتز محكوم بالجهد VCO. والحلقة الثانية هي حلقة المعطيات التي يتم فيها قياس العين وضبط ساعات الإعتيان بهدف ملاحظة حواف المعطيات. آلية التغيير والتحكم بفترات الإزاحة لساعات إعتيان الحواف عن ساعة المعطيات تتم باستخدام خط تأخير محكوم بالجهد Voltage-Controlled Delay Line (VCDL). ويتم إعادة ضبط الدارة لكل فترة زمنية مؤلفة من أربع



المعطيات، أما في حالة عدم كشف حافة فيتم إرسال أمر UP لإعادة شحن جهد التحكم بدارة التأخير وبالتالي زيادة التأخير وتوسعة عين المعطيات. يتم أثناء التصميم الأخذ بعين الاعتبار بأن يكون عرض حزمة حلقة قياس عين المعطيات أقل بكثير عنه في حلقة ملاحقة التردد، وبالتالي يكون ضبط طور ساعة تحصيل المعطيات DCLK بواسطة حلقة الملاحقة غير متأثر بعمل حلقة قياس العين.

وكنتيجة لتنفيذ هذه البنية الناتجة عن دمج عمل دارة VCO مع دارة تأخير VCDL لضبط فرق الطور بين ساعات الإعتيان، فقد تمت ملاحقة تابع الكثافة الاحتمالية للارتعاش في حواف المعطيات المستقبلية ووضع ساعة اعتيان المعطيات في مركز المسافة بين حافتي العين المقاسة وتحسين معدل الخطأ بالبت مع تأمين سماحية ارتعاش غير متناظر بقيمة  $0.65 \text{ UIp-p}$ . يجدر الإشارة هنا أن هذه البنية تستخدم اعتيان فائض بمقدار ثلاث عينات لكل بت وذلك ملائمة العمل على معدل معطيات عال جداً (في اتصالات أنظمة الوصل التسلسلي كما في Giga-Bit Ethernet والاتصالات البصرية SONET، وكذلك USB وغيرها)

### ٣-٢-٢- ملاحقة عين المعطيات بتقنية كشف فتحة العين

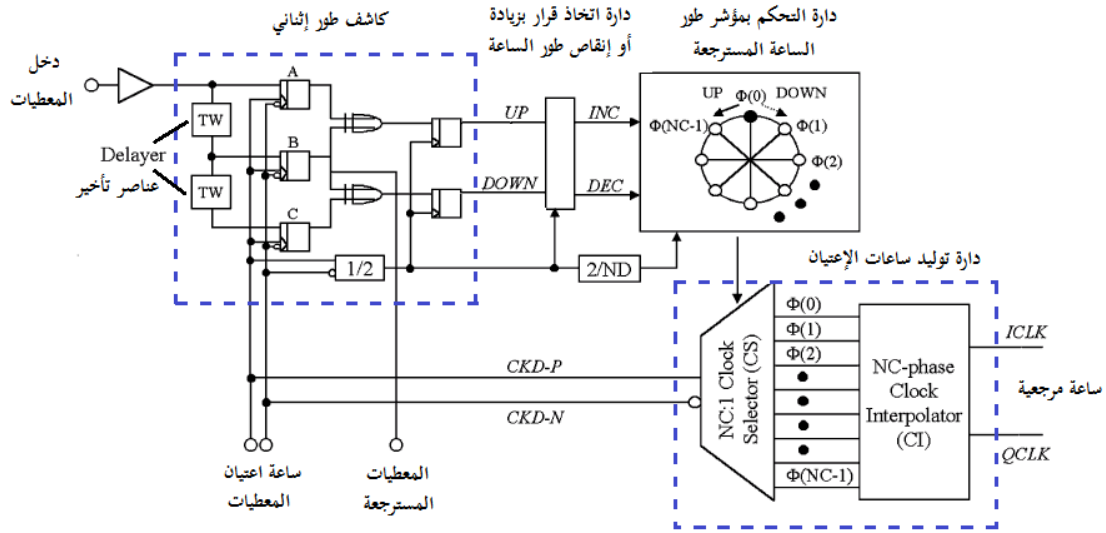


الشكل ٣-٨: طريقة ملاحقة فتحة عين المعطيات في دارات CDR باعتيان فائض 3XO

تقوم هذه الآلية بملاحقة عين المعطيات بدلاً عن حوافها. فبدلاً عن كشف مركزي الحواف واعتيان المعطيات بمنتصف المسافة بينهما، يتم أولاً كشف الحواف وبعدها تتم محاولة الحفاظ على ساعة إعتيان المعطيات بعيدة عن تلك الحواف بحيث تلاحق بشكل دائم الطور الذي يقابله أقل احتمالية ممكنة لوجود حافة، وبالتالي تتم لحظة أخذ عينة استرجاع المعطيات في مركز فتحة العين تماماً [23] [17]، كما هو مبين في الشكل (٣-٨).

تم في [23] اقتراح بنية دارة رقمية بشكل كامل لاستعادة المعطيات وإعتيان فائض 3XO وتقوم بملاحقة فتحة عين المعطيات. تتم ملاحقة فتحة عين المعطيات عن طريق التحكم بزيادة أو إنقاص طور ساعة الإعتيان بخطوة إزاحة ثابتة وبشكل دوري، مع تأمين نافذة اعتيان ضمن زمن البت يتم ضمنها كشف حواف المعطيات ويطلق عليها اسم "فترة كشف الحواف". يتم تحقيق فترة كشف الحواف باستخدام عناصر تأخير على دخل المعطيات بمقدار  $TW$  في كاشف الطور الإثنائي BBPD كما هو واضح في بنية الدارة المبينة في الشكل (٣-٩). أي يتم اعتيان عين المعطيات في الطور المقابل لساعة المعطيات المسترجعة بالإضافة لطورين مزاحين عنها بمقدار  $\pm TW$ . وبناءً على مواقع الحواف المكشوفة بين عينات المعطيات الثلاثة يعطي كاشف الطور على خرج الإثنائي إما القرار بزيادة UP أو القرار بإنقاص DOWN طور الساعة. تتم مراكمة هذه القرارات في سجل إزاحة تسلسلي خلال فترة تحديث طور الساعة وبعدها يتم حساب تعداد كل قرار واتخاذ القرار النهائي بزيادة أو إنقاص مؤشر طور الساعة الدوري. هذا المؤشر يستخدم لانتخاب أفضل

ساعة من أصل  $N_C$  ساعة اعتيان متاحة على خرج دائرة توليد ساعات الإعتيان وذلك بما يتوافق مع حالة الملاحظة. تولّد ساعات الإعتيان عن طريق تقسيم ساعة مرجعية واحدة بحيث تكون بالتردد ذاته للمعطيات المراد استعادتها ويفارق طور متساوٍ فيما بينها ويساوي  $1/N_C$ .



الشكل ٣-٩ : بنية دائرة CDR الرقمية والمقترحة في [23] بهدف ملاحظة فتحة عين المعطيات

تم بالأخذ بعين الاعتبار أثناء تصميم الدارة وجود ثلاث حالات لوضعية ملاحظة فتحة عين المعطيات وهي أن يكون الإعتيان إما مبكراً أو صحيحاً بمركز العين أو متأخراً. ولضمان استقرار آلية الملاحظة بوجود ارتعاش سريع أو عالي التردد يجب أن يتم الانتقال بين تلك الحالات بشكل انسيابي، أي لا يتم مثلاً الانتقال من حالة اعتيان مبكر إلى حالة اعتيان متأخر دون المرور بحالة الإعتيان الصحيح، والعكس بالعكس. لتحقيق هذا الشرط يجب أن تكون قيمة الإزاحة في طور الساعة أصغر من نصف قيمة فتحة العين. أي إذا كان عرض منطقة الارتعاش الكلي عند حواف المعطيات تساوي القيمة  $TJ$ ، فإن فتحة عين المعطيات تساوي  $(1 - TJ)$  ومنه يجب أن يكون:

$$1/N_C \leq (1 - TJ)/2$$

وبالتالي لتحقيق سماحية ارتعاش عالي التردد بقيمة أعظمية تساوي  $0.65 UI_{P-P}$  يجب أن يكون عدد أطوار الساعة المستخدمة أثناء ملاحظة فتحة عين المعطيات  $N_C \geq 5.71$ .

ومن أجل كشف أي إزاحة طارئة على طور الساعة المسترجعة عن منتصف فتحة عين المعطيات يجب أن يتم اعتيان فتحة العين بعينتين على الأقل ما يؤدي للعودة السريعة لوضعية استقرار الملاحظة. وبالتالي يجب أن يكون التأخير  $TW$  - الذي يمثل نصف فترة كشف الحواف - أصغر من نصف قيمة فتحة العين مضافاً إليها أصغر إزاحة طور ممكنة. أي:

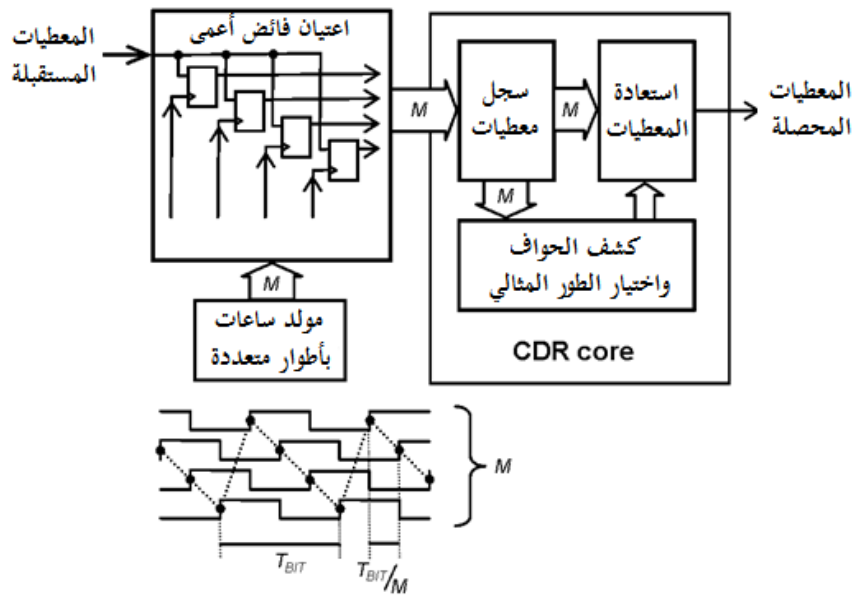
$$TW \leq (1 - TJ)/2 + 1/N_C$$

إن فترة كشف الحواف هو معامل خرج في التصميم حيث لقيمته تأثير متعارض بين سماحية الارتعاش الممكن تحقيقها لدائرة كشف المعطيات مع الترددات المختلفة للارتعاش. فإذا ما كانت نافذة كشف الحافة ضيقة جداً فإن الحواف لن

يتم كشفها بكفاءة جيدة وذلك سيؤثر سلباً على قدرة حلقة إقفال الطور الرقمية على ملاحقة الترددات المنخفضة للارتعاش، في حين إذا كانت النافذة عريضة جداً فإن قدرة الكاشف على ملاحقة التغيرات السريعة للارتعاش (أي الارتعاش مرتفع التردد) ستصبح سيئة وبالمقابل تتحسن الملاحقة. لحل من هذه المشكلة تم في [17] التخلص من مراحل التأخير في كتلة كاشف الطور BBPD، وبدلاً عنها تم الاستعانة بدارة توليد ساعات اعتيان ثلاثة بأطوار متباعدة بشكل متناظر حول ساعة اعتيان المعطيات وبالاعتماد على تقنية حلقة إقفال التأخير Delay Locked Loop (DLL). هذا التنفيذ يؤمن بنية CDR لا تعاني من مشاكل الارتعاش الناجم عن التغيرات الطارئة على النظام من حيث المعالجة والجهود والحرارة (Process, Voltage, and Temperature (PVT)، ولكن ذلك يتم على حساب الزيادة في التعقيد واستهلاك الطاقة في الدارة [24].

### ٣-٢-٣- تقنية الإعتيان الفائض الأعمى (Blind Oversampling CDR (BO-CDR)

تتميز تقنية الإعتيان الفائض الأعمى BO-CDR بأنها تصميم ذو بنية رقمية بشكل كامل. حيث يتم بهذه التقنية أخذ عدة عينات ضمن كل بت من إشارة المعطيات المستقبلية، وبالاعتماد على هذه العينات يتم اتخاذ القرار باستخدام العينة الأقرب لمنتصف العين لاستعادة المعطيات، وبالتالي فإن هذه التقنية تُعنى باستعادة المعطيات فقط ولا تنجز حقيقةً استرجاع ساعة النظام [16]. تم نشر العديد من الطرق لتنفيذ تقنية الإعتيان الفائض الأعمى والتي أثبتت إمكانية تحصيل أداء جيد في المستقبلات الحديثة بالمقارنة مع طرق استعادة الساعة والمعطيات بتقنية حلقة إقفال الطور [16].



الشكل ٣-١٠: المخطط الصندوقي لدارة BO-CDR (من أجل معدل إعتيان فائض  $M$  يساوي 4) [16]

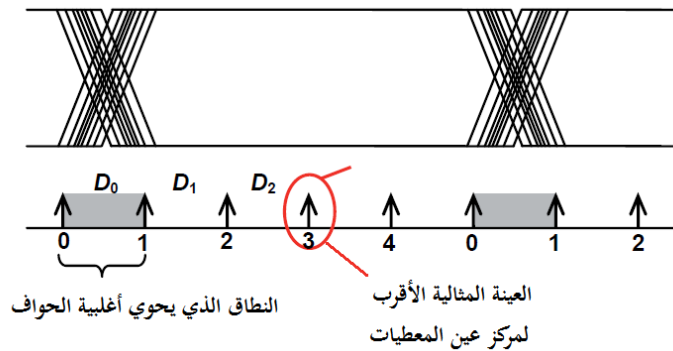
يقصد بالإعتيان الفائض الأعمى بأن تكون الساعة المحلية المستخدمة في أخذ عينات المعطيات هي ثابتة وغير متزامنة معها وبالتالي لا يتم استخدام أي شكل من حلقات إقفال الطور أو التأخير لإعادة ضبط ساعة الإعتيان، ويتم أخذ  $M$  عينة من المعطيات بأبعاد متساوية ضمن زمن البت الواحد  $T_{BIT}$ ، وبالتالي يتم تقسيم زمن البت لنطاقات زمنية يساوي كل منها  $T_{OS} = T_{BIT}/M$ . إذاً قيمة معدل الإعتيان الفائض  $M$  هي أهم معامل في تقنية BO-CDR.

يمكن تحقيق الإعتيان الفائض باستخدام ساعة واحدة بتردد مضاعف بـ  $M$  مرة عن معدل البت للمعطيات، ولكن هذه الطريقة قد تكون غير مناسبة أو لا يمكن تنفيذها عند العمل بمعدلات إرسال فائقة السرعة، وبالتالي يتم إنجاز الإعتيان الفائض بواسطة توليد  $M$  ساعة اعتيان بحيث تملك جميعها تردد المعطيات ذاته وبإزاحة طور فيما بينها تتوافق مع زمن أخذ العينات  $T_{OS}$ . الشكل (٣-١٠) يبين المخطط العام لبنية نظام استعادة المعطيات بتقنية الإعتيان الفائض الأعمى.

توجد طريقتين لمعالجة عينات المعطيات، هما طريقة اقتراع الأغلبية Majority Voting وطريقة انتقاء الطور الأمثل للإعتيان Phase Picking. طريقة اقتراع الأغلبية تفترض أن معظم عينات البت الحالي ستملك القيمة ذاتها للبت ولكن هذه الطريقة لا تعطي نتائج جيدة وخاصة في حالة وجود ارتعاش كبير على حواف المعطيات المستقبلية. أما في طريقة اختيار الطور فيتم انتخاب عينة واحدة من أصل  $M$  عينة للبت بحيث تكون في نقطة الوسط بعيداً عن مناطق كشف الحواف، أي تلك الأقرب لمركز عين المعطيات.

يمكن تنفيذ طريقة اختيار الطور المثالي على مستوى البت الواحد بحيث يتم اتخاذ القرار بانتقاء طور جديد بشكل مباشر بعد كشف حافة البت. هذه الخوارزمية تعرف باسم Direct Phase Picking (DPP)، وبالرغم من بساطتها فإنها تعطي أداءً ضعيفاً بوجود الارتعاش. وبالتالي عوضاً عن ذلك يتم تنفيذ انتقاء الطور المثالي بشكل وسطي على نافذة زمنية منزلة تمثل عدد  $W$  من البتات المستقبلية، هذه الخوارزمية يطلق عليها اسم Average Phase Picking (APP). يتم بهذه الطريقة حساب تعداد مرات كشف حواف المعطيات ضمن كل نطاق اعتيان، والنطاق الذي يحوي جميع الحواف المكشوفة خلال هذه الفترة - وليكن هو النطاق الذي ترتيبه  $i$  - يعتبر النطاق الأبعد عن مركز عين المعطيات وبالتالي يتم اتخاذ القرار بطور الإعتيان المثالي بما هو محقق بالعلاقة:

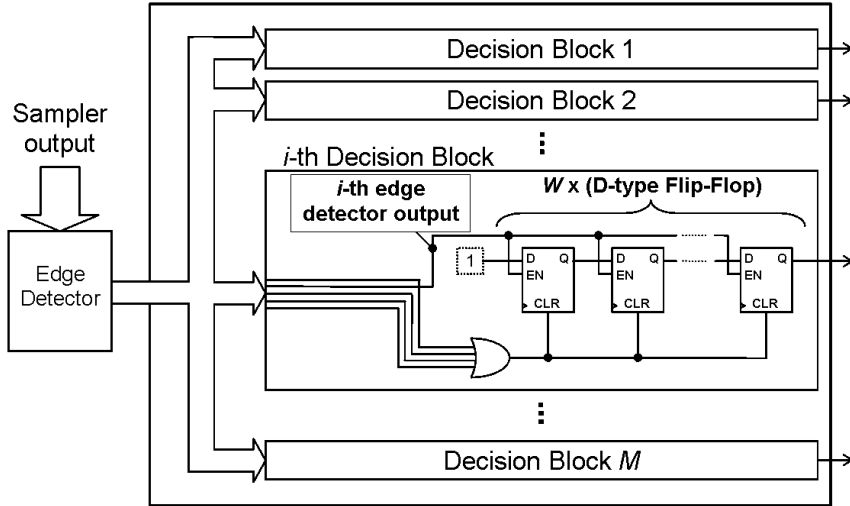
$$P_{opt} = \left( i + \frac{M + 1}{2} \right) \text{mod}(M)$$



الشكل ٣-١١ : آلية انتقاء طور ساعة الإعتيان الأمثل من أجل  $M=5$

الشكل (٣-١١) يوضح آلية انتقاء الطور المثالي للساعة التي يتم عندها استعادة المعطيات بجوار مركز العين من أجل معدل إعتيان فائض  $M = 5$ . والشكل (٣-١٢) يظهر كيفية بنية كتلة كشف الحواف واختيار الطور المثالي كما هو مقترح في [16]. كتلة كاشف الحواف تقوم بتنفيذ دخول كتلة اتخاذ قرار تحديث الطور المتوافق مع النطاق الذي تم ضمنه الكشف. وكل كتلة قرار هي عبارة عن سجل إزاحة بطول  $W$  بحيث يحوي حالات كشف الحواف المتتابعة

ضمن النطاق الذي ترتبط به هذه الكتلة. وكما هو واضح فإن كشف أية حافة في نطاق آخر سيؤدي إلى إعادة تهيئة السجل بشكل كلي، وبالتالي لا يتخذ قرار الانتقال لطور جديد إلا إذا تواجدت جميع الحواف بشكل حصري ضمن نطاق واحد. الدارة المقترحة هنا لا تعتمد على نافذة كشف ثابتة من  $W$  بت وإنما تقوم بكشف تتابع  $W$  حافة في المعطيات المستقبلية ولذلك فإن ساعة سجل الإزاحة لا يتم تأهيلها ما لم يتم كشف حافة ضمن النطاق ذاته.



الشكل ٣-١٢: بنية كتلة كشف الحواف واختيار الطور المثالي كما هو مقترح في [16].

هناك دائماً علاقة موازنة بين الأداء و معدل الإعتيان الفائض، فزيادة معدل الإعتيان الفائض من شأنه تحسين دقة طور الساعة المسترجعة وتحقيق اعتيان أدق في منتصف عين المعطيات وبالتالي تحقيق معدل خطأ بالبت أقل، ولكن بالمقابل فإن سماحية الارتعاش ممكن أن تصبح أسوأ تبعاً للطريقة المتبعة في قرار اختيار طور الإعتيان وكذلك فإن التعقيد في الدارة سيزداد وخاصة في كتلة اختيار نطاق الحواف وهو ما قد يحد من سرعة المعطيات العظمى التي يمكن للدارة استعادتها وكذلك فإن استهلاك الطاقة للدارة سيصبح أعلى.

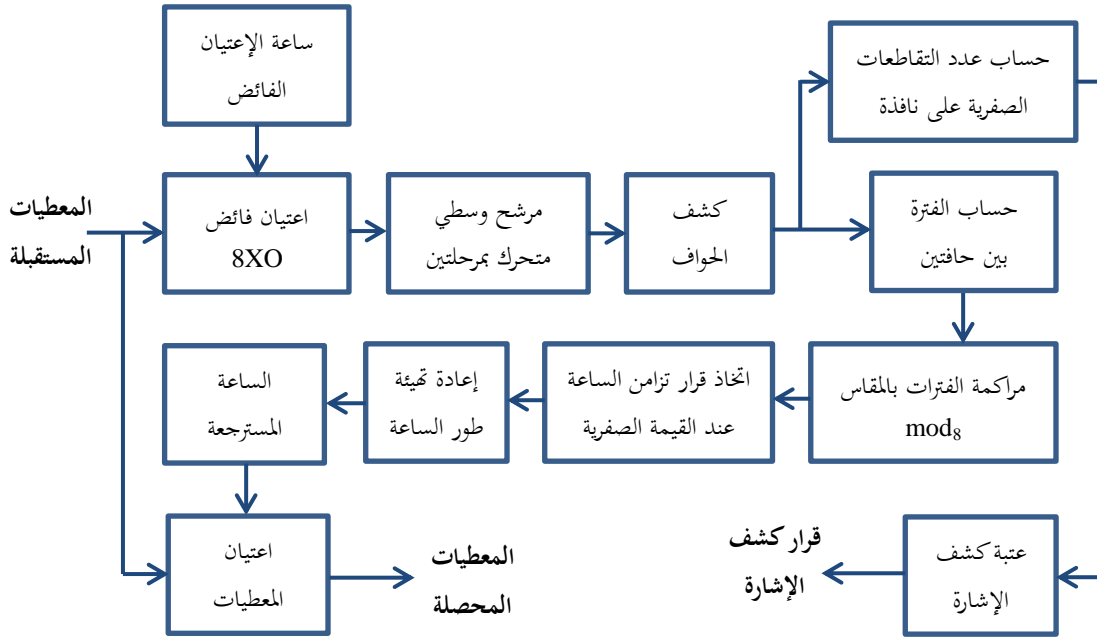
### ٣-٣- الآلية الجديدة المقترحة لاستعادة ساعة تزامن النظام وكشف وجود الإشارة

يتصل خرج كاشف التعديل الرقمي في النظام المعمول عليه بشكل مباشر بكتلة المعالجة الرقمية. هذا الخرج هو عبارة عن إشارة المعطيات المستقبلية بشكل غير متماسك، وهذا الخرج يكون مصحوب بارتعاش من طبيعتين مختلفتين، ارتعاش عشوائي ناتج عن وجود ضجيج القناة، وارتعاش حتمي ممكن أن ينشأ لعدة أسباب أهمها وجود تشويه بعرض النبضة  $duty\ cycle\ distortion$  بسبب الضبط الغير جيد لعتبة كاشف التعديل، كما يمكن أن ينشأ أيضاً عن وجود فرق استجابة بين زمن الصعود وزمن الهبوط للكاشف وكذلك تأرجح الساعة  $clock\ skew$  وأثر التداخل بين الرموز ISI وضجيج التغذية. وكما بينا في فقرة تزامن القفز الترددي أن اختلاف توقيت القفز ولو بشكل جزئي يجعل المستقبل يكشف الضجيج فقط على خرجة وبالتالي يمكن اعتبار هذه الفترات الانتقالية بين القفزات أشبه بوجود ارتعاش ولكن مع وجود ضجيج نبضي يشوه خرج كاشف التعديل الرقمي. الهدف إذاً هو بناء خوارزمية تعمل بشكل رقمي خاصة بمزامنة ساعة النظام واستخلاص المعطيات بشكل أمثلي بما يحقق زمن معالجة قصير وذلك أخذاً بالاعتبار تحقيق فجز ترددي بأعلى سرعة ممكنة أثناء التزامن.

تم في هذا البحث اعتماد تقنية الإعتيان الفائض الأعمى BO-CDR وذلك لبنيتها الرقمية وبساطة تنفيذها وأدائها الجيد. في هذه الطريقة التي تم شرحها في الفقرة (٣-٢-٣) تتم أمثلة اختيار طور الساعة وزيادة احتمالية الكشف الصحيح له عن طريق تأمين كشف تتابع خمس حواف للمعطيات ضمن واحد من النطاقات الزمنية للإعتيان الفائض، أي بمعنى أن المسافة بين أي حافتين هي من مضاعفات زمن البت، والارتعاش هنا يجب أن يكون صغير ويتم ضمن النطاق ذاته. هذا الشرط هو قاس جداً في ظل وجود الارتعاش وبالتالي ممكن لهذا الكشف أن يستغرق زمن طويل كفيلاً بأن يجد إمكانية هذه الطريقة من ملاحقة الارتعاش واختيار الطور الصحيح المتوافق معه وهو ما يؤدي لزيادة احتمال الخطأ بالبت.

### ٣-٣-١- فكرة استخدام المراكم المقيس للمسافات بين الحواف المكشوفة

الفكرة الجديدة المطروحة هنا تعتمد على أن القيمة الوسطية لتوزيع الارتعاش تساوي الصفر، وبالتالي مهما كان أثر الارتعاش في زيادة أو إنقاص عرض البت فإنه وسطياً سيحافظ على قيمته المفروضة. ومن هنا نشأت فكرة استخدام الحساب التراكمي بالمقاس  $M$  ( $Mod_M$ ) للمسافة بين الحواف المكشوفة في المعطيات المستقبلية، حيث  $M$  هو معدل الإعتيان الفائض. ويمكن في الإعتيان الفائض تقدير هذه المسافة بين الحواف بدلالة عدد العينات المأخوذة بينهما. وبالتالي حالما يتم الحصول على القيمة صفر لحساب المسافات المتراكمة تكون هذه اللحظة هي ذات الاحتمالية الأعظم لبداية البت الصحيحة. في هذا التصميم يتم استخدام ساعة خاصة لاسترجاع المعطيات تكون مستقلة عن ساعة الإعتيان الفائض الأعمى وبحيث يكون لهذه الساعة تردد مساو لمعدل المعطيات مع إمكانية إعادة تهيئتها بمدخل Reset لإعادة البدء من الطور الصفري. وبالتالي يمكن ضبط اعتيان المعطيات بشكل أمثلي في منتصف العين عن طريق تهيئة ساعة اعتيان المعطيات عند كل كشف لقيمة صفرية على خرج المقيس وبالتالي يتم مزامنة الجبهة الصاعدة للساعة مع بداية البت المكشوفة ومن ثم يتم اعتيان المعطيات على الجبهة الهابطة للساعة لتأمين إزاحة بمقدار نصف زمن البت عن لحظة كشف حافة موثوقة ضمن المعطيات المستقبلية.



الشكل ٣-١٣ : المخطط الصندوقي للبنية الجديدة والمقترحة لاستعادة ساعة النظام واستخلاص المعطيات بالاعتماد على الجمع المقيس للمسافات بين الحواف

المخطط الصندوقي لهذه الطريقة الجديدة مبين بالشكل (٣-١٣). وفيها تم اتباع اعتيان فائض أعمى 8XO للمعطيات بحيث يتم أولاً تمرير العينات على مرشح تمرير منخفض لنبذ النبضات الضجيجية وتحديد مركز المنطقة المقابلة للضجيج في الفترات الانتقالية بين القفزات الترددية، يتم بعد ذلك إيجاد لحظة العبور الصفري والذي يمثل كشف الحواف الصاعدة والهابطة للمعطيات. يتم حساب عدد العينات بين حافتين متتاليتين باستخدام عدّاد خاص يقوم بعد دورات ساعة الإعتيان الفائض بشكل دائم، وفي اللحظة التي يتم فيها كشف حافة يتم تخزين قيمة العداد  $D_n$  في سجل وتتم إعادة تهيئة العداد من جديد. بعد ذلك يتم حساب المجموع المتراكم  $R_n$  بالمقاس  $M=8$  للمسافات بين الحواف عن طريق العلاقة التالية:

$$R_n = \text{Mod}_M(R_{n-1} + D_n)$$

ويتم بعدئذٍ اتخاذ القرار بضبط تزامن ساعة النظام عن طريق إعادة تهيئة ساعة الإعتيان وذلك بتحقيق أحد حالتين اثنتين. الحالة الأولى توافق الحصول على قيمة مراكمة للمسافات بين الحواف من مضاعفات زمن البت، أي خرج  $R_n = 0$ ، والحالة الثانية توافق أن تكون المسافة الحالية المحسوبة بين حافتين  $D_n$  من مضاعفات زمن البت، أي يكون  $R_n = R_{n-1}$ . وبالتالي تتميز هذه الطريقة بالكشف السريع للطور الأمثل لإعتيان المعطيات وقدرتها على ملاحظة هذا الطور بوجود ارتعاش كبير على المعطيات المستقبلية، وبما أن فترة الكشف هي غير ثابتة وغير محدودة فإن لهذه الطريقة القدرة على التزامن مهما كان تردد الارتعاش وبالتالي التوصل لسماحية ارتعاش فائقة.

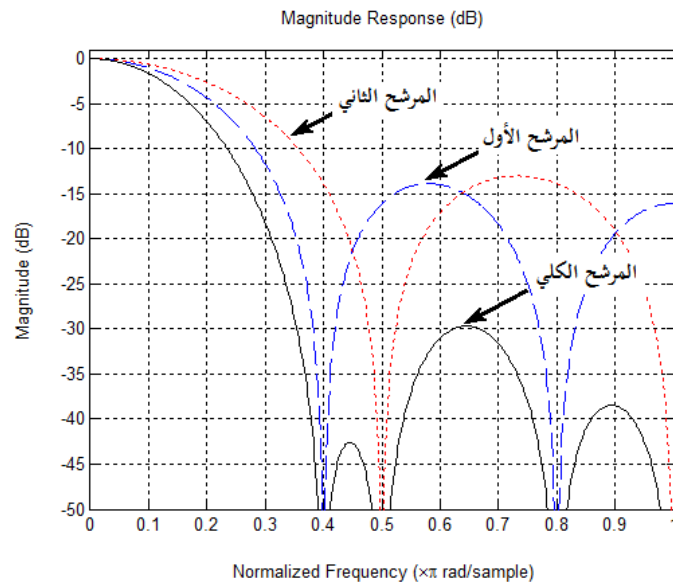
### ٣-٣-٢- طريقة ترشيح النبضات العشوائية

كما تم ذكره سابقاً فإن المعطيات المستقبلية في نظام القفز الترددي المعمول عليه تصبح مشوبة بنبضات عشوائية ناتجة عن طريقة التعتيب لخرج الكاشف المتناسك وذلك ينتج في حالتين إما أن الاتصال يتم في ظل نسبة إشارة للضجيج منخفضة محدود حساسية المستقبل، أو أن يكون القفز الترددي يتم بتوقيت غير متزامن بشكل جيد بين المرسل والمستقبل وبالتالي سيتم كشف الضجيج فقط عند حواف القفزات. ولذلك لابد من تطبيق مرشح للتخلص من هذا الضجيج.

تم اختيار مرشح التمرير المنخفض ليكون من طبيعة استجابة نبضيه محدودة FIR ويتم عن طريق حساب الوسطي لعينات المعطيات ضمن نافذة وعلى مرحلتين، وكل عينة ممثلة على 8 بتات. يعتبر مرشح الوسطي المتحرك moving average أبسط وأكثر طريقة مستخدمة في معالجة الإشارة الرقمية، وتعتبر أيضاً الطريقة الأمثل للتخلص من الضجيج العشوائي وتنعيم إشارة المعطيات المستقبلية مع الحفاظ على استجابة خطوة حادة. بساطة التنفيذ لهذا المرشح تعتمد على فكرة الحساب التتابعي لوسطي العينات، فإذا اعتبرنا إشارة  $x$  وتم اتخاذ نافذة من  $L$  عينة لحساب وسطي الإشارة ضمنها، وبالتالي يمكن كتابة العلاقة التالية:

$$\mu_n = \mu_{n-1} + x_n - x_{n-L}$$

هذه الخوارزمية سريعة جداً بالمقارنة مع طرق تنفيذ المرشحات الأخرى، حيث أن التعقيد الحسابي للوسطي غير مرتبط بطول النافذة  $L$ ، وكما هو واضح فإن هذه الخوارزمية تستخدم فقط عمليتين حسابيتين بسيطتين لكل نقطة بعيداً عن عمليات الضرب التي تتطلبها آليات تنفيذ معظم المرشحات الرقمية الأخرى. ميزة أخرى لهذا المرشح هي أن جميع الحسابات تتم باستخدام أرقام بتمثيل صحيح وبالتالي فهي لا تعاني من أخطاء التدوير والتعقيدات الحسابية لتمثيل الأرقام بالفاصلة العائمة. كما يمكن تحسين الاستجابة الترددية لهذا المرشح بإجراء التنفيذ التتابعي cascade لهذا المرشح بمرحلتين أو أكثر وذلك مع الحفاظ على بساطة التنفيذ.

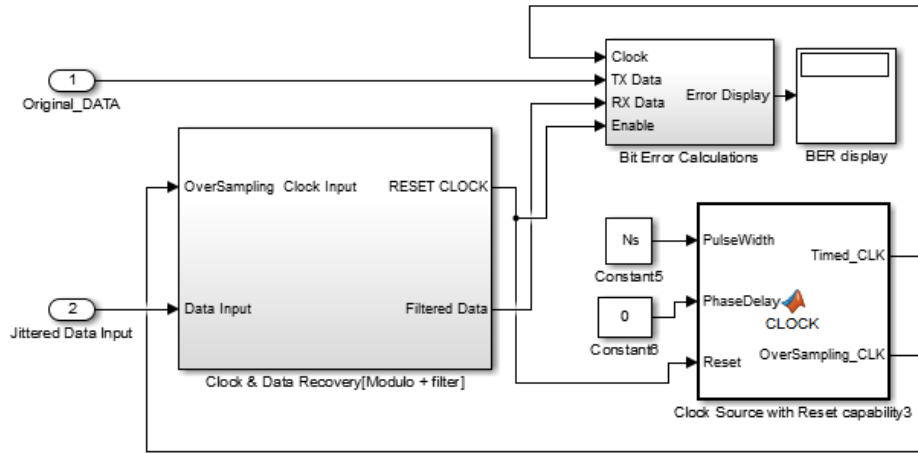


الشكل ٣-١٤ : الاستجابة الترددية لمرشح التمرير المنخفض الرقمي المستخدم في ترشيح المعطيات

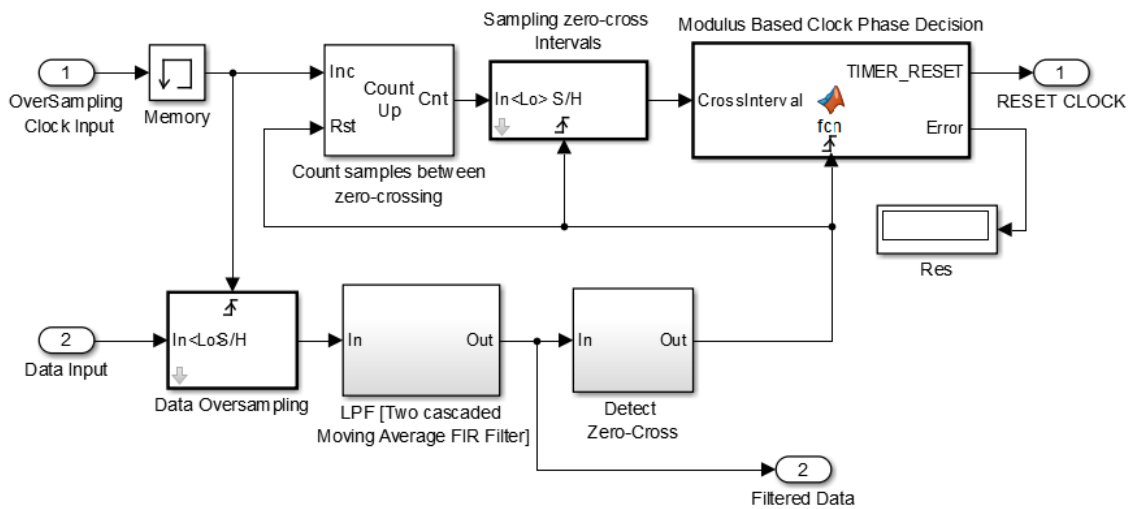
في التصميم المتبع في هذا البحث تم بناء مرشح وسطي متحرك بمرحلتين، الأول مطبق على 5 عينات من المعطيات والناجحة عن التقطيع الفائض 8XO، ومن ثم يتم ترشيح خرج المرشح الأول بمرشح وسطي ثاني على 4 عينات. وبالمجمل يكون عدد العينات المستخدمة في المرشح الكلي يساوي 8 ويساوي عدد عينات البت الواحد. يظهر الشكل (٣-١٤) الاستجابة الترددية للمرشحين المستخدمين كل على حدا، والاستجابة الترددية للمرشح الكلي.

### ٣-٤- المحاكاة والنتائج التي تم التوصل إليها

بداية تم تنفيذ محاكاة لطريقة *Kolka* المتبعة في [16] باستخدام برنامج Matlab Simulink ومقارنة نتائجها مع النتائج النظرية لتلك الطريقة والمستخرجة في [25]. ومن ثم تم تنفيذ محاكاة للطريقة المقترحة باستخدام المراكز المقيس واختبار أداؤها بالمقارنة مع الطريقة المرجعية. يظهر الشكل (٣-١٥) دائرة المحاكاة المنفذة للآلية المقترحة لاستعادة المعطيات وتزامن الساعة. وهي مؤلفة من ثلاث كتل أساسية، كتلة لكشف بداية البت الصحيحة بطريقة حساب الجمع المتراكم والمقيس للمسافات بين حواف المعطيات، وكتلة الساعة المخصصة لإعتيان المعطيات والتي تتميز بقابلية إعادة تهيئة الطور، وأخيراً كتلة اتخاذ القرار واعتيان المعطيات المرشحة بالساعة المستعادة.

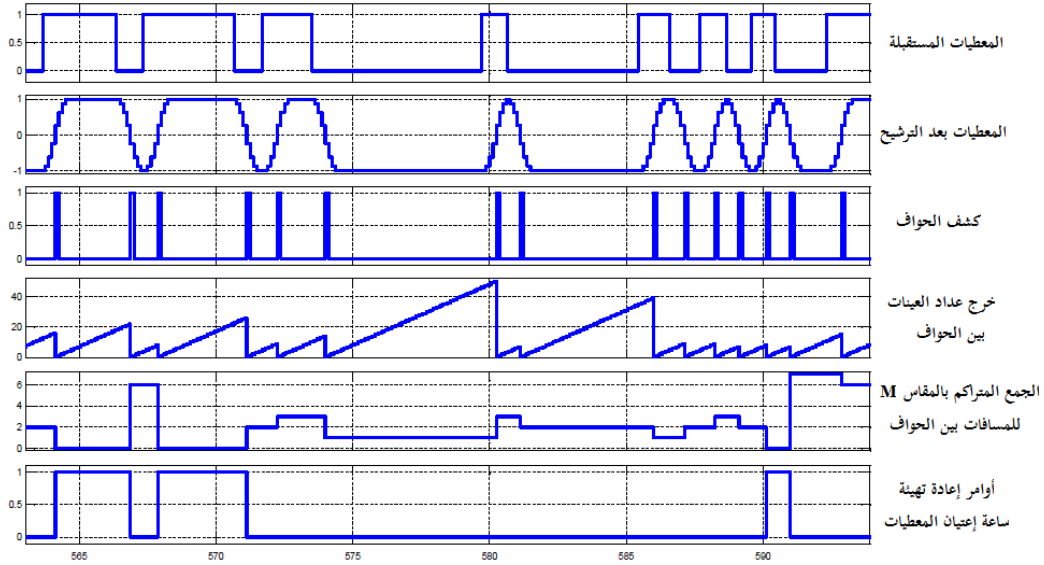


الشكل ٣-١٥: بنية محاكي نظام CDR المقترح باستخدام برنامج Matlab Simulink



الشكل ٣-١٦: البنية الداخلية لكتلة كشف حافة البت الصحيحة بطريقة المراكز المقيس للمسافات بين الحواف

تمت نمذجة الطريقة المقترحة لاستعادة ساعة النظام بالمخطط المبين بالشكل (٣-١٦) وذلك بما يتوافق مع ما تم شرحه سابقاً. ويبين الشكل (٣-١٧) خرج كل مرحلة من مراحل المعالجة ابتداءً من دخل المعطيات المصحوبة بالارتعاش وانتهاءً بأوامر إعادة تهيئة وتصحيح طور ساعة إعتيان المعطيات التي تهدف لملاحقة تغيرات الارتعاش وتحديث مزامنة الإعتيان بمنتصف زمن البت.



الشكل ٣-١٧ : خرج مراحل معالجة المعطيات ضمن كتلة كشف حافة البت الصحيحة بطريقة المراكم المقيس للمسافات بين الحواف

تم في المحاكاة أولاً توليد إشارة ساعة المعطيات بحيث يمكن إضافة ارتعاش ستاتيكي هو عبارة عن إشارة جيبية بمطال وتردد محددين، كما يمكن أيضاً إضافة ارتعاش عشوائي غوسي بما يقابل تشتت محدد للارتعاش. ثم يتم أخذ عينات المعطيات المرسله بهذه الساعة لتوليد المعطيات المصحوبة بالارتعاش.

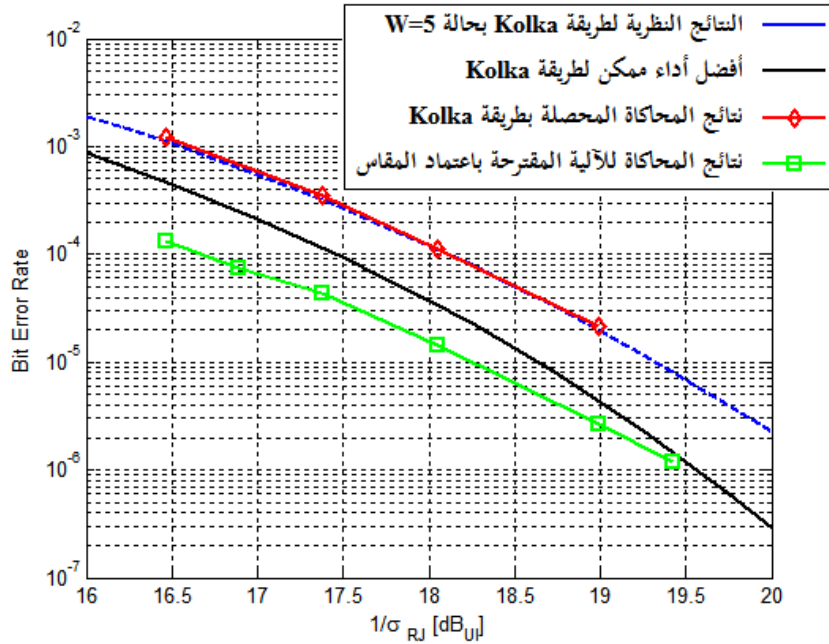
الطريقة المرجعية لتوليد الارتعاش هي إحداث فرق طور في ساعة المرسل كما في العلاقة [Kolka2011 Eq.8]:

$$\Delta\phi_i = (RJ_i + SJ \sin(2\pi f_s i) + k_f i + \phi_0 + 0.5) \text{mod}(1) - 0.5$$

حيث  $RJ$  هو قيمة الارتعاش العشوائي، و  $SJ$  هو مطال الارتعاش الجيبي و  $f_s$  هو تردده بالنسبة لمعدل المعطيات، و  $k_f$  يمثل الإنزياح الترددي المحتمل بين ساعتَي المرسل والمستقبل، بينما  $\phi_0$  هي عبارة عن إزاحة طور ثابتة. ويتم تقييس فرق طور الارتعاش للبقاء ضمن الفترة الواحدة  $[-0.5 \text{ UI}, 0.5 \text{ UI}]$ .

### ٣-٤-١ - النتائج بوجود ارتعاش عشوائي

تم توليد معطيات مصحوبة بارتعاش عشوائي وقيم تشتت مختلفة وإدخال هذه المعطيات لكل من كتلة  $BO-CDR$  التي تعتمد على كشف تتابع  $W = 5$  حافة في المعطيات المستقبلية بشكل حصري ضمن نطاق واحد، وكتلة  $CDR$  المقترحة هنا بالاعتماد على تجميع المسافات بين الحواف بشكل مقيس. ولمفاضلة الأداء بين الطريقتين تم حساب معدل الخطأ بالبت لكل منهما بدلالة مقلوب تشتت الارتعاش ومقارنتهما أيضاً بالنتائج والعلاقات النظرية التي تم استنتاجها لقيمة  $BER$  لطريقة الكشف المتتابع للحواف في [25]. تظهر المنحنيات في الشكل (٣-١٨) تطابق منحي المحاكاة مع المنحي النظري لطريقة  $Kolka$  [25] وهو ما يؤكد صحة المحاكى وصحة النتائج المستنبطة عنه. ويتبين أيضاً أن الطريقة الجديدة المقترحة للكشف باعتماد المقاس تفوق بحوالي  $1.4dB$  عن طريقة  $Kolka$  وذلك عند اعتماد كشف تتابع خمس حواف ضمن منطقة اعتيان واحدة، وبمقدار  $0.8dB$  لحالة كشف تسع حواف وهي تمثل أفضل نتيجة نظرية لطريقة  $Kolka$ ، وذلك عند معدل خطأ بالبت  $1 \times 10^{-4}$ . ومع تناقص تشتت الارتعاش يتقارب أداء الخوارزمية المقترحة من أداء الطريقة المرجعية، ويحدث التطابق عند نقطة قيمة تشتت تساوي حوالي  $\sigma_{RJ} = 0.106$ ، أي بمعنى عندما يصبح تشتت الارتعاش يساوي لعرض نطاق الإعتيان بطريقة  $Kolka$  ويساوي  $1/9 = 0.111$  وبالتالي فإن احتمالية وقوع حواف المعطيات خارج نطاق الإعتيان الذي تم كشفه هي مهملة والأخطاء الناتجة هنا تصبح غير مرتبطة بحالة الارتعاش الذي يمكن اعتباره غير موجود أو لا يمكن تحسسه. وهذا إثبات لصحة الفكرة المقترحة وتوقعات أدائها. الجدير ذكره هنا هو أن هذا الفارق بالأداء (حالة وجود ارتعاش عشوائي) لا يمكن اعتباره فائقاً في تطبيقات الاتصالات السلكية أو البصرية والتي تم ابتكار طريقة  $Kolka$  للعمل فيها، حيث أن معدل الخطأ المعتمد في تلك الأنظمة من رتبة  $10^{-9}$  وما دونها؛ ولكن بالنظر إلى تطبيقات الاتصالات اللاسلكية فإن فارق الأداء سيكون مؤثراً بشكل فعال.

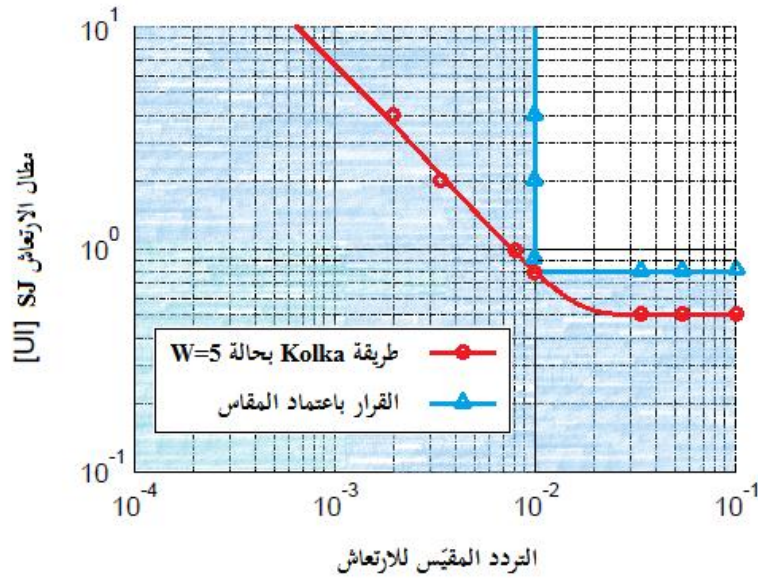


الشكل ٣-١٨ : منحنى معدل الخطأ بالبت للطريقة المقترحة بالمقارنة مع الطريقة المرجعية وذلك بدلالة مقلوب تشتت الارتعاش العشوائي المقاس على خرج المرسل

### ٣-٤-٢- النتائج بوجود ارتعاش جيبي

تم توليد معطيات مصحوبة بارتعاش جيبي بمطالات وترددات مختلفة وإدخال هذه المعطيات لكل من كتلة  $BO-CDR$  المرجعية وكتلة  $CDR$  المقترحة في هذا البحث. أثناء تنفيذ المحاكاة يتم تغيير تردد الارتعاش مع مراعاة اختيار مطال الارتعاش بما يحقق الحفاظ على نسبة خطأ بالبت بمحدود  $1 \times 10^{-3}$  (الحد المقبول للاتصال الصوتي). يمكن بهذا المسح الترددي اختبار حدود سماحية الارتعاش لطرق استعادة الساعة والمعطيات. يلخص الشكل (٣-١٩) النتائج المستخلصة عن تنفيذ آلية المسح هذه والمطالات الأعظمية التي تم الوصول إليها لكل من الطريقتين المرجعية والمقترحة.

يمكن ملاحظة السماحية الكبيرة للارتعاش الجيبي للطريقة المقترحة. حيث تمكن هذه الطريقة من تحقيق سماحية ارتعاش بمطال  $0.8UI$  وذلك مهما كان تردد الارتعاش، كما أنها تعطي سماحية مطال مطلقة عندما يكون تردد الارتعاش أصغر من  $10^{-2}$  من قيمة معدل المعطيات (أي  $f_{jitter}/f_{Bit} \leq 10^{-2}$ ). وطبعاً هذه النتيجة يمكن توقعها وذلك بأن الطريقة المقترحة لا تعتمد مبدأً كشف الحواف ضمن فترات ثابتة، وإنما فترة الكشف باعتماد الجمع المتراكم المقيس هي غير محدودة، وبالتالي فإن تردد الارتعاش لا يؤثر على قدرة الخوارزمية على ملاحظته والمزامنة عليه. طبعاً هذه الأداء الفائق سيكون فعالاً حتماً حتى في الاتصالات السلكية والبصرية والتي يكون للارتعاش الستاتيكي تأثير كبير عليها مقارنة بأثر الارتعاش العشوائي.



الشكل ٣-١٩ : نتائج محاكاة اختبار سماحية الارتعاش الجيبي للطريقة المقترحة وبالمقارنة مع الطريقة المرجعية

الجدير ذكره أنه لم يتم اختبار كفاءة هذه الطريقة عند وجود ضجيج نبضي مصحوب بالمعطيات بالمحاكاة وذلك لأن الطريقة المرجعية غير مهيأة لتفادي هذه المشكلة وهي بالأصل مصممة للاتصالات التسلسلية السلكية أو البصرية.

هذه النتائج الجيدة لها كلفة إضافية حتماً من حيث زيادة التعقيد في البنية والاستطاعة المستهلكة و الحد من سرعة معدل المعطيات التي يمكن العمل ضمنه. حيث أن البنية المرجعية في [16] تعتمد بشكل أساسي على سجلات إزاحة ودارات منطقية OR بأربع مداخل أثناء مرحلة اختيار نطاق كشف الحواف بالمقارنة مع الطريقة المقترحة والتي تستخدم دائرة عداد ودائرة جمع مع تقييس modulus.

## الخلاصة

فيما يتعلق بالتزامن الأولي للقفز الترددي؛ تم اقتراح طريقة صلبة قادرة على ممانعة الضجيج والتشويش وبقابلية رصد واستهداف منخفضة. تم ذلك عن طريق الاستفادة من ميزات كل من تقنية القفز الترددي التفاضلي أو المترابط DFH وتقنية القفز الترددي المحكوم بالمعطيات MDFH. حيث تم ابتكار فكرة إيجاد قنوات تحكم خاصة لنقل معلومات التزامن، وكل قناة تحكم تمثل عدداً من الترددات المختلفة والتي يتم القفز فيما بينها تبعاً لتعريشة انتقالات خاصة بهذه القناة، ويتم إرسال معلومات التزامن على جميع قنوات التحكم وبترتيب قفز ممكن أن يكون عشوائياً ومتداخلاً بين الترددات المتلاحقة للقنوات، وبالتالي يتم ضمان تزامن جميع العقد مع حل مشكلة الدخول المتأخر للنظام. وتم استخدام MDFH لزيادة الكفاءة الطيفية أثناء نقل معلومات التزامن وهو ما يسمح أيضاً بجعل فترة التزامن الكلية للنظام ضمن زمن قدره 0.5 ثانية. كما تم اتباع نثر معلومات التزامن زمنياً بتقنية التتالي المباشر بهدف تحقيق الوثوقية العالية وكشف الجيد للمعلومات المستقبلية وتأمين الممانعة ضد التشويش والضجيج.

وفيما يخص استعادة الساعة والمعطيات؛ فقد تم تنفيذ محاكاة لتقنية الإعتيان الفائص الأعمى بالطريقة المتبعة في [16] والتي تعتمد شرطاً حازماً في كشف طور الساعة الصحيح هو الحصول على تتابع عدد محدد من حواف المعطيات ضمن أحد نطاقات تجزئة زمن البت بالإعتيان الفائص ولنافاذة زمنية ثابتة. وبعدها تم التأكد من صحة المحاكاة السابقة بمطابقة المنحنيات الناتجة مع منحنيات العلاقات الرياضية المحسوبة في [25]. ثم تمت نمذجة الطريقة الجديدة المقترحة لاستعادة الساعة والمعطيات بنفس تقنية الإعتيان ولكن بقرار كشف مختلف يحقق الدقة المطلوبة وبالوقت ذاته من بنافاذة كشف غير محدودة، وذلك باستخدام فكرة الجمع المتراكم والمقيس للمسافات بين الحواف المكشوفة. وبالنتيجة، تبين أن الطريقة المبتكرة تفوق بأدائها الطريقة المرجعية المقارن بها وذلك من حيث سماحية الارتعاش بنوعيه العشوائي والستاتيكي.

## الآفاق المستقبلية

إمكانيات التطوير والمتابعة بهذا العمل كثيرة ممكن أن نذكر منها ما يخص تقنية القفز الترددي التالي:

- ١- يمكن تطبيق محاكاة لآلية تزامن القفز الترددي على برنامج OPNET وذلك على شبكة غائية تعمل بتقنية FH، حيث يمكن دراسة فاعلية طريقة التزامن المقترحة ضمن سيناريوهات تماثل الواقع العملي وفي الزمن الحقيقي. فمثلاً يمكن تمثيل حالات مختلفة للتشويش بغية فحص مناعة آلية التزامن، كما يمكن دراسة أثر التزامن على مراحل في الشبكات الغائية وحساب خطأ الطور المتبقي وذلك لسيناريوهات توزع لعقد الشبكة ضمن مساحات مختلفة وظروف حركية العقد أو سكونها، وهذه المحاكاة ممكن أن تظهر أيضاً أثر غياب المرجعية الزمنية الدقيقة باستخدام مهترزات كريستالية قليلة الكلفة.
- ٢- تطوير نظام القفز الترددي بإدخال مسح للترددية وكشف حالتها الراهنة من خفوت أو تداخل أو تشويش ودراسة كيفية تجنبها باستخدام القفز الترددي المتكيف.
- ٣- إضافة ترميز قناة مع بعثرة بينية ودراسة أثرها في تصحيح الأخطاء وبما يحقق الاستفادة من التباعدية الزمنية والترددية للقفز الترددي.
- ٤- دراسة مدى الاستفادة من الأنظمة متعددة الداخل والمخارج MIMO في تحسين أداء نظام القفز الترددي بظروف محيطية مناوئة.
- ٥- الاتجاه نحو تطبيق القفز الترددي متعدد الحوامل والاستقبال القادر على كشف حزمة ترددية عريضة.

أما الآفاق المستقبلية لتقنية استعادة الساعة والمعطيات فتتمثل بالتالي:

- ١- إيجاد العلاقة النظرية لمعدل الخطأ لدارة استعادة الساعة والمعطيات بالطريقة المقترحة.
- ٢- تطبيق الطريقة المقترحة على دارة FPGA بما يتيح مقارنتها العملية مع الطرق الأخرى من حيث الأداء والتعقيد واستهلاك الطاقة.

## قائمة المراجع العلمية

---

- [1] R. Poisel, "Modern communications Jamming Principles and techniques," 2nd Edition, Artech house, 2011.
- [2] M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz, and B. K. Levitt "Spread spectrum communications: Volume III," Computer Science Press: Maryland, USA, 1985.
- [3] D. Torrieri, "Principles of Spread-Spectrum Communication Systems", 1st Edition, Springer, 2005.
- [4] R.C. Dixon, "Spread Spectrum Systems with commercial applications," 3ed edition, New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [5] M. Song and S. Wigginton "Frequency Hopping Pattern Detection in Wireless Ad Hoc Networks" IEEE Proceedings of In-formation technology: coding and computing, 2005.
- [6] Y.M. Siu, W.S. Chan and S.W. Leung, "SFH Spread Spectrum Synchronization Algorithm for Data Broadcasting" IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 47, No. 1, 2001.
- [7] T. Vanninen, H. Saarnisaari, M. Raustia and T. Koskela "FH-code Phase Synchronization in a Wireless Multi-hop FH/DSSS Adhoc Network, " Proceedings of Military Communication Conference (MILCOM'06), October 23 - 25, 2006.
- [8] D. Herrick and P. Lee, "CHESS, A New Reliable High Speed HF Radio," in Proc. MILCOM, 1996.
- [9] D. G. Mills, D. E. Egnor, and G. S. Edelson, "A performance comparison of differential frequency hopping and fast frequency hopping," in Proc. MILCOM, vol. 1, 2004: 445–450.
- [10] Z. Chen, S. Li, and B. Dong, "Performance Analysis of Differential Frequency Hopping System with Partial Band Noise Jamming Over Rayleigh-fading Channels," IEEE 64th Vehicular Technology Conference, 2006.
- [11] D. Egnor, L. Cazzanti, and J. Hsieh, "Underwater acoustic single- and multi-user differential frequency hopping communications," OCEANS 2008: 1-6.
- [12] Q. Ling, J. Ren, and T. Li, "Spectrally efficient spread spectrum system design: message-driven frequency hopping," Proc. IEEE Intl. Conf. Commun., pp. 4775–4779, May 2008.
- [13] L. Zhang, J. Ren, T. Li, "Jamming mitigation techniques based on message-driven frequency hopping," IEEE GLOBECOM 2009, Honolulu, Hawaii USA. 2009:1-6.
- [14] H. Wang, and T. Li, "Jamming mitigation based on coded message-driven frequency hopping, " Proceeding of Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2009, Pacific Grove, California USA. 2009:1035-1039.
- [15] L. Cong, D. Binhong and L. Dalong, "Performance Analysis of Code-Aided Mapping MDFH System in Rayleigh Fading Channel," ICCAS, 2013 (Volume:1), pp. 100 – 103.

- [16] M. Kubíček, Z. Kolka, Z. “Blind Oversampling Data Recovery with Low Hardware Complexity,” *Radio engineering*, vol. 2010, no. 1, pp. 74-78.
- [17] S. I. Ahmed, T. A. Kwasniewski, “ Overview of oversampling clock and data recovery circuits, ” *IEEE Canadian Conference Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, pp. 1876-1881, 1-4 May 2005.
- [18] S. Lim, H. Cho, J. Shin, “Design and Implementation of Open-Loop Clock Recovery Circuit for 39.8 Gb/s and 42.8 Gb/s Dual-Mode Operation, ” *ETRI Journal*, Volume 30, Number 2, April 2008.
- [19] K. Murata, T. Otsuji, “A Novel Clock Recovery Circuit for Fully Monolithic Integration,” *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 47, no. 12, Dec. 1999, pp. 2528-2533
- [20] Ken Kundert, "Verification of Bit-Error Rate in Bang-Bang Clock and Data Recovery Circuits", *Designer's Guide Publishing*, 2010. Available from [www.designers-guide.org/Design](http://www.designers-guide.org/Design).
- [21] A. Gabr, T. Kwasniewski, "Unifying approach for Jitter Analysis of Bang-Bang CDR Circuits", *ICEIE 2010*.
- [22] S-H. Lee, M.-S. Hwang et al, “A 5-Gb/s 0.25- $\mu$ m CMOS Jitter- Tolerant Variable-Interval Oversampling Clock/Data Recovery Circuit,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 37, no. 12, Dec. 2002, pp. 1822-1830.
- [23] T. Saito, H. Yamashita, and F. Yuki, “A 50-mW/ch 2.5-Gb/s/ch Data Recovery Circuit for the SFI-5 Interface with Digital Eye-Tracking,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 39, no. 4, Apr. 2004, pp. 613-621.
- [24] S. I. Ahmed, T. A. Kwasniewski, “An All-Digital Clock and Data Recovery Circuit Optimization Using Matlab/Simulink,” *IEEE ISCAS*, May 2005.
- [25] Z. Kolka, M. Kubicek “Analysis of CDR with Simplified Selection of Sampling Domain,” *IEEE AFRICON 2011 - The Falls Resort and Conference Centre, Livingstone, Zambia*, 13 - 15 September 2011.
- [26] FLOYD, M. GARDNER. "Charge-pump phase-lock loops." *IEEE Transaction on communications* 28, no. 11 (1980).