

تحليل الأداء الزمني لخطوط الاتصال اللاسلكي تحت تأثير التشويش باستخدام نظرية الشبكات العشوائية

م. مضر علي احمد*

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/٩/١٤ . قُبل للنشر في ٢٠٢٥/١٠/٢٨)

□ ملخص □

يُعتبر التشويش الإلكتروني أحد أبرز التحديات التي تواجه فعالية وموثوقية خطوط الاتصال اللاسلكي، خاصة في البيئات الحرجة مثل الاتصالات البحرية. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل الأداء الزمني وفعالية هذه الخطوط في ظروف كهربية متغيرة مع وجود تشويش مقصود. تم استخدام منهجية قائمة على نظرية الشبكات العشوائية (Stochastic Network Theory) لنمذجة عملية الإرسال باعتبارها عملية عشوائية، مع الأخذ بالاعتبار السيناريوهات المختلفة للعمل (الوضع الطبيعي، وضع التشويش، والانتقال إلى نظام الحماية). تم اشتقاق النماذج الرياضية لدوال توزيع الزمن الواسطي للإرسال الناجح ومؤشرات الاستقرار تحت هذه الظروف. أظهرت نتائج المحاكاة الحاسوبية باستخدام برنامج MATHCAD أن زمن كشف التشويش والانتقال إلى نظام الحماية هو المعيار الأكثر حسماً على الإطلاق للفعالية الكلية، كما اقترح البحث خوارزمية مؤتمتة للكشف السريع عن التشويش تعتمد على تحليل التدفق والرقم التسلسلي للرسائل، مما يسمح بتقليل زمن الكشف بشكل كبير ورفع استقرار الخط إلى قيم تصل فوق 0.99. تقدم هذه الدراسة إطاراً نظرياً وعملياً لتحسين تصميم أنظمة الاتصال لتصبح أكثر مرونة وموثوقية في وجه التشويش المتعمد.

الكلمات المفتاحية: كشف التشويش، نظرية الشبكات العشوائية، التشويش المقصود، خطوط الاتصال اللاسلكي، الاتصالات البحرية، النمذجة بالماتيكاد (MATHCAD).

* قائم بالأعمال في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا

Analysis of the Temporal Performance of Wireless Communication Links Under Jamming Conditions Using Stochastic Network Theory

ENG: Modar Ali Ahmad*

(Received 14/9/2025 . Accepted 28/10/2025)

□ ABSTRACT □

Electronic jamming is one of the most significant challenges facing the effectiveness and reliability of wireless communication links, particularly in critical environments such as maritime communications. This study aims to analyze the temporal performance and efficiency of these links under variable electromagnetic conditions with intentional jamming. A methodology based on Stochastic Network Theory was employed to model the transmission process as a stochastic process, taking into account different operational scenarios (normal mode, jamming mode, and transition to protection system).

Mathematical models were derived for the distribution functions of the mean time of successful transmission and stability indicators under these conditions. The results of computer simulations using MATHCAD demonstrated that jamming detection time and switching to the protection system is the most critical criterion for overall efficiency. The research also proposed an automated algorithm for rapid jamming detection based on flow analysis and message serial numbers, which significantly reduces detection time and increases link stability to values exceeding 0.99. This study provides a theoretical and practical framework for enhancing the design of communication systems to make them more resilient and reliable against intentional jamming.

Keywords: Jamming Detection, Stochastic Network Theory, Intentional Jamming, Wireless Communication Links, Maritime Directions, MATHCAD Modeling.

*Officer in Charge in the department of Communication Technology – Faculty of Communication Technology Engineering – Tartous Universit

١ - مقدمة:

تتجلى الميزة الأساسية لخطوط الاتصال اللاسلكي (RCL) الحديثة في وجود نظام عمل إضافي يؤمن الاستقبال الموثوق Certain Receiving للإشارات (الرسائل) في ظروف التشويش Jamming Conditions والموقف الإلكتروني المعقد. يختلف نظام العمل هذا عن أنظمة العمل التقليدية المستخدمة باستخدام ترميز ذو استقرار عالية High Stability، وبتحويل الإشارات من ضيقة العصبية إلى إشارات عريضة العصبية، وبالمعالجة المكانية - الزمانية للإشارات، ثم أن الانتقال إلى نظام الحماية ضد التشويش يتم بعد كشف حقيقة وجود تشويش أو من خلال وجود معلومات مسبقة أو إضافية عن وجود تشويش [1]. إن المميزات الزمنية لعملية الإرسال في نظام الحماية تختلف عن المميزات الزمنية لعملية الإرسال في نظام العمل العادي وهذا ما يعرقل استخدام نماذج محددة لتحليل ودراسة فعالية عمل خطوط الاتصال في ظروف غير معروفة (هل هناك تشويش مقصود أم لا وكيفية تنظيم الإرسال) [2].

٢ - هدف البحث وأهميته:

يهدف هذا البحث إلى تحليل عمل خطوط الاتصال اللاسلكية ودراسة فعاليتها في ظروف كهربية متغيرة بوجود تشويش وتحديد المميزات الزمنية لعملية الإرسال.

٣ - طريقة البحث ومواده:

لدراسة خطوط الاتصال اللاسلكي والمميزات الزمنية لعملها في ظروف كهربية مختلفة استخدمنا التحليل الرياضي وطبقنا نظرية الشبكات العشوائية The Stochastic Network Theory، وأجرينا النمذجة البرمجية حاسوبياً باستخدام برنامج MATHCAD.

٣-١ - نمذجة عمل خطوط الاتصال اللاسلكية على الاتجاهات البحرية:

إن أحد أهم المسائل التي يتم بحثها عند حل مسألة حساب فعالية منظومات الاتصال العاملة على الاتجاه البحري هي مسألة تحديد احتمال وصول معلومات محددة إلى المشترك وزمن وصولها إليه. وغالباً ما يتم وضع متطلبات للمنظومات العاملة على الاتجاه البحري بحيث تلي الاحتياجات وتأخذ بالحسبان خصوصية هذه المنظومات. طبقنا في هذا البحث نظرية الشبكات العشوائية لتحديد مزايا عملية إيصال المعلومات لاسلكياً في ظروف مختلفة باعتبارها عملية عشوائية.

بهدف رفع موثوقية إيصال المعلومات على الاتجاه البحري يمكن أن ترسل تلك المعلومات إلى المشترك لعدة مرات. وهذا ما يستوجب بدوره تحديد الطريقة المثلى لإرسال المعلومات بحيث يتم استقبالها باحتمال محدد وخلال فترة زمنية محددة، وخاصة أن تكرار إرسال المعلومات يفرض بدوره استخدام نبضات بعرض محدد بحيث يتم تحقيق المستوى المطلوب من مؤشر الاستقرار Stable Index ضد التشويش [10]. ثم إن تحديد الطريقة المثلى لذلك يتحقق عند معرفة تابع توزيع زمن الإرسال فقط [8]. وسنفترض عند نمذجة هذه المسألة أن احتمال ورود إشارة مرسله في الزمن المخصص لإرسال إشارة أخرى ضعيف جداً.

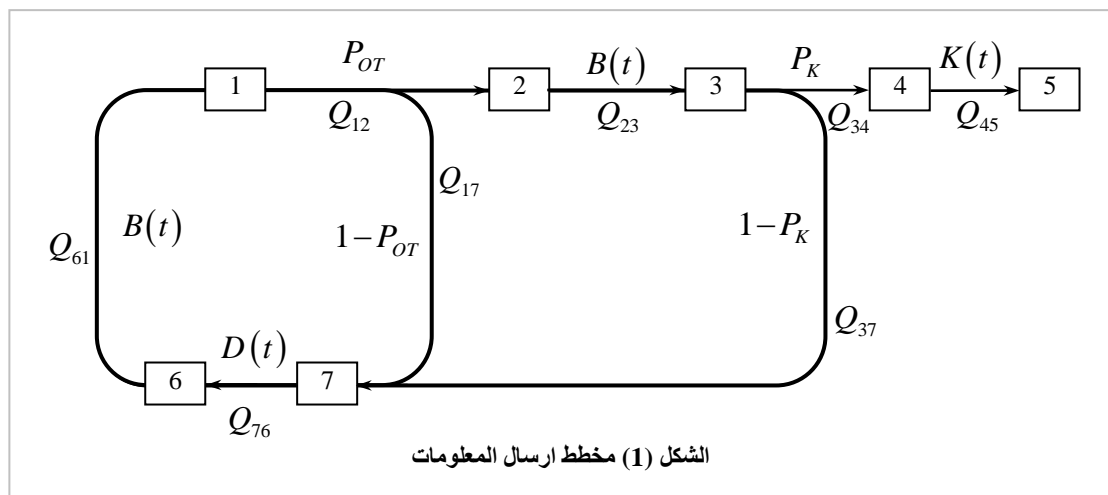
٣-٢ - حساب وتحليل فعالية عمل خطوط الاتصال اللاسلكي بغياب التشويش:

ليكن لدينا خط اتصال لاسلكي يتألف من قنوات اتصال، وفي كل قناة يتم إرسال معلومات (حزم من المعطيات) بحجم عشوائي V وبسرعة إرسال R . ولنعتبر زمن إرسال المعلومة لمرة واحدة $(t_{OT} = V / R)$ قيمة عشوائية تتصف بتابع توزيع $B(t)$ مثلاً. ثم أن خطوط الاتصال اللاسلكي تعمل في ظروف التشويش الدائم (الظروف

الطبيعية) والتي عندها تؤمن المعالجة المسبقة للمعلومة (ترميز المعلومة) إمكانية الاستقبال المضمون للمعلومة المرسله لمرة واحدة باحتمال P_{OT} ، وعدم استقبالها باحتمال $(1-P_{OT})$ (احتمال استقبال المعلومة المرسله لعدة مرات)، وزمن الانتظار الذي يستغرقه تأكيد استقبال المعلومة هو t_w بتابع توزيع $D(t_p)$ ، وهو زمن الانتظار الذي خلاله يمكن إعادة إرسال المعلومة.

في حال تأكد استقبال المعلومة يقوم المستقبل خلال زمن t_k بتابع توزيع $K(t)$ بتأكيد الاستقبال الناجح باحتمال P_K . يكون بالتالي احتمال عدم تأكيد الاستقبال هو $(1-P_K)$ خلال الزمن العشوائي لانتظار التأكيد t_w بتابع التوزيع $D(t)$ ، وبعد ذلك تستمر عملية إرسال المعلومات.

لنعين إذن كل من تابع التوزيع $H(t)$ والزمن الوسطي t_M للإرسال الناجح للمعلومة: يمكن تصور مخطط إرسال المعلومات كما في الشكل (1). لتشكيل الشبكة العشوائية التي تمثل العملية السابقة لا بد من تحديد كل من شكل العقد وبارامترات الفروع التي تقوم بالعمليات الأساسية.



تتحقق العقدة 1 في حال ورود بلاغ جديد على مدخل خط الاتصال اللاسلكي أو في حال عدم نجاح إرسال المعلومة السابق. وفي هذه الحالة لا يتم تقديم المعلومة الجديد حتى يتم إرسال المعلومة القديم. وهذا يعني بأن العقدة 1 تعتبر عقدة احتمالية (بوابة OR). وبالنسبة إلى بقية العقد فتحتوي فرعاً واحداً على خرجها.

وتمثل الفروع Q_{37} ، و Q_{34} ، و Q_{17} ، و Q_{12} القيم الاحتمالية التالية $(1-P_K)$ ، و P_K ، و $(1-P_{OT})$ ، و P_{OT} على الترتيب، وهي قيم ثابتة خلال كامل عملية الإرسال. وبالتالي يعتبر قانون التوزيع للزمن خلال العمليات السابقة نبضياً وتحويل لابلاس من أجل أي قيمة لبارامتر التحويل $s > 0$ يساوي 1.

إن الفرعين Q_{17} و Q_{23} ذات قيم احتمالية تساوي 1، وهما عمليتان عشوائيتان تتحدد بارامتراتهما (زمن العملية واحتمال حدوث العملية) بتابع التوزيع $B(t)$ ، ولذلك يعبر عن هذه الأفرع في الشبكات العشوائية بتحويل لابلاس Laplace Transform التالي:

$$b(s) = \int_0^{\infty} \exp(-st) d[B(t)], \quad (1)$$

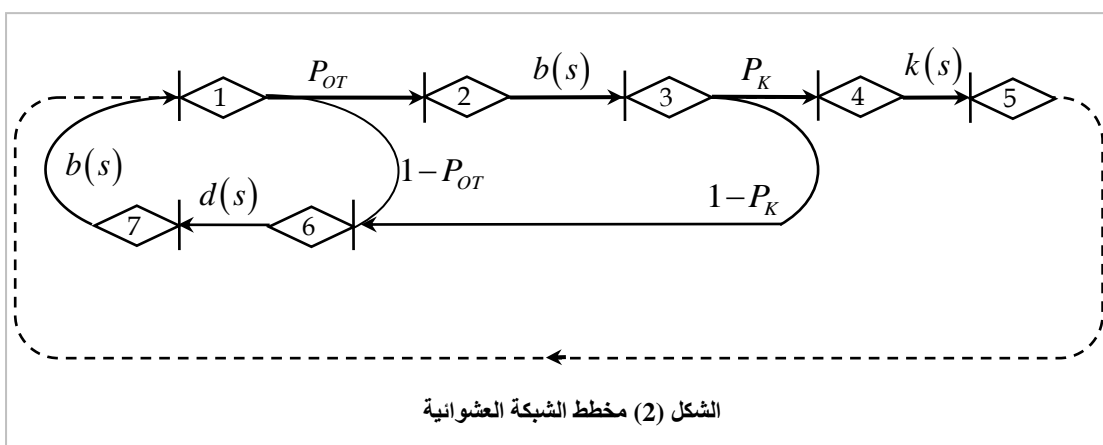
يتم اختيار الفرع Q_{45} باحتمال يساوي الواحد ويعدّ العملية العشوائية الأولية التي احتمال وزمن انجازها يتبعان توزيع $K(t)$ تماماً. ولهذا السبب توصف هذه الفروع في الشبكة العشوائية بتحويل لابلاس التالي:

$$k(s) = \int_0^{\infty} \exp(-st) d[K(t)]. \quad (2)$$

ويتم اختيار الفرع Q_{67} باحتمال 1 عند توفر العقدين 3 و 6، ويُمثل زمن واحتمال تحقق هذه العملية عبر الفرع المشار إليه بتابع التوزيع $D(t)$. ويوصف الفرع المشار إليه في الشبكة العشوائية بتحويل لابلاس:

$$d(s) = \int_0^{\infty} \exp(-st) d[D(t)], \quad (3)$$

وبأخذ العلاقات السابقة بالحسبان يمكننا الحصول على مخطط الشبكة العشوائية المبين في الشكل (2).



نحصل على التابع المكافئ باستخدام معادلة مايسون:

$$H = 1 + \sum_{k=1}^K (-1)^k Q_k(s) = 0, \quad (4)$$

حيث s بارامتر لابلاس، و H التابع المكافئ لدارة مغلقة، و K عدد الحلقات، و $Q(s)$ تحويل لابلاس الموافق للخط.

ومن أجل ذلك نغلق الدارة كما هو موضح في المخطط بالفرع $Q_a(s) = 1/h(s)$ (التابع المكافئ)،

ونحدد كافة الحلقات:

$$Q_{12} Q_{23} Q_{34} Q_{45} Q_a = P_{OT} b(s) P_K k(s) / h(s);$$

$$Q_{16}, Q_{67}, Q_{71} = (1 - P_{OT}) d(s) b(s);$$

$$Q_{36}, Q_{67}, Q_{71} Q_{12} Q_{23} = (1 - P_K) d(s) b(s) P_{OT} b(s),$$

وتأخذ معادلة مايسون للحلقات المتشكلة الشكل التالي:

$$1 - Q_{12}, Q_{23}, Q_{34} Q_{45} Q_a - Q_{16}, Q_{67}, Q_{71} - Q_{36}, Q_{67}, Q_{71} Q_{12} Q_{23} = 0, \quad (5)$$

وبعد التعويض نحصل على العلاقة التالية:

$$1 - P_{OT} b(s) P_K k(s) Q_a(s) - (1 - P_{OT}) d(s) b(s) - (1 - P_K) d(s) b(s) P_{OT} b(s) = 0,$$

وبالتالي التابع المكافئ يأخذ الشكل:

$$h(s) = \frac{P_{OT} P_K b(s) k(s)}{1 - (1 - P_{OT}) b(s) d(s) - (1 - P_K) P_{OT} b^2(s) d(s)}. \quad (6)$$

لتحديد النسب الحسابية لتابع التوزيع نفترض:

$$\left. \begin{aligned} D(t) &= 1 - \exp[-dt] ; \\ B(t) &= 1 - \exp[-bt] ; \\ K(t) &= 1 - \exp[-kt] , \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

حيث \bar{t}_K ، و \bar{t}_W ، و \bar{t}_{OT} ، و $k = 1/\bar{t}_K$ ، و $d = 1/\bar{t}_W$ ، و $b = 1/\bar{t}_{OT}$ هي القيم الوسطية لزمن إرسال المعلومات، والانتظار، وإرسال التأكيد للمعلومات المستلمة على الترتيب.

وبعد تعويض المعادلات (7) في المعادلات (1)، و (2)، و (3)، والعلاقات الناتجة في المعادلة (6) نحصل على العلاقة التالية:

$$h(s) = \frac{P_{OT} P_K b k (d + s) (b + s)}{s^4 + s^3 A + s^2 B + s C + D}, \quad (8)$$

حيث:

$$A = d + 2b + k; \quad B = db + dk + b^2 + 2bk + dbP_{OT};$$

$$C = dbk + b^2 k + dbkP_{OT} + db^2 k P_{OT} P_K; \quad D = db^2 k P_{OT} P_K.$$

وباستخدام منشور Hefi Said الذي يسمح بتحويل العلاقة (8) إلى مجموعة عوامل مرتبطة s_i عند تحقق العلاقة $s_i \neq s_{i+1}$ نحصل على ما يلي:

$$h(s) = \sum_{i=1}^4 \frac{P_{OT} P_K b k (d + s_i) (b + s_i)}{4s_i^3 + 3s_i^2 A + 2s_i B + C} \cdot \frac{1}{s - s_i}. \quad (9)$$

إن الجداء الأول الواقع تحت إشارة المجموع لا يتعلق ببارامتر التحويل s . إذن للحصول على التابع الأصلي $h(t)$ لتحويل لابلاس المعين بالعلاقة (9) والتتابع الأصلية الخاصة الأخرى نستعين بمعطيات الجداول ونعين التابع الأصلي للمقدار $(s - s_i)^{-1}$:

$$L^{-1} \left\{ (s - s_i)^{-1} \right\} = \exp(s_i t).$$

ونحصل بالتالي على التابع:

$$h(t) = L^{-1} \{h(s)\} = \sum_{i=1}^4 \frac{P_{OT} P_K b k (d + s_i) (b + s_i)}{4s_i^3 + 3s_i^2 A + 2s_i B + C} \exp(s_i t). \quad (10)$$

تعبر العلاقة (10) عن تابع كثافة الاحتمال ولذلك يتعين التابع المجهول للتوزيع بالعلاقة:

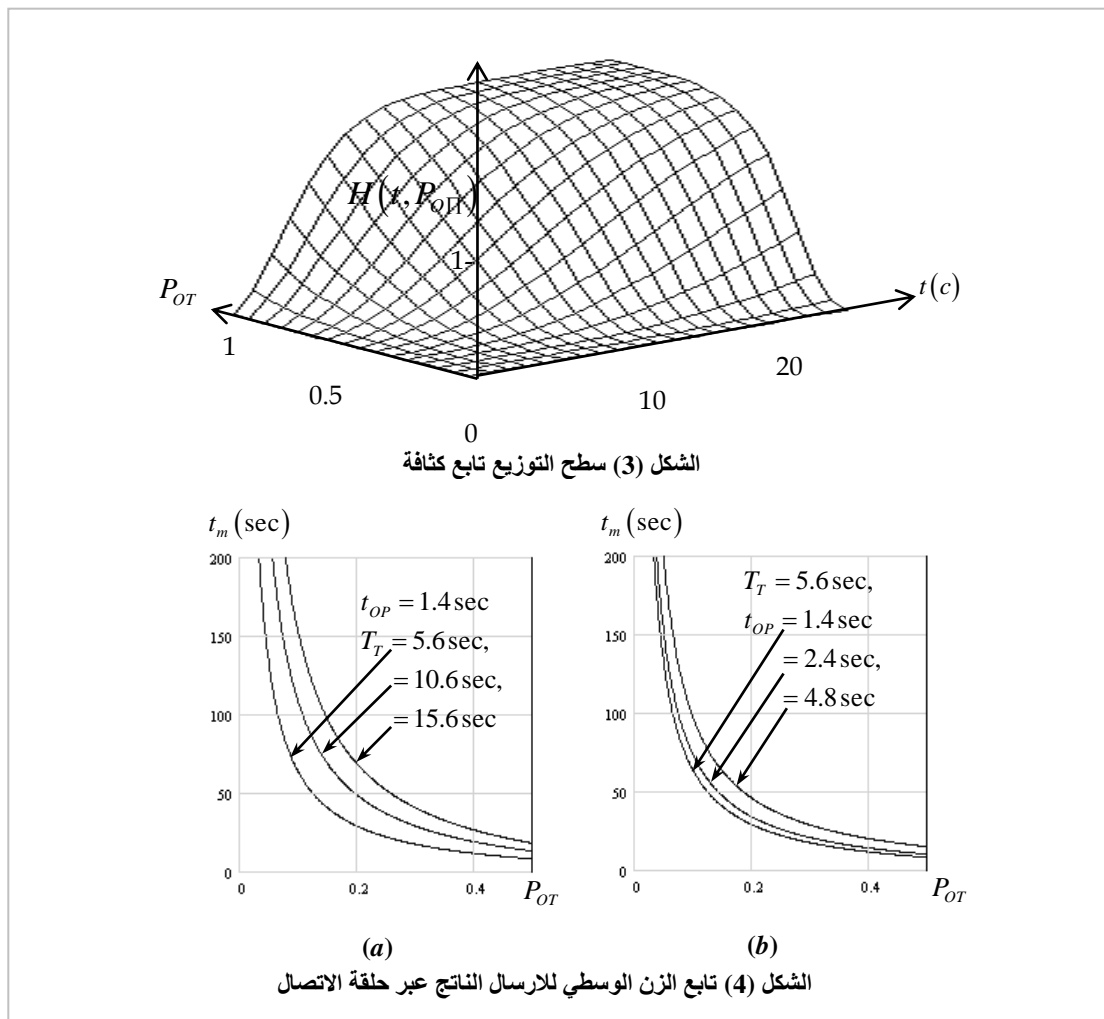
$$H(t) = \int_0^t h(t) dt = \sum_{i=1}^4 \frac{P_{OT} P_K b k (d + s_i) (b + s_i)}{(4s_i^3 + 3s_i^2 A + 2s_i B + C)(-s_i)} [1 - \exp(s_i t)], \quad (11)$$

ويساوي الزمن الوسطي لإرسال ناجح للمعلومة إلى:

$$T_T = \int_0^{\infty} t h(t) dt = \sum_{i=1}^4 \frac{P_{OT} P_K b k (d + s_i) (b + s_i)}{(4s_i^3 + 3s_i^2 A + 2s_i B + C)(-s_i)^2}. \quad (12)$$

يوضح الشكلان (3) و (4) المنحنيات البيانية التي تم الحصول عليها باستخدام العلاقات - (12) (11): يوضح الشكل (3) سطح التوزيعات $H(t, P_{OT})$ ، ويبين الشكل (4-a,b) المنحنيات البيانية المعبرة عن

تابعية الزمن الواسطي للإرسال الناجح للبلاغ - عبر حلقة الاتصال اللاسلكي - للاحتمال P_{OT} . افترضنا عند إجراء الحسابات أن الزمن الواسطي للإرسالات غير المتكررة والفاصل الزمني بينها تساوي إلى $t_{OP} = 1.4 \text{ sec}$ و $T_T = 5.6 \text{ sec}$ على الترتيب. وفي الحالة الخاصة الموافقة لكون $P_{OT} = 0.9$ يلزم 15 ثانية لإرسال ناجح للمعلومة باحتمال $P(t \leq T_3) = 0.95$. يساوي في هذه الحالة الزمن الواسطي اللازم للإرسال الناجح



إلى $T_T = 3.289 \text{ sec}$. تجدر الإشارة هنا إلى أن أحد التدابير المهمة المتخذة لإيصال المعلومات في ظروف التشويش هو اختصار الفاصل الزمني بين الإرسالات.

أضف إلى ذلك، تدل الحسابات على أنه عند تنظيم الاتصال بشكل يسمح بالحصول على تأكيد تلقي المعلومات، فإن الزمن الواسطي لإرسال المعلومة بنجاح يزداد بمقدار t_K / P_K . وللتحقق من ذلك نعين تابع توزيع الزمن الواسطي للإرسال الناجح عبر خط الاتصال اللاسلكي بطريقة التقريب ثنائي اللحظة. ومن أجل ذلك لا بد من حساب قيم بارامترات شكل تابع - غاما غير التام ومقاييسه:

$$\mu = T_K / D_K, \alpha = T_K^2 / D_K$$

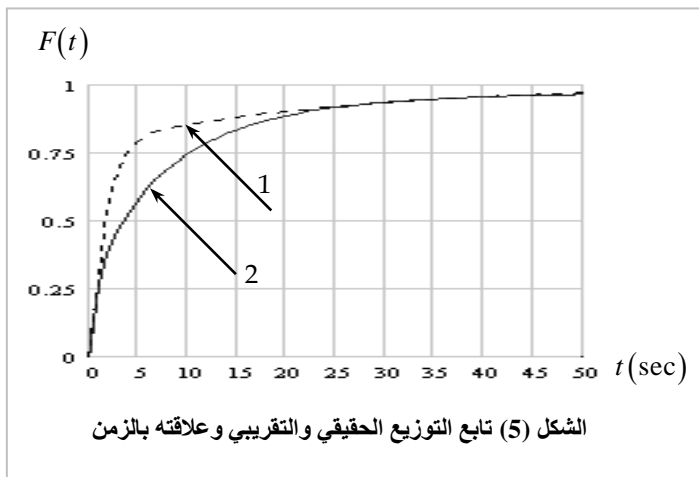
يُحسب التشتت الرياضي من العلاقة التالية:

$$D_K = \sum_{i=1}^4 \frac{K(s_i)}{s_i^3} - T_K^2 . \quad (13)$$

ويتحدد تابع التوزيع في هذه الحالة بالعلاقة التالية:

$$F(t) = \begin{cases} 0, t < 0; \\ \int_0^t \frac{\mu^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp[-\mu x] dx, t \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

يوضح الشكل (5) نتائج الحسابات التي أجريت من أجل القيم الأولية $t_{OP} = 1.4 \text{ sec}$ و $t_K = 0.4 \text{ sec}$ و $P_{OP} = P_W = 0.9$ فالمنحني 1 يعبر عن تابع التوزيع الحقيقي $F(t)$ والمنحني 2 عن التابع التقريبي للتوزيع الذي يعبر عنه بالعلاقة (11).



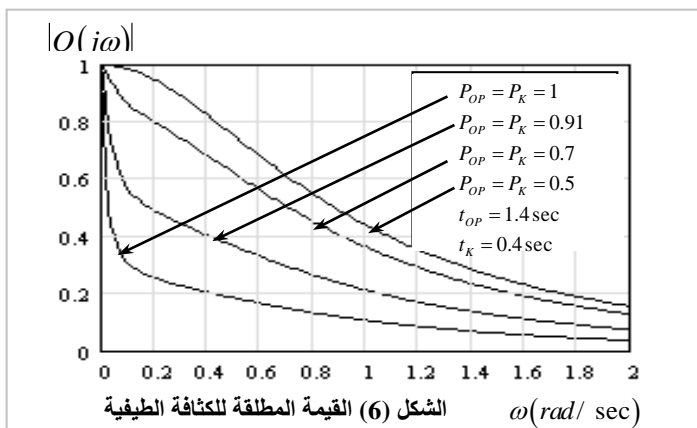
افترضنا أن فعالية العمل باستخدام خط الاتصال تجري باختيار يوافق ألا يكون احتمال الإرسال الناجح أكبر من زمن معطى T_3 . ونحدد كل من التوقع الرياضي $M[X(t)]$ والكثافة الطيفية $|Q(j\omega)|$ باستخدام تابع أولر [7]، والتشتت الرياضي $D[X(t)]$ وفاصل الترابط للعملية العشوائية $X(t)$ بالعلاقات التالية:

$$M[X(t)] = H(t = T_3) = P(t \leq T_3),$$

وبتطبيق علاقة أولر على التابع $Q(j\omega)$ نحصل على القيمة المطلقة للكثافة الطيفية $|Q(j\omega)|$ ، والتي نتائج

حسابها يبينها الشكل (6):

$$Q(j\omega) = \sum_{i=1}^4 K(s_i) \frac{1}{|s_i| + j\omega} \Rightarrow |Q(j\omega)| = \sum_{i=1}^4 \frac{K(s_i)}{\sqrt{|s_i|^2 + \omega^2}}, \quad (15)$$



حيث $K(s_i)$ نتائج حسابات التابع المكافئ $h(s)$ في الأقطاب s_i ($i=1, 2, \dots, n$) والتي تم الحصول عليها من أجل إرسال المعلومة مع تأكيد استلامها من العلاقة (9).

يُعيّن تابع الترابط للعمليات العشوائية بالعلاقة التالية

[4,5]

$$R(0) \leq \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^4 \frac{K^2(s_i)}{2|s_i|} + \frac{2K(s_1)K(s_2)}{\sqrt{|s_1s_2|}} + \frac{2K(s_1)K(s_3)}{\sqrt{|s_1s_3|}} + \frac{2K(s_1)K(s_4)}{\sqrt{|s_1s_4|}} + \frac{2K(s_2)K(s_3)}{\sqrt{|s_2s_3|}} + \frac{2K(s_2)K(s_4)}{\sqrt{|s_2s_4|}} + \frac{2K(s_3)K(s_4)}{\sqrt{|s_3s_4|}} \right], \quad (16)$$

وبعد ذلك نحسب قيمة فاصل الترابط من العلاقة التالية [4,5]:

$$\tau_0 \leq \frac{1}{R(0)} \left[\sum_{i=1}^4 \frac{K^2(s_i)}{2|s_i|^2} + \frac{K(s_1)K(s_2)}{|s_1 + s_2|\sqrt{|s_1s_2|}} + \frac{K(s_1)K(s_3)}{|s_1 + s_3|\sqrt{|s_1s_3|}} + \frac{K(s_1)K(s_4)}{|s_1 + s_4|\sqrt{|s_1s_4|}} + \frac{K(s_2)K(s_3)}{|s_2 + s_3|\sqrt{|s_2s_3|}} + \frac{K(s_2)K(s_4)}{|s_2 + s_4|\sqrt{|s_2s_4|}} + \frac{K(s_3)K(s_4)}{|s_3 + s_4|\sqrt{|s_3s_4|}} \right], \quad (17)$$

ولحساب تشتت معامل الفعالية Efficiency Coefficient من الضروري حساب قيمة $R_{in}(0)$ لقناة اتصال موثوقة تماماً، ونطرح منها القيمة $R(0)$ باستخدام معطيات أولية حقيقية:

$$D[X(t)] = R_{in}(0) - R(0).$$

لنفترض أن عملية إرسال المعلومة عبر خط الاتصال يجب أن تنجز بنجاح خلال زمن T_3 باحتمال ليس أقل من P_3 . في هذه الحالة، تساوي استقرارية خط الاتصال K_{in} هذا (أي احتمال استجابة خط الاتصال في أي لحظة زمنية لمتطلبات احتمال إرسال المعلومات خلال زمن لا يفوق الزمن المعطى)، أخذين بالاعتبار أن عملية تغير معامل الفعالية يخضع لتوزيع غوص، إلى:

$$K_{in} = \Phi \left\{ \frac{H(T_3) - P_3}{\sqrt{D[X(t)]}} \right\}$$

وكمثال على ذلك نجد من أجل المعطيات $t_{OP} = 1.4 \text{ sec}$ ، و $t_K = 0.4 \text{ sec}$ ، و $T_T = t_{OP} = 20 \text{ sec}$ ، و $P_{OP} = P_W = 0.9$ ، و $P_3 = 0.8$ ، و $T_3 = 10 \text{ sec}$ أن احتمال إرسال المعلومة يساوي إلى $P[t \leq T_3] = 0.854$. ويبلغ فاصل الترابط لعملية تغير معامل الفعالية القيمة $\tau_0 = 2.7 \text{ sec}$ ، والتشتت الرياضي لمعامل الفعالية يساوي $D[X(t)] = 0.121$ ، ويبلغ معامل الاستقرارية $K_{in} = 0.587$. وعند رفع قيم الاحتمالين P_{OP} و P_W حتى 0.98 وزيادة T_3 حتى القيمة 40 sec ، فإن قيمة التشتت الرياضي لمعامل الفعالية ينخفض حتى القيمة $D[X(t)] = 0.028$ ، ويزداد الاحتمال $P[t \leq T_3]$ للقيمة 0.993 ومعامل الاستقرارية للقيمة 0.948 .

بهدف اختصار زمن إرسال المعلومات في ظروف التشويش القوي يمكننا استخدام نظام العمل في ظروف الحماية من التشويش. ويتم نقل خط الاتصال من نظام العمل في الظروف العادية إلى نظام العمل في ظروف التشويش، وخاصة بعد كشف حقيقة وجود تشويش. إلا أن المميزات الزمنية لعملية إرسال المعلومات في الظروف العادية تختلف عنها في ظروف التشويش، ولا يمكن استخدام النموذج المبين أعلاه لحساب فعالية عمل خطوط الاتصال اللاسلكي وتحليلها.

٣-٣ حساب فعالية عمل خطوط الاتصال اللاسلكي وتحليلها في ظروف التشويش:

نفرض أنه لدينا خط اتصال لاسلكي يستخدم لإرسال إشارات (رسائل) بمعدل محدد في وحدة الزمن يعبر عنه بكثافة الإرسال. إذن، لدينا ثلاث حالات:

الحالة الأولى: يتم إرسال الرسائل بمعدل محدد خلال زمن عشوائي (أو شبه عشوائي) t_N بقانون توزيع $B(t)$ ، وفي ظروف غياب التشويش.

الحالة الثانية: يوجد طرف مراقب يقوم بكشف عملية التوليف والإرسال خلال زمن عشوائي t_j بتابع توزيع $R(t)$ ، ويبدأ بالتشويش بشكل لا يسمح باستقبال الرسائل المرسل.

الحالة الثالثة وهي خاصة: يتم أثناء عملية الإرسال الكشف عن وجود تشويش، وذلك باستخدام أجهزة خاصة أو بوساطة المستثمر، ويتم الانتقال إلى العمل بنظام الحماية. في هذه الحالة يُعبر عن الزمن اللازم لكشف وجود تشويش والانتقال إلى نظام الحماية Protection System بالمقدار t_p وتابع التوزيع بالتابع $D(t)$.

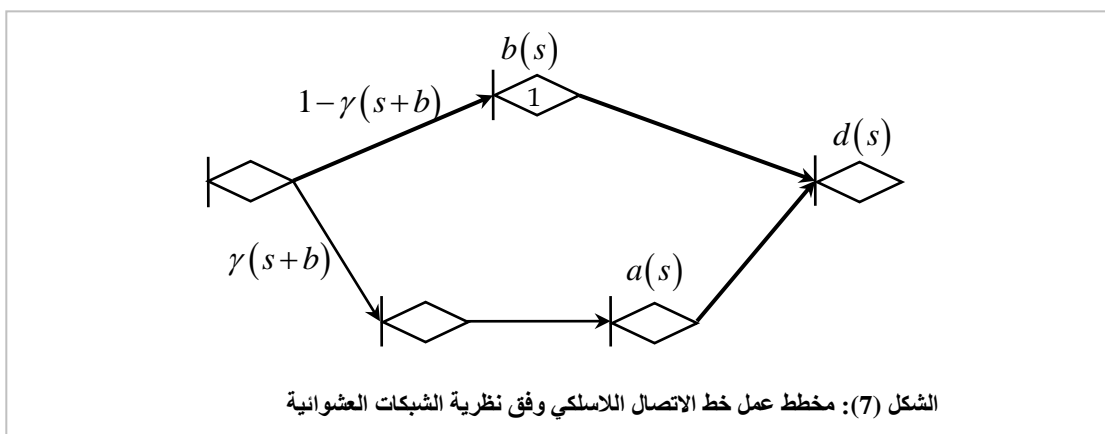
يتم في نظام العمل بالحماية من التشويش إرسال الإشارات بزمن عشوائي t_{jd} وتابع توزيع $A(t)$. ومن الضروري هنا تحديد كل من تابع التوزيع والزمن الواسطي للإرسال الناجح للإشارات عبر خط الاتصال اللاسلكي المعطى. وفي هذه الحالة نضع المخطط المبين في الشكل (7) والمعبر عن عمل خط الاتصال اللاسلكي وفقاً لمعطيات المسألة. ووفقاً لهذه المعطيات يجب أن تحتوي الشبكة العشوائية [5] دارتين (اتجاهين) على الأقل. يتم اختيار الأول منهما باحتمال حصول الحدث التالي: يجري خلال زمن الإرسال في ظروف الضجيج (بدون تشويش) اكتشاف الإرسال ويُنظم التشويش من الطرف الآخر. ويتحدد احتمال حدوث هذه الحالة بقيمة تابع التوزيع للزمن اللازم للقيام بالتشويش $R(t)$ خلال الزمن t_N ، ويُعبر بالتالي عن هذه الحالة بتحويل لابلاس للتابع $R(t)$ بالبارامتر $(s+b)$ حيث s بارامتر التحويل و $b=1/t_N$ الزمن الواسطي للإرسال الناجح للإشارات في ظروف التشويش).

$$\gamma(s+b) = \int_0^{\infty} \exp(-st) h_b(t) d[R(t)], \quad (18)$$

حيث $h_b(t)$ تابع كثافة الاحتمال لزمن الإرسال بشكل ناجح في الظروف الطبيعية بدون وجود تشويش. وبالتالي يُعطى التابع الرياضي الذي يمثل الاتجاه الأول من المخطط بالعلاقة التالية:

$$1 - \gamma(s+b) = 1 - \int_0^{\infty} \exp(-st) h_b(t) d[R(t)], \quad (19)$$

ويوضح الشكل (7) المخطط الذي يعبر عن عمل خط الاتصال اللاسلكي في نظام العمل بالحماية من التشويش.



يعبر المقدار $b(s)$ عن تحويل لابلاس لتابع توزيع زمن إرسال الإشارات في ظروف التشويش المقصود، والمقدار $a(s)$ عن تحويل لابلاس لتابع توزيع زمن الإرسال للإشارات في ظروف التشويش المنظم بنظام الحماية، والمقدار $d(s)$ عن تحويل لابلاس لتابع توزيع زمن كشف التشويش المقصود و الانتقال إلى نظام العمل بالحماية من التشويش المقصود. ويعطى التابع الرياضي المكافئ للشكل (8) بالعلاقة التالية [8,5,3]:

$$h(s) = [1 - \gamma(s+b)]b(s) + \gamma(s+b)d(s)a(s). \quad (20)$$

وتأخذ بالتالي علاقة تابع توزيع زمن الإرسال للإشارات في ظروف تأثير التشويش والضجيج الشكل التالي

[5,3,2]:

$$H(t) = \sum_{i=1}^n -\frac{K(s_i)}{s_i} [1 - \exp(-s_i t)], \quad (21)$$

حيث $H_a(t)$ و $H_b(t)$ تابعان يتطابقان مع ظروف التشويش والضجيج على الترتيب. ويفرض أن:

$$\left. \begin{aligned} D(t) &= 1 - \exp[-dt]; & d &= 1/T_B; \\ R(t) &= 1 - \exp[-rt]; & r &= 1/T_J, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

نحصل على:

$$b(s) = \int_0^{\infty} \exp(-st) \sum_{i=1}^n K(s_{bi}) \exp(s_{bi}t) dt = \sum_{i=1}^n \frac{K(s_{bi})}{s - s_{bi}}, \quad (23)$$

$$a(s) = \int_0^{\infty} \exp(-st) \sum_{i=1}^n K(s_{ai}) \exp(s_{ai}t) dt = \sum_{i=1}^n \frac{K(s_{ai})}{s - s_{ai}}, \quad (24)$$

عندئذ:

$$d(s) = \frac{d}{d+s} \quad (25)$$

$$\gamma(s+b) = r \sum_{i=1}^n \frac{K(s_{bi})}{(s+r-s_{bi})}. \quad (26)$$

نعوض العلاقات (23)، و (24)، و (25)، و (26) في العلاقة (4) ونحدد التابع المكافئ، ومن ثم نجري

التكامل فنحصل على تابع توزيع زمن الإرسال التالي:

$$H(t) = \int_0^t h(t) dt = \sum_{i=1}^n \frac{K(s_{bi})}{s - s_{bi}} \{1 - \exp[s_i t]\} - r \sum_{k=1}^{2n} \frac{f_b(s_k)}{\phi'_b(s_k)(s - s_k)} \{1 - \exp[s_k t]\} - rd \sum_{k=1}^{2n} \frac{f_a(s_k)}{\phi'_a(s_k)(s - s_k)} \{1 - \exp[s_k t]\}, \quad (27)$$

حيث:

$$f_b(s_k) = \left\{ \left[\sum_{i=1}^n K(s_{bi}) \prod_{j=1, j \neq i}^{n-1} (s - s_{bi}) \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n K(s_{bi}) \prod_{j=1, j \neq i}^{n-1} (s + r - s_{bi}) \right] \right\}_{s=s_k};$$

$$f_a(s_k) = \left\{ \left[\sum_{i=1}^n K(s_{ai}) \prod_{j=1, j \neq i}^{n-1} (s - s_{ai}) \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n K(s_{ai}) \prod_{j=1, j \neq i}^{n-1} (s + r - s_{ai}) \right] \right\}_{s=s_k};$$

$$\phi_b(s) = \prod_{i=1}^n (s - s_{bi})(s + r - s_{bi}) = \prod_{i=1}^n (s - s_i),$$

$$\phi'_a(s_k) = \left[\sum_{j=1}^{2n} \prod_{i=1}^n (s - s_i) / (s - s_j) \right]_{s=s_k},$$

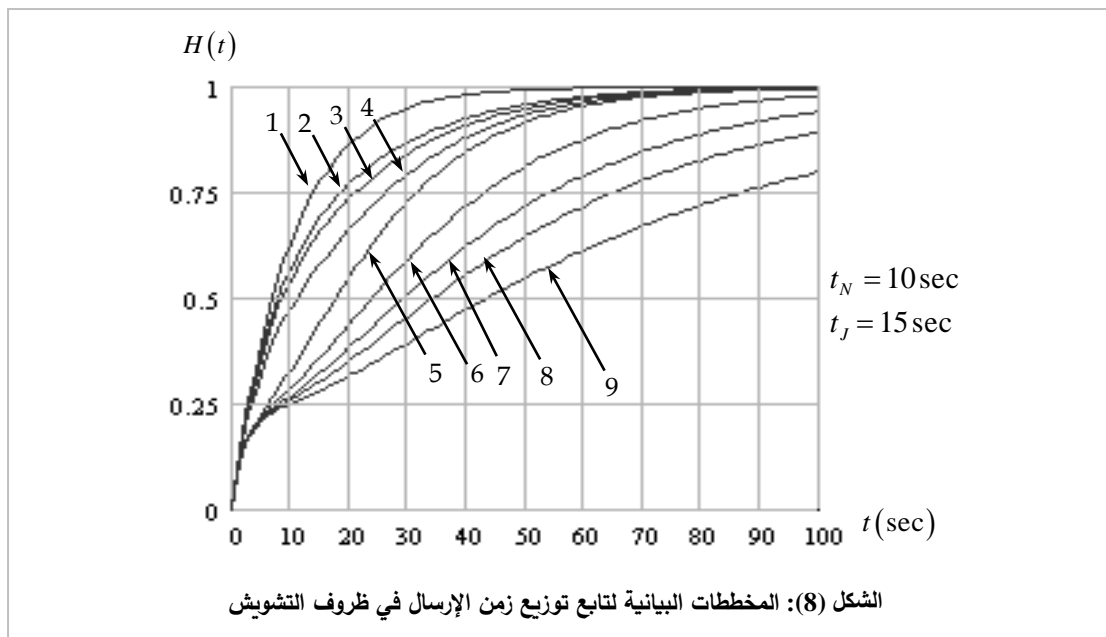
علماً أن $s_i = s_{bi}$ حيث $i \leq n$ ، و $s_{n+i-1} = -(r + s_{bi})$ حيث $n < i \leq 2n$ ، و $s_{2n+1} = -d$

ويساوي الزمن الوسطي للإرسال الناجح للإشارات بنظام الحماية عند وجود تشويش إلى:

$$T_T = \int_0^{\infty} th(t) dt = \sum_{i=1}^n \frac{K(s_{bi})}{(-s_{bi})^2} - r \sum_{k=1}^{2n} \frac{f_b(s_k)}{\phi'_b(s_k)(-s_k)^2} - rd \sum_{k=1}^{2n} \frac{f_a(s_k)}{\phi'_a(s_k)(-s_k)^2}. \quad (28)$$

يبين الشكل (8) نتائج الحسابات التي تم الحصول عليها بتطبيق العلاقة (28).

افترضنا عند إجراء الحسابات أن الزمن الوسطي للإرسال الناجح للإشارات في ظروف التشويش سواء في نظام العمل التقليدي $t_N = 10$ sec، أو في نظام الحماية $t_j = 15$ sec خلال ذلك الزمن الوسطي لكشف التشويش والانتقال إلى نظام الحماية أخذ القيم التالية: $t_p = 10 \dots 60$ sec، والزمن الوسطي لكشف الإرسال وتنظيم التشويش المقصود $t_{wj} = 3 \dots 30$ sec.



يطابق المنحني البياني ذو الرقم ١ حالة عدم وجود تشويش مقصود، والمنحنيات البيانية الموافقة للأرقام من 2 حتى 5 تعبر عن الأزمنة الوسطية $t_{wj} = 3, 10, 20, 30 \text{ sec}$ عندما $t_p = 10 \text{ sec}$. وتم الحصول على المنحنيات البيانية ذات الأرقام من 6 حتى 9 من أجل $t_{wj} = 3 \text{ sec}$ ، وأزمنة كشف التشويش والانتقال إلى نظام الحماية $t_p = 20, 30, 40, 60 \text{ sec}$.

4- النتائج والمناقشة:

تحليل نتائج الحسابات و التوابع الرياضية التي تم الحصول عليها تظهر ما يلي:

١- إن القيم الاحتمالية لزمن الإرسال الناجح للإشارات في الظروف الحقيقية لا يمكن أن تكون أفضل من القيم المحددة بتابع توزيع زمن الإرسال في ظروف العمل بدون وجود تشويش (الخط البياني ذو الرقم ١ الشكل ٨-):

$$\lim_{T_j \rightarrow \infty} H(t) = B(t). \quad (29)$$

٢- أما القيم الأسوء فتحدد فعالية استخدام نظام الحماية وسرعة الانتقال إليه:

$$\lim_{T_j \rightarrow \infty} H(t) = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{dK(s_{ai})}{s - s_{ai}} [1 - \exp(s_{ai}t)]. \quad (30)$$

حيث $s_{ai} = -d$ ، وهذه الحالة تتطابق مع الخط البياني ذو الرقم 9.

٣- لا بد من الإشارة إلى أهمية زمن كشف التشويش والانتقال إلى نظام الحماية كبارامتر حساس وفعال.

٤- يمكن في خطوط الاتصال اللاسلكي نظام simplex اختصار زمن كشف التشويش باستخدام الخوارزمية

المقترحة التالية الموضحة في الشكل (9).

يمكن حل هذه المسألة بسهولة باستخدام التحليل الرياضي المناسب. وبما أن تدفق الإشارات يخضع لقانون توزيع بواسون Poisson Distribution، فإن احتمال استقبال إشارة في اللحظة $N + 1$ يساوي:

$$P_{N+1} = \left\{ 1 - \exp \left[-\lambda Y(N+1) \right] \right\}^N; \quad Y(N) = \sum_{i=1}^N \frac{t_{fi}}{i}, \quad (31)$$

حيث N عدد قيم t_{fi} المقاسة.

إذا لم يتم الاستقبال خلال الفاصل الزمني المتوقع، فإنه يرسل سؤال يتضمن عدد الإشارات المستقبلية حتى لحظة معينة (لحظة استقبال آخر إشارة - رسالة - حزمة)، وفي حالة عدم الاستقبال أو عدم حصول تأكيد على إشارة السؤال يتم الانتقال إلى العمل بنظام الحماية. باستخدام هذه الخوارزمية زمن كشف التشويش:

$$t_{\text{det}} \approx \lambda_{\min}^{-1}, \quad (32)$$

حيث λ_{\min} القيمة الصغرى لكثافة الإرسال.

تم عند تحليل كل مركبة من مركبات التابع (العلاقة 20) حساب قيم الكثافة الطيفية لاحتمال الإرسال الناجح $|Q(j\omega)|$ ، والتابع الترابطي $R(\tau)$ للعملية العشوائية $X(t)$ التي تمثل احتمال الإرسال الناجح للإشارات خلال زمن محدد [5,4] حيث يعطى تابع الكثافة الطيفية بالعلاقة التالية:

$$Q(j\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{f(s_i)}{\varphi'(s_i)} \cdot \frac{1}{|s_i| + j\omega} = \sum_{i=1}^n \frac{f(s_i) \exp[-j \arctan(\omega/s_i)]}{\varphi'(s_i) \sqrt{|s_i|^2 + \omega^2}} \quad (33)$$

والتابع الترابطي يعطى بالعلاقة التالية:

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \sum_{i=1}^n \frac{f(s_i)}{\varphi'(s_i) \sqrt{|s_i|^2 + \omega^2}} \right|^2 \exp(i\omega\tau) d\omega =$$

$$\frac{1}{2\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{i=1}^n \frac{[f(s_i)]^2 \exp(i\omega\tau)}{[\varphi'(s_i)]^2 (|s_i|^2 + \omega^2)} d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2f(s_1)f(s_2) \exp(i\omega\tau)}{\varphi'(s_1)\varphi'(s_2) \sqrt{|s_1|^2 + \omega^2} \sqrt{|s_2|^2 + \omega^2}} dx + \dots + \right.$$

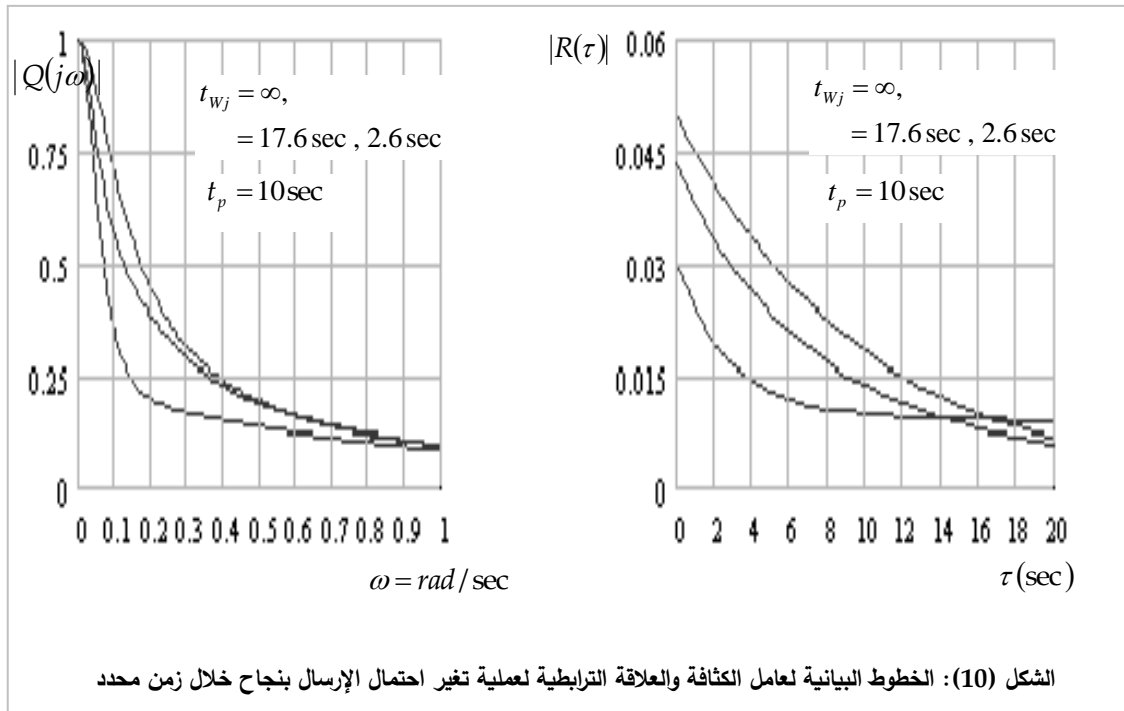
$$\left. + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2f(s_{n-1})f(s_n) \exp(i\omega\tau)}{\varphi'(s_{n-1})\varphi'(s_n) \sqrt{|s_{n-1}|^2 + \omega^2} \sqrt{|s_n|^2 + \omega^2}} dx \right\} \leq \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{[f(s_i)]^2 \exp(s_i\tau)}{2[\varphi'(s_i)]^2 |s_i|^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{f(s_1)f(s_2) \exp\left[-\frac{\tau}{2}|s_1 + s_2|\right]}{\varphi'(s_1)\varphi'(s_2) |s_1 s_2|} + \dots + \frac{f(s_{n-1})f(s_n) \exp\left(-\frac{\tau}{2}|s_{n-1} + s_n|\right)}{\varphi'(s_{n-1})\varphi'(s_n) |s_{n-1} s_n|} \right\};$$

كما يعطى فاصل الترابط بالعلاقة التالية:

$$\tau_0 \leq \frac{1}{R(0)} \left[\sum_{i=1}^n \frac{[f(s_i)]^2}{2[\varphi'(s_i)]^2 |s_i|^2} + \frac{2f(s_1)f(s_2)}{\varphi'(s_1)\varphi'(s_2) |s_1+s_2| \sqrt{|s_1 s_2|}} + \dots + \frac{2f(s_{n-1})f(s_n)}{\varphi'(s_{n-1})\varphi'(s_n) |s_{n-1}+s_n| \sqrt{|s_{n-1} s_n|^2}} \right] \quad (34)$$

يبين الشكل (10) نتائج الحسابات الموافقة للمعطيات: $t_j = 15 \text{ sec}$ ، و $t_N = 10 \text{ sec}$ ، و $t_p = 20 \text{ sec}$ ، والزمن الوسطي $t_m = 17.6 \text{ sec}$ و $t_{Wj} = 2.6 \text{ sec}$ و $t_{Wj} = 10000 \text{ sec}$.



- من خلال مقارنة نتائج حل المسألة الأولى مع نتائج بحث الحالات الثلاثة في المسألة الثانية نجد مايلي (المسألة الأولى ظروف تشويش عادية و المسألة الثانية - تشويش قوي ونظام عمل متلائم):
1. نلاحظ من مقارنة الشكلين (6) و (10) أن طيف عملية إرسال المعلومات بتطبيق نظام الحماية يكون ضيقاً، ويضيق أكثر فأكثر مع زيادة قدرة الطرف الذي يقوم بالتشويش مع مرور الزمن.
 2. يبين التابع الترابطي في الوقت ذاته أنه بازدياد احتمال التشويش المقصود أثناء العمل بدون حماية تضيق العلاقة الترابطية لعملية الحسابات. وهذا ما يسمح بوضع المتطلبات الخاصة بالفواصل الزمنية لاختيار القناة اللاسلكية وفقاً للحالة المدروسة وظروف التشويش.
 3. وبفرض أن $P_3 = 0.85$ و $T_3 = 60 \text{ sec}$ ، نجد أن استقرارية خط الاتصال كمقدار احتمالي $P[P(t \leq T_3) \geq P_3]$ تبلغ القيم 0.981، و 0.998، و 0.852.
 4. تبين من تحليل النتائج أن الخوارزمية المقترحة تسمح لنا بالحصول على نتائج منطقية ثم أن هذه الخوارزمية تبدي استجابة للمعطيات الداخلة والعوامل الأولية.

المراجع

1. Lichtzinder, B.Y., & Privalov, A.Y. (2023). *Generalization of Formulas for Queue Length Moments under Nonordinary Poissonian Arrivals for Batch Queues in Telecommunication Systems*. Problems of Information Transmission, 59(4), 243-248.
2. Likhtsinder, B., & Privalov, A. (2021). *Traffic buffering in multichannel switches of access networks*. In Proceedings of the 2021 7th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). IEEE.
3. Williams, R.J. (2020). *On Stochastic Networks and Activity Analysis*. American Mathematical Society, Providence, RI.
4. Lichtzinder, B.Y., Privalov, A.Y., & Moiseev, V.I. (2023). *Batch Poissonian Arrival Models of Multiservice Network Traffic*. Problems of Information Transmission, 59(1), 63-70.
5. Harrison, J.M., & Van de Vate, J. (2020). *The Stability of Two-Station Multi-Type Fluid Networks*. Operations Research, 48(5), 721-744.
6. *Stochastic network engineering seminar*. (2007). France Telecom.
7. Harrison, J. M. (2002). *Stochastic networks and activity analysis*. American Mathematical Society.
8. Dai, J. G., & Vande Vate, J. (2000). *The stability of two-station multi-type fluid networks*. Operations Research, 48(5), 721–744.
9. Harrison, J. M. (2000). *Brownian models of open processing networks: Canonical representation of workload*. The Annals of Applied Probability, 10(1), 75–103.
10. Williams, R. J. (2016). *Stochastic processing networks*. Annual Review of Statistics and Its Application, 3, 323–345.