

Using the Stochastic Geometry and Characteristics Method for Modeling and Analysis of Interference in Automotive Radar

Dr. Ghadir Madi^{*}
Dr. Khawla Hamwi^{**}
Mary Titizian^{***}

(Received 30 / 8 / 2019. Accepted 23 / 1 / 2020)

□ ABSTRACT □

Automotive radar systems are an important technology that offers intelligent and independent features in modern vehicles to improve road traffic safety. Due to the next large deployment of radar technology, a significant increase in (radar-radar) interference has expected, resulting in lower performance.

This paper addresses the issue of mutual interference between automotive radars resulting from the shared spectrum use and real critical road scenarios. First, we built a model of a real system that simulates the geometrical design of vehicles flowing on the highway, depending on the stochastic geometry of the Poisson point process model with density $\rho(x, t)$. Then, we used the LWR (Lighthill Whitham Richards) characteristic curves to find the distribution function of traffic density at different time intervals of the studied road. Later, we formed a mathematical formula to calculate the mean interference value at different time intervals of the road. The system has tested using MATLAB program.

At the end of the research, we were able to demonstrate the effectiveness of the characteristics method in predicting the distribution function of traffic density, and hence the knowledge of temporal behavior of the interference, especially in real road scenarios.

Keywords: Automotive radars, stochastic geometry, interference modeling, LWR model, characteristics method.

^{*} Associate Professor, Department of Communication and Electronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

^{**} Lecturer, Department of Communication and Electronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

^{***} Postgraduate Student (Master), Department of Communication and Electronics, Faculty Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

استخدام الهندسة العشوائية وطريقة المُميّزات لنمذجة وتحليل التداخل في رادار السيارات

د. غدير ماضي*

د. خولة حموي**

ماري تترزيان***

(تاريخ الإيداع 30 / 8 / 2019. قُبِلَ للنشر في 23 / 1 / 2020)

□ ملخص □

تُعتبر أنظمة رادار السيارات تقنية هامة تقدّم ميّزات ذكية ومُستقلّة في السيارات الحديثة من أجل تحسين السلامة المرورية على الطرق. على الرغم من أهميّة هذه الأنظمة، إلى أنّها تُعاني من مُشكلة تداخل (رادار- رادار) ممّا يؤدّي إلى انخفاض أدائها.

يتناول هذا البحث مسألة التداخل المُتبادل بين رادارات السيارات الناتج عن الاستخدام المُشترك للطيف والسيناريوهات الحقيقية الحرجة على الطرق. بدايةً، فُمنّا ببناء نموذج لنظام حقيقي يُحاكي التصميم الهندسي للسيارات المُتدفّقة على الطريق السريع بالاعتماد على الهندسة العشوائية لنموذج عملية نقطة بواسون (Poisson Point Process) PPP بكثافة $\rho(x, t)$ ، ثمّ استخدمنا مُنحنيات المُميّزات الخاصة بنموذج الموجة الحركية (نموذج LWR (Lighthill) Whitham Richards)) لإيجاد تابع توزّع كثافة حركة المرور $\rho(x, t)$ عند فترات زمنية مُختلفة من الطريق المدروس. فيما بعد، فُمنّا بتشكيل صيغة رياضية لحساب القيمة المتوسطة للتداخل عند فترات زمنية مُختلفة من الطريق. تمّ اختبار النظام باستخدام برنامج MATLAB.

تمكّنا في نهاية البحث من إثبات فعالية طريقة المُميّزات في التنبؤ بتابع توزّع كثافة حركة المرور وبالتالي معرفة السلوك الزمني للتداخل ولا سيما في حالات سيناريوهات حقيقية على الطريق.

الكلمات المفتاحية: رادارات السيارات، الهندسة العشوائية، نمذجة التداخل، نموذج LWR، طريقة المُميّزات.

* أستاذ مساعد-قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

** مُدرّس-قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

*** طالبة ماجستير-قسم هندسة الالكترونيات وتطبيقاتها-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

مقدمة:

أعلنت المفوضية الأوروبية (European Commission) EC أنظمة رادار السيارات كقنينة هامة لتحسين السلامة المرورية على الطرق، وذلك بشكل مُتزامن مع الحوادث المرورية التي تُشكل تحدياً عالمياً كبيراً. تُعتبر أنظمة رادار السيارات أنظمة مُعقدة جداً، ترتكز في بنيتها على حساسات الرادار التي تُمثل العنصر الأهم لمراقبة البيئة المحيطة. تلتقط هذه الحساسات المعلومات الأساسية مثل المدى، الزاوية وسرعة دوبلر وتستفيد منها في تحديد وضع قيادة مُعين وتحذير السائق في الحالات الحرجة [1]. نجد هذه الأنظمة اليوم في الكثير من السيارات الحديثة لتمكين مميزات السلامة والراحة الأساسية، بما في ذلك نظام التحكم بالسرعة التكيّفي ونظام كسر الطوارئ التلقائي، حيث يُمكن للسيارة أن تتباطأ بشكل مُباشر دون تدخل السائق لتجنّب الاصطدام المُحتمل [2].

بالنظر إلى الانتشار الكبير المُحتمل لهذه التقنية، من المُتوقع ازدياد كبير وملحوظ في تداخل (رادار- رادار) بسبب الاستخدام المُشترك للطيف والسيناريوهات التي لا يُمكن تجنبها من حالات حركة المرور على الطرق، مثل حركة المرور القادمة (on-coming traffic) بالإضافة إلى التقاطعات والانعطاف. لذلك أُجريت العديد من الأبحاث حول كيفية تأثير التداخل على نظام الرادار في محاولة لمعالجة مشكلة تداخل رادار السيارات [2].

تمّ البدء بهذه المحاولات من قبل مشروع الاتحاد الأوروبي MOSARIM EU [3]، والذي بحث في مسألة تداخل رادارات السيارات عن طريق إجراء قياسات تجريبية للطرق متبوعةً بمحاكاة مُعقدة للتتبع الشعاعي (ray-complex tracing). اكتشف هذا المشروع بعض تقنيات تخفيف التداخل، وأشار إلى أنه من غير المُرجح أن تؤدي الرادارات المُسببة للتداخل إلى إحداث أهداف غير حقيقية ولكن بدلاً من ذلك سوف تُخلق تداخلاً كلياً مشابهاً للضجيج. اقترحت الدراسة [4] رادار الخطوة الترددية العشوائية (Random Frequency Step) RFS لتخفيف تداخل (رادار-رادار)، وأكدت أنّ الرادار RFS سوف يُخفّف من غموض المدى ويُعزّز الكشف السري (الخفي). تمّت دراسة ومُلاحظة الأهداف الخفية (غير الحقيقية) الناتجة عن التداخل بشكل تحليلي في [5] عند استخدام رادارين مُتطابقين تماماً مع أشكال موجية مُتطابقة، وجدت هذه الدراسة أنه من المُحتمل أن يتسبب الراداران في حدوث تداخل يُشبه الضجيج في السيناريوهات العملية. قامت الدراسة [2] بتوظيف أدوات من الهندسة العشوائية بهدف نمذجة تداخل رادار السيارات عند لحظة زمنية مؤقتة لحركة المرور تكون خلالها حركة السيارات ثابتة على الطريق، مُستخدمةً بذلك نموذجين من التوزيعات المكانية للسيارات. في النموذج الأول (Poisson Point Process) PPP تمّ افتراض عدم وجود انتظام تام في مواقع السيارات، بينما في النموذج الثاني (Bernoli Lattice Process) تكون مواقع السيارات على شبكة مُنظمة تماماً. تحقّقت هذه الدراسة [2] من النموذج المدروس باستخدام برنامج MATLAB ودرست التشابه بين النموذجين، حيث لاحظت أنّ كلا النموذجين لهما نفس إحصائيات التداخل تحت بارامترات النظام العملي وبالتالي انتظامية النموذج الهندسي يملك تأثيراً محدوداً على إحصائيات التداخل. اقترحت الدراسة الأخيرة في هذا المجال [6] تقنية التصميم الموجي المتنوع للكشف مُتعدد الأهداف وتخفيف التداخل المُتبادل بين رادارات السيارات قصيرة المدى، حيث قامت بتطوير نموذج التتبع الشعاعي (ray tracing) الذي يسمح بدراسة تدفق الإشارة بالكامل مع مراعاة انتشار الموجة في سيناريو واقعي لحركة المرور على الطرق، ثمّ قامت بتقييم أداء الشكل الموجي المُقترح في سيناريوهات التداخل المُتبادل المُختلفة. وضّحت نتائج الدراسة الأخيرة هذه أنّ الشكل الموجي المُقترح قادر على اكتشاف الأهداف المُعنية بنجاح مع تخفيف الأهداف الخاطئة في بيانات التداخل المُتبادل.

اعتمدت معظم الدراسات السابقة على الطرق التحليلية والمحاكاة، أدخلت الدراسة [2] طريقة جديدة لنمذجة السلوك العشوائي للتداخل باستخدام أدوات من الهندسة العشوائية مفترضة حركة سير ثابتة بالنسبة لمقطع معين من الطريق وخلال فترة مراقبة معقولة. ولكن وبحسب معرفتنا لم يتم دراسة التداخل بين رادارات السيارات باستخدام الهندسة العشوائية عند حالات سيناريوهات حقيقية على الطريق، مما يتطلب البحث في هذا المجال.

لذا يتمحور بحثنا الحالي حول نمذجة وتحليل التداخل المتبادل بين رادارات السيارات بافتراض سيناريوهين حقيقيين على الطريق السريع. يمثل السيناريو الأول حالة السيارات المصطفة عند الإضاءة الحمراء لإشارة المرور، بينما يمثل السيناريو الثاني حالة السيارات المتدفقة عند الإضاءة الخضراء لإشارة المرور. استخدمنا الهندسة العشوائية لنموذج عملية نقطة بواسون PPP بكثافة $\rho(x, t)$ لتحقيق التوزيع الهندسي للسيارات المتدفقة على الطريق. ثم قمنا بتوظيف منحنيات المميزات الخاصة بنموذج الموجة الحركية (LWR) لإيجاد تابع توزع الكثافة $\rho(x, t)$ على الطريق المدروس. انتقلنا فيما بعد لصياغة علاقة رياضية تصف التداخل الناشئ من حيث القيمة المتوسطة، بالاعتماد على تابع توزع كثافة السيارات $\rho(x, t)$ عند فترات زمنية متتالية مختلفة من الطريق المدروس. أخيراً قمنا بعرض النتائج التي توضح دور منحنيات المميزات في التنبؤ بسلوك تابع توزع كثافة حركة المرور $\rho(x, t)$ عند فترات زمنية مختلفة وبالتالي معرفة السلوك الزمني للتداخل على الطريق المدروس، وتبين لدينا أن هناك علاقة خطية بين الكثافة والتداخل. تحققنا من النموذج المدروس باستخدام برنامج MATLAB.

أهمية البحث وأهدافه:

تتطلب أنظمة السلامة المستقبلية معدلات فشل منخفضة جداً، نظراً لتنبؤ عدد أكبر من السيارات المجهزة بالرادارات، وبالتالي تُصبح احتمالية التداخل المتبادل بين هذه الرادارات مشكلة أساسية يجب تلخيصها بشكل كبير وبشكل خاص ضمن السيناريوهات الحقيقية الحرجة التي لم تُدرس بعد حتى اليوم باستخدام الهندسة العشوائية، وذلك ضمن حدود المعرفة المحصلة خلال فترة الدراسة. من هنا تأتي ضرورة فهم مسألة التداخل عند ظروف حركة سير غير ثابتة في محاولة لاقتراح طرق تُعالج هذه المشكلة.

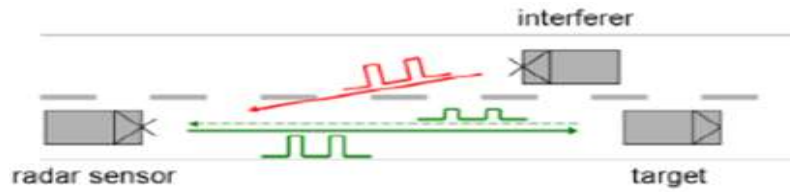
سيُساهم بحثنا في نمذجة وتحليل التداخل المتبادل بين رادارات السيارات عند السيناريوهات الحقيقية التي تتضمن نماذج حركة سير غير ثابتة.

تتركز أهداف البحث في عدة محاور:

- 1- بناء نموذج لنظام حقيقي يُعبر عن التوزيع الهندسي للسيارات المتدفقة على الطريق السريع باستخدام نموذج عملية نقطة بواسون PPP مع كثافة $\rho(x, t)$ ، اعتماداً على نموذج سابق يُحاكي التوزيع الهندسي لحركة سير ثابتة على الطريق [2].
- 2- توظيف منحنيات المميزات الخاصة بنموذج الموجة الحركية (نموذج LWR) لإيجاد تابع توزع الكثافة $\rho(x, t)$ عند فترات زمنية مختلفة من الطريق المدروس.
- 3- معرفة سلوك التداخل عند فترات زمنية مختلفة من الطريق المدروس، وذلك عن طريق صياغة علاقة رياضية تصف التداخل الناشئ من حيث القيمة المتوسطة بالاعتماد على تابع توزع الكثافة $\rho(x, t)$.
- 4- التحقق من النموذج المدروس باستخدام برنامج MATLAB.
- 5- تقييم نتائج الدراسة.

التداخل بين رادارات السيارات:

نظراً للاختراق الواسع المُقبل لتقنية رادار السيارات بحلول عام 2030 كما هو موضَّح في وثيقة الاتحاد الدولي للاتصالات ITU-R [7]، من المُتوقع ازدياد كبير وملحوظ في تداخل (رادار-رادار) بسبب الاستخدام المُشترك للطيف والسيناريوهات التي لا يُمكن تجنُّبها من أوضاع حركة المرور على الطرق مثل حركة المرور القادمة (on-coming traffic) بالإضافة إلى التقاطعات والانعطاف. على سبيل المثال، يُمكن للرادار أن يتعرَّض للتشويش بواسطة السيارات التي تسير في الاتجاه المُعاكس ممَّا يؤدي إلى انخفاض الأداء في قدرة كشف الرادار والذي قد يتزامن مع حالة طريق خطيرة خلال زمن صغير. وبالمثل يُمكن للرادارات المُركَّبة في الخلف أن تتداخل مع الرادارات المُركَّبة في المُقدِّمة من أجل السيارات التي تسير في نفس الاتجاه. يُمكن أن يزداد التداخل أيضاً نتيجة انعكاسات مُتعدِّدة في حركة مرور كثيفة في المناطق السكنية، كما تُعتبر التقاطعات مصدر آخر لتداخل (رادار-رادار) والتي ينتج عنها مشاكل عديدة مثل انخفاض في نسبة الإشارة إلى الضجيج [2]. يُظهر الشكل (1) سيناريو تداخل سيارات بسيط مع تداخل مُباشر من السيَّارة القادمة في الاتجاه المُعاكس، ينشأ التداخل في هذا السيناريو [8] بسبب الاستخدام المُشترك للطيف ونقص التنسيق بين الرادارات الناجم عن عدم وجود آلية تحكُّم مركزية لتخصيص الموارد.



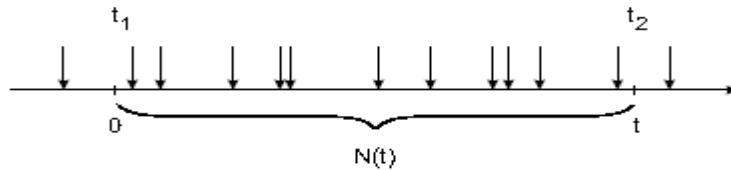
الشكل (1): سيناريو تداخل سيارات بسيط [8]

توجد بالطبع أدوات عديدة للتعامل مع تداخل (رادار _ رادار) والتي تتضمن التصميم الموجي الذكي، طرق الهوائي المُتكيف السريع، بشكل خاص الإلغاء أو التصفير (nulling)، تبديل الاستقطاب، المنهجيات المختلفة لمعالجة الإشارة وغيرها الكثير من تقنيات تخفيف التداخل [2].

عملية نقطة بواسون (Poisson Point Process) PPP:

وفقاً لنظرية الاحتمال هي عملية مستمرة عشوائية تُستخدم لنمذجة الأحداث العشوائية التي تحدث خلال فترة زمنية كبيرة إلى حدٍّ ما مستقلة عن بعضها البعض. تشمل الأمثلة المُحتملة على هذه الأحداث: عدد الحوادث المرورية خلال شهر في مدينة ما، عدد السيارات المارة من مقطع معيَّن من طريق خلال ساعة ما، المكالمات الهاتفية الواردة إلى جهاز هاتف محمول أثناء مدَّة الدوام الرسمي [9].

تُعرَّف العملية رياضياً بعملية العد $\{N(t), t \in [0, \infty)\}$ ، حيث يُشير العدَّاد إلى عدد الأحداث λ التي حدثت في الفاصل الزمني $(0, t)$ أو في الفاصل الزمني (t_1, t_2) كما هو موضَّح في الشكل (2).



الشكل (2): توضيح الأحداث في عملية نقطة بواسون

تُصنّف عملية نقطة بواسون إلى:

• **عملية بواسون المتجانسة (Homogeneous Poisson Process)**

بما أنّ عملية بواسون تتّصف بواسطة المُعامل العددي λ ، فإنّ عملية بواسون المتجانسة تتّصف بمعدّل المُعامل λ أو "الكثافة" وهو العدد المتوقّع من "الأحداث" أو "الوصلات" في كل وحدة من وحدات الزمن.

• **عملية بواسون غير المتجانسة (Non-Homogeneous Poisson Process)**

في هذه الحالة يتغيّر معدّل المُعامل λ مع الزمن، ويُعرف تابع المعدّل العام بـ $\lambda(t)$. بالتالي، يُعطى العدد المتوقّع من الأحداث بين الزمن a و b بالعلاقة التالية:

$$\lambda_{a,b} = \int_a^b \lambda(t) dt \quad (1)$$

أهمية نمذجة حركة المرور:

انطلاقاً من الاختراق الهائل لتقنية رادار السيارات في أيامنا هذه، نتوقع في السنوات القادمة تزويد جميع السيارات تقريباً بهذه الرادارات كما ذكرنا سابقاً، وبالتالي، ستمتّع السيارات بإمكانية مُتابعة بعضها البعض تلقائياً على الطريق. على الرغم من أنّ دوافع الطلب على السيارات المُجهّزة بالرادارات هي السلامة وراحة القيادة، فإنّ تأثيرات هذه السيارات على خصائص تدفق حركة المرور مُهمة أيضاً للسائق ومهندسي المرور [10]. تُساعد نمذجة تدفق حركة المرور المكوّنة من السيارات المُجهّزة بالرادارات على فهم خصائص تدفق حركة المرور المتوقّعة واتّخاذ القرارات (ضبط التدفق) التي من شأنها أن تُساهم في تقليل الازدحام وبالتالي التداخل، ممّا يزيد الإنتاجية الاجمالية لحركة المرور على امتداد الطريق. يُعتبر ذلك مُهماً بشكل خاص من أجل المناطق ذات الكثافة المرورية المُرتفعة الناجمة عن حركة المرور في أوقات الذروة العالية، الحوادث أو إغلاق أحد المسارات أو أكثر على الطرق [11].

النماذج الأساسية لتدفق حركة المرور:

تُستخدم نماذج تدفق حركة المرور لوصف حركة المرور على الطرق والتنبؤ بها. تعتمد مُعظم هذه النماذج على نمذجة عدد السيارات، سرعتها، تسارعها، المسافة والزمن بين السيارات. يتم فيما بعد تقييم أداء الطرق أو شبكات المرور عن طريق إجراء المُحاكاة على هذه النماذج.

تُميز فئتين رئيسيتين من النماذج المُستخدمة لنمذجة تدفق حركة مرورية مُعيّنة:

1- **النماذج المجهرية (Macroscopic):**

تهتم بسلوك المتوسط وتصف حركة المرور كما لو كانت تدفق مُستمر، مثل متوسط كثافة حركة المرور، متوسط معدّل التدفق ومتوسط السرعة على التوالي $\rho(x, t)$, $q(x, t)$, $v(x, t)$ ، حيث $x \in R$ هو الموقع على الطريق و $t \in R_+$ هي الفترة الزمنية [11].

يُمكننا التمييز بين النماذج المجهرية التي تصف حركة المرور باستخدام طريقة التدفق المُستمر (Continuum Flow) كتلك الخاصة بسائل قابل للضغط (نموذج LWR) أو (و) الطريقة الإحصائية عبر النظرية الحركية للغازات. اعتمدنا في دراستنا على الطريقة المُستمرّة (نموذج LWR).

2- **النماذج Microscopic:**

تهتم هذه النماذج بالسلوك الفردي لحركة المرور، أشهرها هي نماذج تتبّع السيارات (Car Following Model)، حيث يقوم السائق بضبط تسارع السيارة حسب الظروف الموجودة في المقدّمة. في هذه النماذج، يتم التعامل مع موقع السيارة كتابع مُستمر وتخضع كل سيارة لمعادلة تفاضلية عادية (Ordinary Differential Equation) ODE

تعتمد على سرعة ومسافة السيارة في المقدمة [11]. يُسمّى النوع الآخر من نماذج Microscopic بـ Cellula Automata أو نموذج التنقل بين السيارات (Vehicle Hopping). يختلف هذا النموذج عن نموذج تتبع السيارات من حيث أنه نموذج مُنقطع تماماً، يتم فيه اعتبار الطريق كسلسلة من الخلايا التي إما أن تكون فارغة أو مشغولة بواسطة سيارة واحدة.

تُعتبر النماذج Microscopic مُكلفة من الناحية الحسابية، حيث يجب إيجاد معادلة ODE لكل سيارة عند كل فترة زمنية، وبالتالي كلما زاد عدد السيارات، زاد حجم النظام المُراد حله. من ناحية أخرى، تُعتبر النماذج المجهرية (Macroscopic) بسيطة، مرنة، كما أنها أقل تكلفةً من الناحية الحسابية وبشكل خاص عند حالات الحركة المرورية المُرتفعة، نظراً لأنها تملك تفاصيل تصميم أقل من حيث التفاعل بين السيارات وبين السيارات وبيئتها. لذلك، من المُستحسن استخدام النماذج المجهرية إذا كان بالإمكان الحصول على نموذج جيد لوصف تدفق حركة المرور.

طرائق البحث ومواده:

- **نموذج LWR (Lighthill Whitham Richards) لتدفق حركة المرور:** تُعطى علاقة تدفق حركة المرور وفقاً لنموذج LWR بالمعادلة التفاضلية الجزئية شبه الخطية (quasilinear PDE) (Partial Differential Equation) التالية [12]:

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{dq(x,t)}{d\rho(x,t)} \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

حيث $\rho(x, t)$ كثافة حركة المرور عند الموقع x والزمن t .

$q(x, t)$ تدفق حركة المرور عند الموقع x والزمن t .

نلاحظ أنّ هذه المعادلة لها الشكل العام

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + c(\rho) \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0, \quad c(\rho) = q'(\rho) \quad (3)$$

حيث $q(\rho) = \rho \cdot v(\rho)$

يُشار إلى هذا النموذج أيضاً باسم نموذج الموجة الحركية.

في معظم الحالات، من الصعب إيجاد الحل الدقيق للمعادلة PDE، ولكن نظراً لبساطة نموذج LWR وحقيقة أنه نموذج فضاء عددي أحادي البعد 1-d، يُمكن إيجاد الحل الدقيق بطريقة المُميزات.

- **مُحنّيات المُميزات لنموذج LWR:**

- **طريقة المُميزات (Characteristics Method):** هي تقنية مُستخدمة على نطاق واسع لحل المعادلات التفاضلية الجزئية PDE، يتم تطبيقها عادةً على معادلات من الدرجة الأولى. تكمن الطريقة في تحويل المعادلة التفاضلية الجزئية إلى مجموعة من المعادلات التفاضلية العادية على طول مُحنّيات مُعينة في المستوى $x - t$ ، والتي يُمكن من خلالها التوصل إلى الحلول اعتماداً على بعض البيانات الأولية المُعطاة، وتُسمى هذه المُحنّيات بمُحنّيات المُميزات [11]. تُستخدم هذه الطريقة التحليلية كأداة رسومية فعّالة لحل نموذج حركة المرور LWR بالتزامن مع علاقة

التدفق-الكثافة $q(\rho)$ لـ Greenshield [13] كما يلي:

نفرض لدينا مسار $x(t)$ بحيث

$$\frac{dx}{dt} = c(\rho) = q'(\rho) = V_{max} \left(1 - \frac{2\rho}{\rho_{max}}\right) \quad (4)$$

تُمثّل المعادلة الأخيرة معادلة مُنحنيات المُميّزات لنموذج LWR، حيث على هذه المُنحنيات يكون لدينا $\frac{d\rho}{dt} = 0$.

وبالتالي تكون القيمة $\rho(x(t), t)$ ثابتة على طول مُنحنيات المُميّزات/المسار وبالتالي

$$\rho(x(t), t) = \rho(x(0), 0) = \rho(x_0, 0) = C(\text{constant}) \quad (5)$$

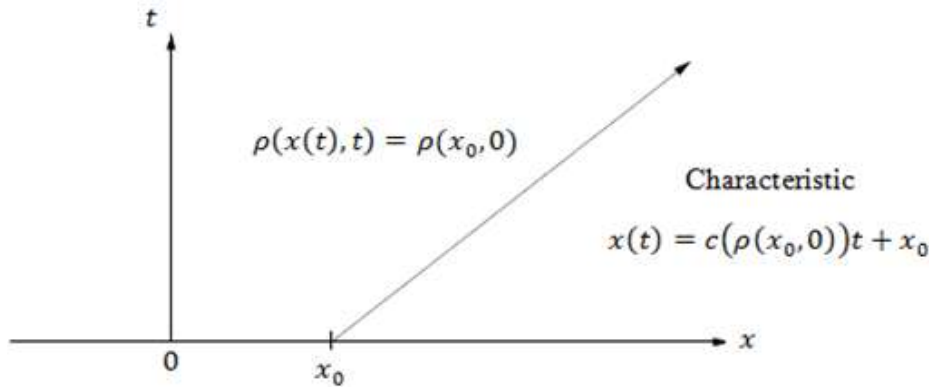
وبما أنّ الكثافة ρ ثابتة على المُنحني المُميّز، هذا يعني أنّ التابع $c(\rho)$ ثابت على طول المسار، من المعادلة (4) نجد

$$\frac{dx}{dt} = c(\rho) = c(C) = D, \quad (\text{constant}) \quad (6)$$

بشكل عام، تُمثّل مُنحنيات المُميّزات $x(t)$ خطوطاً مستقيمةً في (الزمان- المكان) [14].

$$\frac{dx}{dt} = c(\rho(x_0, 0)) \rightarrow x(t) = c(\rho(x_0, 0))t + x_0 \quad (7)$$

يوضّح الشكل أدناه (3) رسماً تخطيطياً لهذه المُنحنيات.



الشكل (3): مُنحنيات المُميّزات لنموذج LWR عند النقطة x_0 والزمين $t = 0$

نموذج النظام المُعتمد خلال الدراسة:

نقوم في هذا القسم ببناء نموذج لنظام حقيقي يُحاكي التصميم الهندسي للسيّارات المُتدفقة على الطريق السريع بالاعتماد على النموذج الهندسي في الدراسة [2] والذي يُحاكي التوزّع الهندسي لحركة سير ثابتة (سيّارات متوقّفة على الطريق)، حيث نعتبر لدينا سيّارة موجودة على طريق سريع ذو مسار أحادي البعد وتُسمّى السيارة النموذجية، ونفترض سلوكها الإحصائي نموذجاً (هو نفسه) لجميع السيّارات الأخرى الموجودة على الطريق.

علاوةً على ذلك، نفترض سيناريوهين حقيقيين على الطريق المدروس: يُعبّر السيناريو الأول عن حالة السيّارات المُصطّقة عند الإضاءة الحمراء لإشارة المرور، ندرس هذه الحالة عند لحظة زمنية مؤقتة لحركة المرور يُمكن خلالها اعتبار حركة السيّارات ثابتة بالنسبة لمقطع مُعيّن من الطريق. بينما يُعبّر السيناريو الثاني عن حالة السيّارات المُتدفقة عند الإضاءة الخضراء لإشارة المرور، نفترض في هذه الحالة لقطات زمنية مُتتالية مُختلفة لحركة المرور تكون خلالها حركة السير غير ثابتة (السيّارات متحرّكة) بالنسبة لمقطع مُعيّن من الطريق.

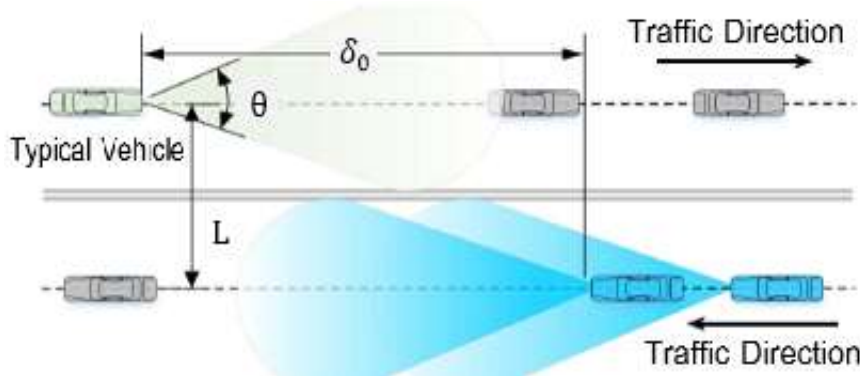
1-النموذج الهندسي:

نعتمد على المُخطّط الهندسي المُبسّط في الشكل (4)، يُظهر هذا المُخطّط السيّارة النموذجية مع السيّارات المُجهّزة في المُقدّمة (مُقدّماتها) برادارات LRR (Long Range Radar) المُسبّبة للتداخل (إدارات التداخل) التي تُسير في الاتجاه المعاكس [2]. تمّ الأخذ في الاعتبار مخطّط هوائي ضيق الحزمة مُحدّد وتجاهل الفصوص الجانبية، عندها تكون السيّارات المُسبّبة للتداخل هي السيّارات التي تقع خارج المسافة الصغرى δ_0 ، تمّ التعبير عنها على النحو التالي [2]:

$$\delta_0 = \frac{L_n}{\tan(\frac{\theta}{2})} \quad (8)$$

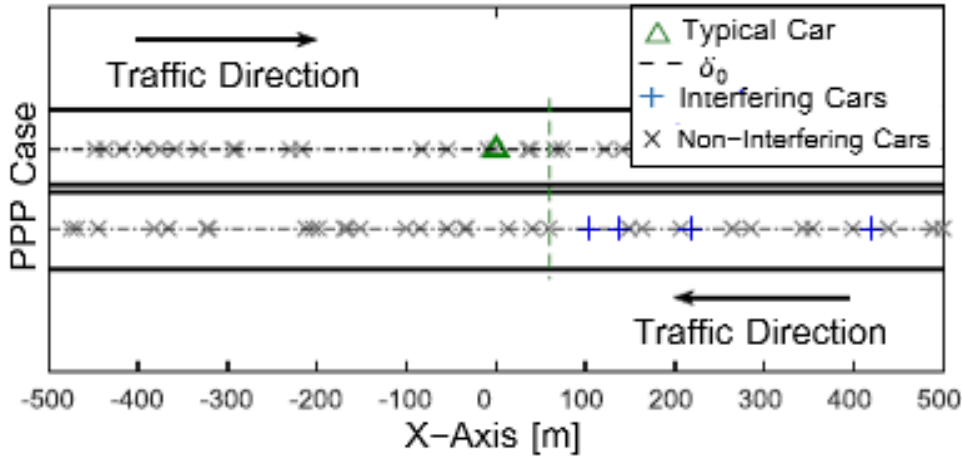
حيث θ هو عرض حزمة الإشعاع للهوائي، L_n المسافة بين مسار السيارة النموذجية والمسارات المُعاكسة، حيث يُمكن أن توجد عدّة مسارات عكسية.

نقوم بنمذجة العشوائية في مواقع السيارات من خلال استخدام إحدى التوزيعات الهندسية المُتطرفة (عمليات النقطة) وهي عملية نقطة بواسون PPP مع كثافة غير مُجانسة $\rho = \rho(x, t)$ ، وذلك بافتراض عدم وجود انتظام تام في مواقع السيارات دون وجود أي (علاقة) ارتباط بين هذه المواقع.



الشكل (4): مخطط هندسي يُشير إلى السيارة النموذجية والسيارات المُسببة للتداخل المُحددة باللون الأزرق [2]

استناداً إلى النموذج السابق، نعتد على المخطط الهندسي المُبسّط في الشكل (5) والذي يُظهر عملية نقطة بواسون المُستخدمة مع توضيح مواقع السيارة النموذجية وسيارات التداخل (السيارات المُسببة للتداخل) [2]،



الشكل (5): النموذج الهندسي لتوزع السيارات وفقاً لعملية نقطة بواسون الخطية [2]

نقوم الآن بشرح عملية نقطة بواسون المُستخدمة بشكل أوضح كما يلي.

- نموذج عملية نقطة بواسون PPP:

يتم تحقيق التوزيع الهندسي لعملية نقطة بواسون (في دراستنا) عندما تكون مواقع السيارات على مسار مُعيّن مُستقلّة تماماً عن بعضها البعض خلال فترات زمنية مُتتالية مُختلفة من الطريق. تُشبه هذه الحالة عملية نقطة بواسون PPP أحادية البعد في R_1 [15] مع كثافة خطية غير مُتجانسة $\rho(x, t)$ للسيارات لكل وحدة طول (بالمتر)، تُشير إلى هذه المجموعة من السيارات باسم φ_{PPP} .

لنمذجة تأثير الوصول للوسط وبالتالي لانتقاط تأثير السيارات التي تقوم بالإرسال بشكل مُتزامن، نقوم بتطبيق عملية الترقق العشوائي (random thinning) على السيارات المُعاكسة للاتجاه φ_{PPP} مع احتمالية احتفاظ مساوية لاحتمالية تصادم الموارد المُعطية كـ ξ ، والتي تُمثل احتمالية استخدام السيارة المُعاكسة في الاتجاه في نفس الوقت (بشكل مُتزامن) نفس الموارد التي تستخدمها السيارة النموذجية. بتطبيق العلامة العشوائية (random marking) على φ_{PPP} نقوم بوصف مجموعة السيارات المُسببة للتداخل على النحو التالي [2]:

$$\Theta_{PPP}(t) = \{x(t): x(t) \in \varphi_{PPP}, M(x, t) = 1\} \quad (9)$$

نقوم بتعريف العلامة $M(x, t)$ كما يلي:

$$M(x, t) = \begin{cases} 0 & : x(t) \leq \delta_0 \\ B(\xi) & : x(t) > \delta_0 \end{cases} \quad (10)$$

حيث نقوم بوضع علامة على السيارات الأقرب من δ_0 على أنها سيارات غير مُتداخلة، $B(\xi)$ هي متغير برنولي العشوائي مع احتمالية احتفاظ ξ .

النتائج والمناقشة:**1- إجرائية المحاكاة:**

فُمنّا بمحاكاة النموذج المُعتمد في دراستنا باستخدام برنامج MATLAB وفق الخطوات التالية:

أولاً، فُمنّا بنشر السيارات على طول $40km$ من الطريق المدروس، ثمّ فُمنّا بعملية جمع التداخل عند السيارة النموذجية عند الفترات الزمنية $t = [1,3,5]minute$ حسب المعادلة (10) من الدراسة [2]، حيث فُمنّا بإعادة صياغة هذه المعادلة على النحو التالي:

$$I(x, t) = \sum_{x \in \Theta} I_x(t) = \sum_{x \in \Theta} \gamma_1 P_0 g_x \|x(t)\|^{-\alpha} \quad (11)$$

حيث $I(x, t)$: التداخل الكليّ عند السيارة النموذجية عند الموقع x والزمن t .

$I_x(t) = \gamma_1 P_0 g_x \|x(t)\|^{-\alpha}$ استطاعة التداخل الناتجة عند الرادار المُعني (السيارة النموذجية) والناجمة عن مُسبب التداخل (السيارة x) عند زمن مُعيّن $t > 0$ ، $\gamma_1 = G_t^2 \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2$ ، ثابت خاص بالرادار، P_0 : استطاعة الإرسال للهوائي، c : سرعة الضوء، f : التردد المركزي، G_t : الريح الأعظمي للهوائي، g_x : شعاع متحوّل عشوائي يُشير إلى عمليات خفوت إشارات التداخل (تُشير x إلى سيارة تداخل مُعيّنة)، يرجع هذا الخفوت إلى الانتشار مُتعدّد المسار الناتج عن الانعكاسات من الأبنية، النباتات والسيارات الأخرى. يتضمّن شعاع المتحوّل العشوائي g_x أيضاً التأثيرات المُمكنة للتظليل (shadowing) بين السيارات والمُسببة بواسطة العقبات الموجودة في مُنتصف الطريق، α : ثابت تخامد المسار.

تُشير $\|x(t)\|$ إلى المسافة الإقليدية المُقاسة من السيارة النمذجية إلى النقطة x عند الزمن t ، $\Theta \in \{\Theta_{ppp}\}$ هي عملية النقطة التي تصف سيارات التداخل (السيارات المُسببة للتداخل).

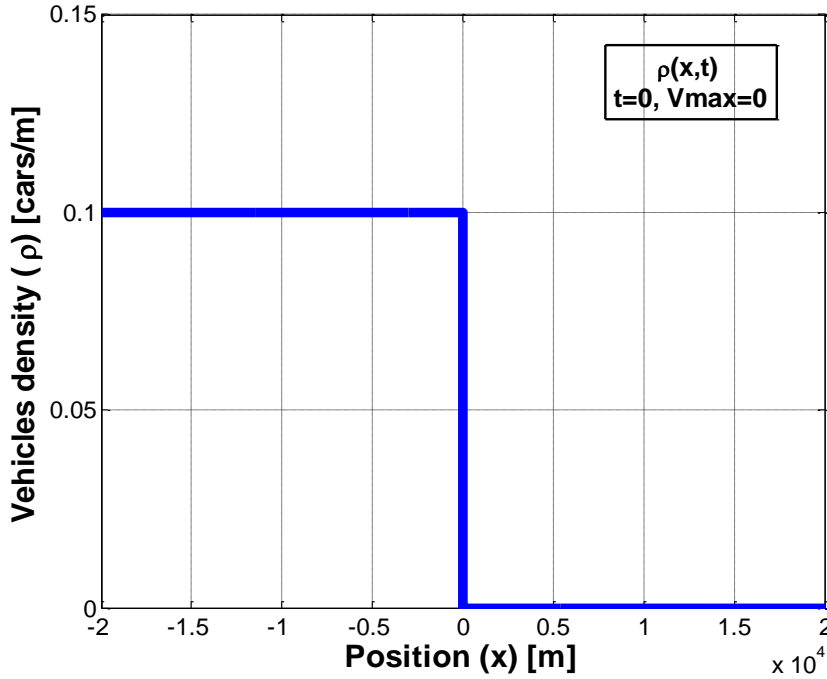
بالنهاية فُمنّا بتكرار السيناريو 300 مرة على الأقل وبذلك حصلنا على إحصائيات التداخل من أجل الأشكال (11) و (12). أظهرت عملية المحاكاة تطابقاً وثيقاً جداً مع الصيغة الرياضية (17) كما هو واضح في الأشكال (11)، (12).

2- النتائج:

• إيجاد تابع توزع كثافة حركة المرور $\rho(x, t)$ بالاعتماد على مُنحنيات المُميزات لنموذج LWR: السيناريو الأول: يُعبّر عن حالة السيارات المُصطفة أمام الإضاءة الحمراء لإشارة المرور عند النقطة $x = 0$ والزمن $t = 0$ ، عندئذ يُعطى التوزيع الأولي لتابع الكثافة المُعبّر عن هذه الحالة بالعلاقة التالية:

$$f(x) = \rho(x, 0) = \begin{cases} \rho_{max} & , x < 0 \\ 0 & , x > 0 \end{cases} \quad (12)$$

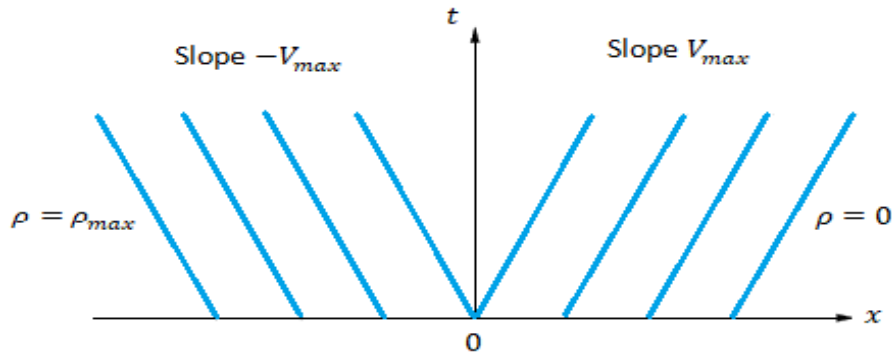
أي أنّ هناك كثافة أعظمية ρ_{max} للسيارات خلف الإشارة وكثافة صفرية (عدم وجود سيارات) أمام الإشارة. يُبين الشكل (6) هذا التوزيع.



الشكل (6): التوزيع الأولي لتابع الكثافة $\rho(x, 0)$ على المقطع المدروس بطول 40km من الطريق السريع عند الزمن $t = 0$ ، الكثافة الأعظمية المسموح بها للسيارات على الطريق $\rho_{max} = 0.1\text{cars/m}$ [2]

السيناريو الثاني: بفرض أن الإضاءة أصبحت خضراء عند زمن مُعيّن $t > 0$ ، نسعى لإيجاد التوزيع الجديد لتابع الكثافة كما يلي:

أولاً: نقوم برسم منحنيات المُميّزات للتوزيع الأولي لتابع الكثافة $\rho(x, 0)$ بالاستفادة من معادلة مُنحنيات المُميّزات لنموذج LWR (4) كما هو موضّح في الشكل (7).



الشكل (7): مُنحنيات المُميّزات لتابع الكثافة $\rho(x, 0)$

نُلاحظ ما يلي:

1. من أجل $x > 0$ ، تُمثّل مُنحنيات المُميّزات خطوطاً مستقيمةً مع ميل $c(0) = V_{max}$ ، حيث تبقى قيمة الكثافة صفيرية (معدومة) على كل خط من هذه الخطوط.

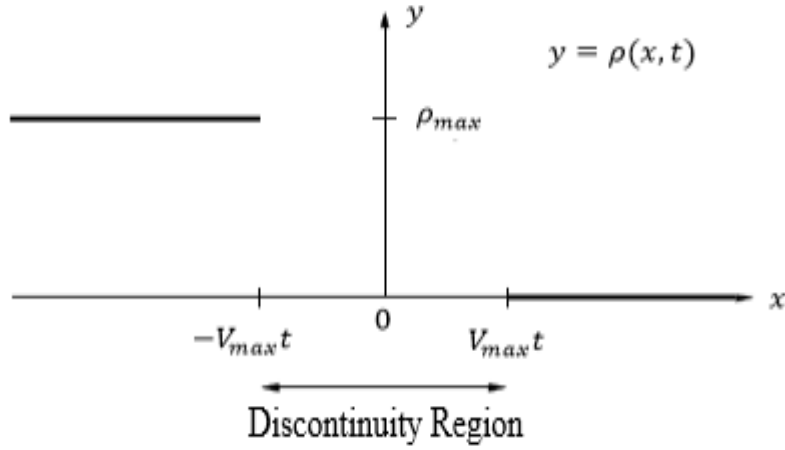
2. من أجل $x < 0$ ، تُمثّل مُنحنيات المُميّزات خطوطاً مستقيمةً مع ميل $c(\rho_{max}) = -V_{max}$ (تتحرك للخلف)، حيث تبقى قيمة الكثافة أعظمية على كل خط من هذه الخطوط ρ_{max} .

اعتماداً على المُنحنيات السابقة، نقوم باستنتاج سلوك تابع الكثافة $\rho(x, t)$ عند الموقع x والزمن t كما يلي:

$$\rho(x, t) = \begin{cases} \rho_{max} & , \quad x < -V_{max}t \\ 0 & , \quad x > V_{max}t \end{cases} \quad (13)$$

بعبارة أخرى، تتحرك منطقة الكثافة الأعظمية ρ_{max} إلى الخلف بسرعة $-V_{max}$ ، بينما تتحرك منطقة الكثافة الصفيرية إلى الأمام بسرعة V_{max} .

نُلاحظ ظهور ما يُسمّى بالانقطاع (عدم الاستمرارية) في التوزيع الأولي لتابع الكثافة عند $x = 0$ ، أي لدينا تغيّر مُفاجئ في قيمة الكثافة من ρ_{max} إلى 0 كلّما تحركنا عبر النقطة $x = 0$ ، أدى هذا التغيّر إلى ظهور منطقة تُشبه المروحة بين منطقتي الكثافة الموجبة والصفيرية كما هو مُبيّن في الشكل (8).

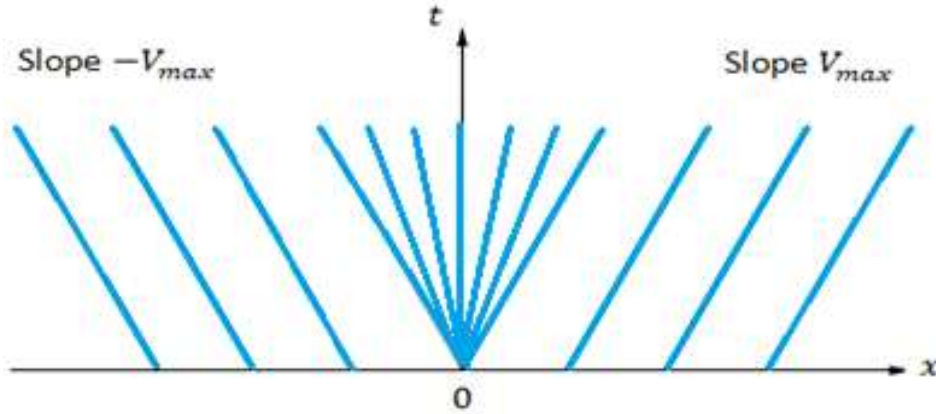


الشكل (8): توضيح منطقة الانقطاع أو عدم الاستمرارية في تابع الكثافة $\rho(x, t)$

نسعى الآن لإيجاد سلوك تابع الكثافة $\rho(x, t)$ في المنطقة الشبيهة بالمروحة $-V_{max}t < x < V_{max}t$ باستخدام منحنيات المُميّزات الشبيهة بالمروحة (Fan-like characteristics) المنبثقة من النقطة $x_0 = 0$ (نقطة الانقطاع أو عدم الاستمرارية) كما يلي:

$$x(t) = x_0 + c(\rho)t = c(\rho)t \quad (14)$$

يُقابل ميل كل منحنى مُميّز $c(\rho)$ قيمة كثافة ρ متروحة بين ρ_{max} و 0 كلما تحركنا في اتجاه عقارب الساعة، بدءاً من المنحنى المُميّز عند الحافة اليسرى للمروحة إلى المنحنى المُميّز عند الحافة اليمنى للمروحة كما هو مُبين في الشكل (9).



الشكل (9): استخدام منحنيات المُميّزات الشبيهة بالمروحة في المنطقة الشبيهة بالمروحة الناتجة عن الانقطاع (عدم الاستمرارية) في تابع الكثافة $\rho(x, t)$

نفهم مما سبق: إذا كانت قيمة تابع الكثافة $\rho(x, t)$ مُتناقصة باستمرار كلما انتقلنا باتجاه المحور الموجب لـ x ، نلاحظ بالمقابل زيادة مُستمرة في ميول منحنيات المُميّزات، من ناحية أُخرى إذا كانت قيمة تابع الكثافة مُتزايدة باستمرار كلما انتقلنا باتجاه المحور السالب لـ x ، نلاحظ انخفاض مُستمر في ميول منحنيات المُميّزات.

نقوم الآن بتوضيح التوليد الخطي لتابع الكثافة $\rho(x, t)$ في منطقة الانقطاع (عدم الاستمرارية) عن طريق توظيف معادلة منحنيات المميزات لنموذج LWR (الصيغة $c(\rho)$) (4) لإيجاد منحنيات المميزات الشبيهة بالمروحة (14) كما يلي:

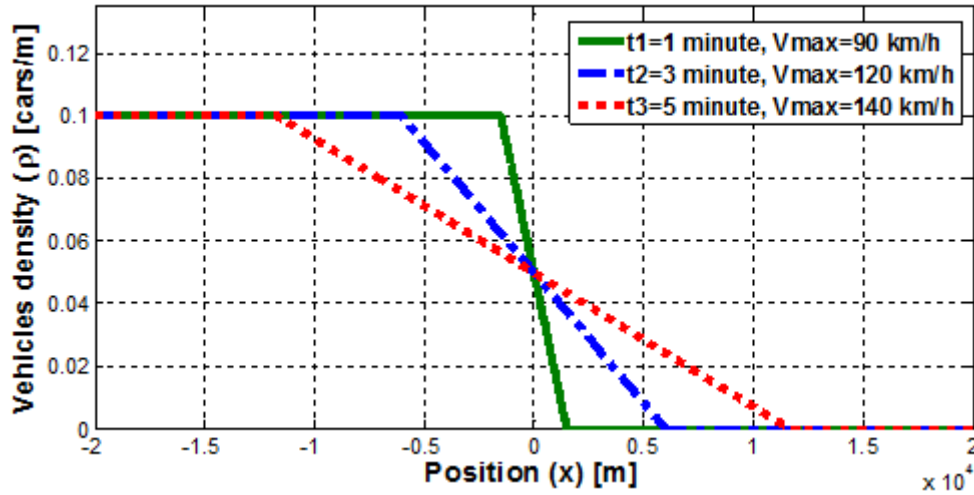
$$x = c(\rho)t = V_{max} \left(1 - \frac{2\rho}{\rho_{max}}\right)t, \quad 0 < \rho < \rho_{max} \quad (15)$$

نعتبر قيمة ثابتة للزمن $t > 0$ ، ونعيد ترتيب المعادلة الأخيرة بهدف التعبير عن ρ كتابع لـ x و t .

$$\rho(x, t) = \frac{1}{2}\rho_{max} - \frac{\rho_{max}}{2V_{max}t}x, \quad -V_{max}t < x < V_{max}t \quad (16)$$

تنتج هذه الصيغة توليداً خطياً لتابع الكثافة بين القيمتين $\rho = \rho_{max}$ عند $x = -V_{max} \cdot t$ و $\rho = 0$ عند $x = V_{max} \cdot t$.

يوضح الشكل (10) رسماً بيانياً للتابع $\rho(x, t)$ على المقطع المدروس بطول $40km$ من الطريق السريع، عند ثلاثة لقطات زمنية مختلفة $t = [1, 3, 5]minute$ ، بفرض متوسط قيم السرعات الأعظمية للسيارات عند كل زمن من الأزمنة السابقة هي على الترتيب $V_{max} = [90, 120, 140]km/hour$ بحيث تتوافق مع قيم السرعة على الطرق السريعة [16] والكثافة الأعظمية المسموح بها على الطريق $\rho_{max} = 0.1cars/m$.



الشكل (10): تابع توزع كثافة حركة المرور $\rho(x, t)$ على المقطع المدروس بطول $40km$ من الطريق السريع عند الأزمنة التالية $t = [1, 3, 5]minute$ ، الكثافة الأعظمية المسموح بها للسيارات على الطريق $\rho_{max} = 0.1cars/m$

- نلاحظ مع ازدياد الزمن t ، تزداد المسافة بين منطقة الكثافة الأعظمية عند $x = -V_{max} \cdot t$ ومنطقة الكثافة الصفرية (المعدومة) عند $x = V_{max} \cdot t$ ، ويصبح التوليد الخطي أكثر تسطحاً. تعود حقيقة التوليد الخطي إلى كون التابع $c(\rho)$ خطي مع ρ .
- نلاحظ كيفية انزياح مناطق الكثافة العالية في اتجاه محور x السالب، في حين تتزاح تلك الأقل كثافةً في اتجاه محور x الموجب، نلاحظ أيضاً أنّ نقاط الرسم البياني والتي عندها $\rho = \frac{\rho_{max}}{2} = 0.05$ تبقى ثابتة، حيث $c\left(\frac{\rho_{max}}{2}\right) = 0$.

- عند هذه النقطة، نفهم بوضوح أنّ مُنحنيات المُميزات تكشف اتجاه حركة النقاط على الرسم البياني لتوزع تابع الكثافة $\rho(x, t)$ وليست اتجاه السيارات.

- التقدير الزمني للتداخل:

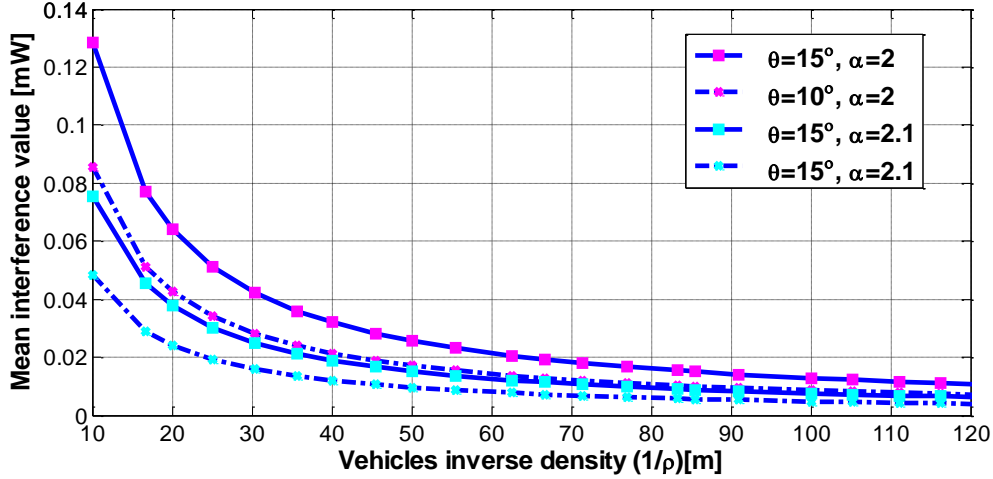
نقوم الآن بدراسة سلوك التداخل عند فترات زمنية مُختلفة من الطريق المدروس تكون خلالها حركة السير غير ثابتة (السيارات مُتحركة) بهدف الفهم الأولي للبارامترات الرئيسية المؤثرة على التداخل. نعتد على العلاقة (13) من الدراسة [2] التي توضّح علاقة القيمة المتوسطة للتداخل عند حركة سير ثابتة ρ ، ثم نُعيد كتابة هذه المعادلة مع افتراض $\rho = \rho(x, t)$ على النحو التالي:

$$\overline{I_{PPP}(x, t)}|_{L_n \rightarrow 0} = \frac{\xi \rho(x, t) \gamma_1 P_0}{(\alpha - 1) \delta_0^{\alpha - 1}} \quad (17)$$

حيث $\overline{I_{PPP}(x, t)}$: القيمة المتوسطة للتداخل عند الموقع x والزمن t .

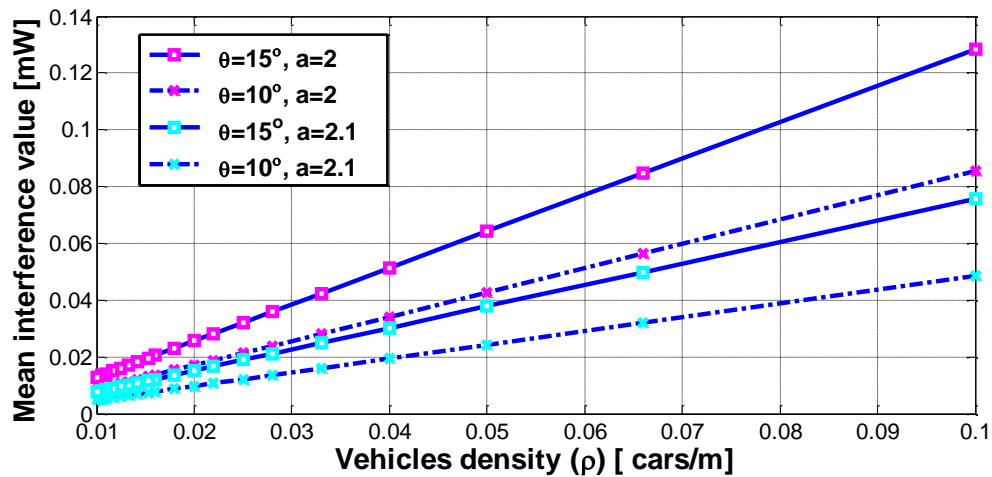
$\rho(x, t)$: كثافة حركة المرور عند الموقع x والزمن t .

نرسم في الشكل (11) التداخل الناشئ عن محاكاة عملية نقطة بواسون PPP بكثافة $\rho = \rho(x, t)$ وفقاً للعلاقة السابقة (17)، نفترض لذلك قيمتين لعرض حزمة إشعاع الهوائي $\theta = 15^\circ$ و $\theta = 10^\circ$ [17] عندها تكون المسافة الصغرى للتداخل $\delta_0 = 76m$ و $\delta_0 = 114m$ على التوالي وفقاً للعلاقة (8). ثابت تخادم المسار $\alpha = [2.2.1]$ ، احتمالية التصادم الطيفي $\xi = 0.1$ ، استطاعة الإرسال للرادار $P_0 = 10 \text{ dBm}$ [18]، البارامتر العددي $\gamma_1 = G_t^2 \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2$ ، الريح الأعظمي للهوائي $G_t = 45 \text{ dBi}$ ، سرعة الضوء $c = 3 * 10^8 \text{ m/s}$ ، التردد المركزي $f = 76.5 \text{ GHz}$ [18]، $L_n = 0$: تباعد المسار، $\delta = \frac{1}{\rho}$: مسافة التباعد بين السيارات.



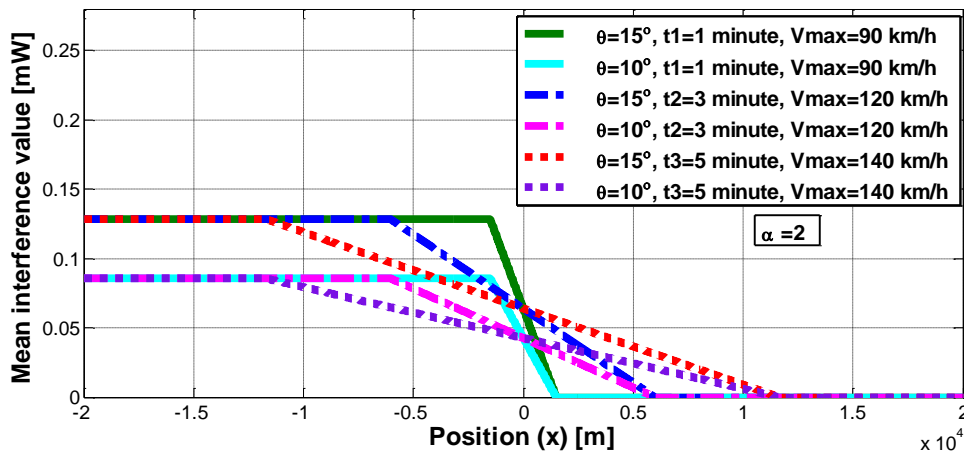
الشكل (11): متوسط التداخل لنموذج عملية PPP (17) من أجل $L_n = 0$ ، $(\theta = 15^\circ, \delta_0 = 76 \text{ m})$ ، $(\theta = 10^\circ, \delta_0 = 114 \text{ m})$ ، $\alpha = [2.2.1]$

كما ونرسم في الشكل (12) العلاقة بين متوسط التداخل وكثافة السيارات بافتراض قيمتين لعرض حزمة إشعاع الهوائي $\theta = 15^\circ$ و $\theta = 10^\circ$ على التوالي.

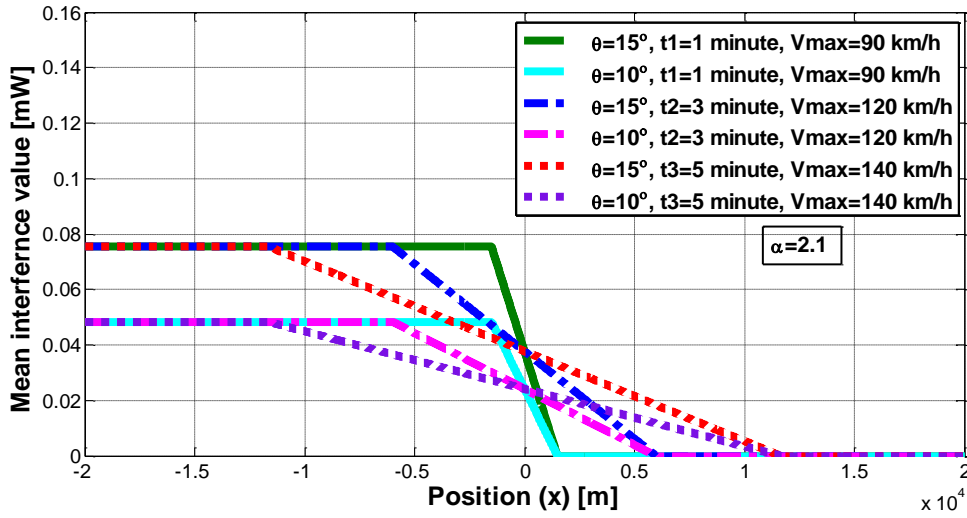


الشكل (12): متوسط التداخل لنموذج عملية PPP كتابع لكثافة السيارات ρ من أجل $(\theta = 15^\circ, \delta_0 = 76m)$, $L_n = 0$ ، $\alpha = [2 \ 2.1]$ ، $(\theta = 10^\circ, \delta_0 = 114m)$

نرسم في الأشكال التالية (13) و(14) متوسط التداخل على المقطع المدروس بطول $40km$ من الطريق السريع عند ثلاثة لقطات زمنية $t = [1,3,5]minute$ وفق العلاقة (17)، بفرض متوسط قيم السرعات الأعظمية للسيارات عند كل زمن من الأزمنة السابقة هي على الترتيب $V_{max} = [90,120,140]km/hour$ واعتبار قيم مُعامل التخامد $\alpha = [2 \ 2.1]$ والقيم التالية لعرض حزمة إشعاع الهوائي $\theta = 10^\circ$ و $\theta = 15^\circ$.



الشكل (13): متوسط التداخل على المقطع المدروس بطول $40km$ من الطريق السريع عند الأزمنة التالية $t = [1, 3, 5]minute$ والبارامترات العددية $(\theta = 15^\circ, \delta_0 = 76m)$ ، $(\theta = 10^\circ, \delta_0 = 114m)$ ، $\alpha = 2$



الشكل (14): متوسط التداخل على المقطع المدروس بطول 40km من الطريق السريع عند الأزمنة التالية

$$\alpha = 2.1, (\theta = 10^\circ, \delta_0 = 114\text{m}), (\theta = 15^\circ, \delta_0 = 76\text{m}) \text{ والبارامترات العددية } t = [1, 3, 5]\text{minute}$$

نستنتج من الشكل (11) أن التداخل متناسب بشكل عكسي مع مسافة التباعد بين السيارات $\delta = \frac{1}{\rho}$ ، حيث تزداد مسافة التباعد هذه عند انخفاض كثافة حركة المرور على الطريق مما يؤدي إلى انخفاض التداخل والعكس صحيح. بناءً على الأشكال السابقة (10)، (12)، (13)، و(14)، نلاحظ أن التداخل متناسب بشكل خطي مع الكثافة الفعالة للسيارات المُسببة للتداخل $\rho \xi(t)$. نلاحظ أيضاً التأثير القوي للمسافة الصغرى للتداخل δ_0 ، نأخذ على سبيل المثال الحالة الافتراضية ($\alpha \approx 2$)، حينئذ يكون التداخل متناسباً بشكل عكسي مع δ_0 . بالتالي، من الواضح أن عرض حزمة الإشعاع الأضيق (الأصغر) للهوائي سوف يؤدي إلى زيادة δ_0 وتقليل التداخل، وهذا يتطابق مع الصيغة الرياضية في المعادلة (17).

الاستنتاجات والتوصيات:

- تناولت هذه الدراسة مسألة نمذجة وتحليل التداخل المتبادل بين رادارات السيارات على طريق سريع يتضمن حركة سير غير ثابتة باستخدام برنامج MATLAB، يُمكن تلخيص ما توصلنا إليه بالنقاط التالية:
- بيّنت النتائج في الشكل (6) أن علاقة السرعة بالكثافة علاقة عكسية، تحصل الكثافة العظمى عندما تكون الحركة المرورية متوقفة تماماً $V_{max} = 0$ ، وهي أقصى حالات الازدحام المروري $\rho = \rho_{max}$.
- أثبتت النتائج في الأشكال (7)، (8)، (9) و(10) فعالية مُنحنيات المُميزات الخاصة بنموذج الموجة الحركية LWR كأداة بسيطة مُساعدة في معرفة سلوك حركة المرور والتنبؤ بالكثافة المرورية لحل مشكلة التغيرات المُفاجئة (الانقطاع أو عدم الاستمرارية) في تابع توزع الكثافة ولا سيما في حالات سيناريوهات حقيقية على الطريق المدروس.
- نستنتج من الشكل (11) انخفاض التداخل مع ازدياد مسافة التباعد بين السيارات ($\delta = 1/\rho$) الناتج عن انخفاض كثافة حركة المرور على الطريق، أو بمعنى آخر العلاقة خطية بين تابع توزع الكثافة والقيمة المتوسطة للتداخل.

- بيّنت النتائج في الأشكال (13) و(14) السلوك الزمني للتداخل بين رادارات السيّارات عند حركة سير غير ثابتة على الطريق السريع، الأمر الذي يُساعد في اقتراح طرق تعمل على تخفيض هذا التداخل وبالتالي تحسين أداء رادارات السيّارات.
 - نستنتج من الأشكال (11)، (12)، (13)، (14) انخفاض التداخل من أجل قيم عرض حزمة إشعاع صغيرة للهوائي $\theta = 10^\circ$ مقارنةً مع الحالة $\theta = 15^\circ$ ، ينخفض التداخل أيضاً مع ازدياد قيمة مُعامل التخماد α .
 - تُعتبر دراستنا هي الأولى من حيث نمذجة التداخل المُتبادل بين رادارات السيّارات باستخدام الهندسة العشوائية (نموذج عملية نقطة بواسون) عند السيناريوهات الحقيقية الحرجة على الطريق، بالإضافة إلى أنه لم يتم التطرّق مُسبقاً إلى كل من نموذج الموجة الحركية (نموذج LWR) وطريقة المُميّزات في دراسات التداخل المُتبادل بين رادارات السيّارات على طريق حقيقي.
- سيُضمّن العمل في المستقبل المزيد من الدراسات حول التقدير الزمني للتداخل (التنبؤ بالتداخل)، بما في ذلك علاقة التداخل عند حالات زمنية مُختلفة. بالإضافة إلى التحقّق من النموذج الهندسي باستخدام بيانات تجريبية من حركة المرور.

References:

- [1] WENGER, J. *Automotive radar-status and perspectives*. In: IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, 2005. CSIC'05. IEEE, 2005. p. 4 pp.
- [2] AL-HOURANI, A. EVANS, R, G. KANDEEPAN, S. MORAN, B. ELTOM, H. *Stochastic Geometry Methods for Modeling Automotive Radar Interference*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 19, No. 2, 2017, 333-344.
- [3] KUNERT, M. *The EU project MOSARIM: A general overview of project objectives and conducted work*. In: 2012 9th European Radar Conference. IEEE, 2012. p. 1-5.
- [4] AXELSSON, Sune R.J. *Analysis of random step frequency radar and comparison with experiments*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 45, No. 4, 2007, 890-904.
- [5] BROOKER, G.M. *Mutual Interference of Millimeter-Wave Radar Systems*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 49, No. 1, 2007, 170-181.
- [6] HOSSAIN, M. A. ELSHAFIEY, I. & AL-SANIE, A. *FMCW Chirp Diversity for Mutual Interference Mitigation in Short-range Automotive Radars under Realistic Traffic Model*. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, Vol. 34, No. 1, 2019.
- [7] *Characteristics of Ultra-Wideband Technology*, document ITU-R SM.1755, International Telecommunications Union (ITU), 2006. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1755/en>.
- [8] GOPPELT, H. BLOCHER, L. MENZEL, W. *Automotive radar- Investigation of Mutual Interference Mechanisms*. Advances in Radio Science, Vol 8, 2010, 55-60.
- [9] BADDELEY, A. IMRE, B, and ROLF, S. "Spatial point processes and their applications." Stochastic Geometry: Lectures Given at the CIME Summer School Held in Martina Franca, Italy, September 13–18, 2004 (2007), 1-75.
- [10] LI, K. LOANNOU, P. *Modeling of Traffic Flow of Automated Vehicles*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 5, No. 2, 2004, 99-113
- [11] KACHROO, P. AI-NASUR, S. J. WADDOO, S. A. SHENDE, A. . *Pedestrian dynamics: Feedback control of crowd evacuation*. Springer Science & Business Media, 2008.

- [12] MATHEW, Tom V. Transportation systems engineering. *Traffic Flow Modeling Analogies*, IIT Bombay, 2014.
- [13] GREENSHIELDS, B. D. *A study in highway capacity*. Highway Research Board Proc, 1935, 1935, 448-477.
- [14] CHOWDHURY, D. SANTEN, L. SCHADSCHNEIDER, A. *Statistical physics of vehicular traffic and some related systems*. Physics Reports, Vol. 329, No. (4-6), 2000, 199-329.
- [15] HAENGGI, M. *Mean interference in hard-core wireless networks*. IEEE Communications Letters, Vol. 15, No. 8, 2011, 792-794.
- [16] <https://www.rhinocarhire.com/Drive-Smart-Blog/Speed-Limits-by-untry.aspx#/searchcars>.
- [17] Australian Communications and Media Authority, " *A review of automotive radar systems- Devices and regulatory frameworks*," Austral. Commun. Media Authority, Tech. Rep. SP 4/01,2001.
- [18] *Systems Characteristics of Automotive Radars Operating in The Frequency Band 76–81 GHz for Intelligent Transport Systems Applications*, document ITU-R M.2057-0, International Telecommunications Union (ITU), 2014. [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/R-RECM.2057-0-201402-I>.