



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลกระทบของลักษณะการกระจายของระยะห่างระหว่างรถต่อการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในเครือข่ายเฉพาะกิจเคลื่อนที่ของยานพาหนะ

Effects of Inter-vehicle Spacing Distributions on Connectivity of

VANETs



ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

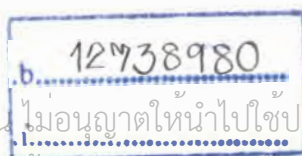
คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH

รศ 443 ฅ

2556



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ควรคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Research Title: Effects of Inter-vehicle Spacing Distributions on Connectivity of VANETs

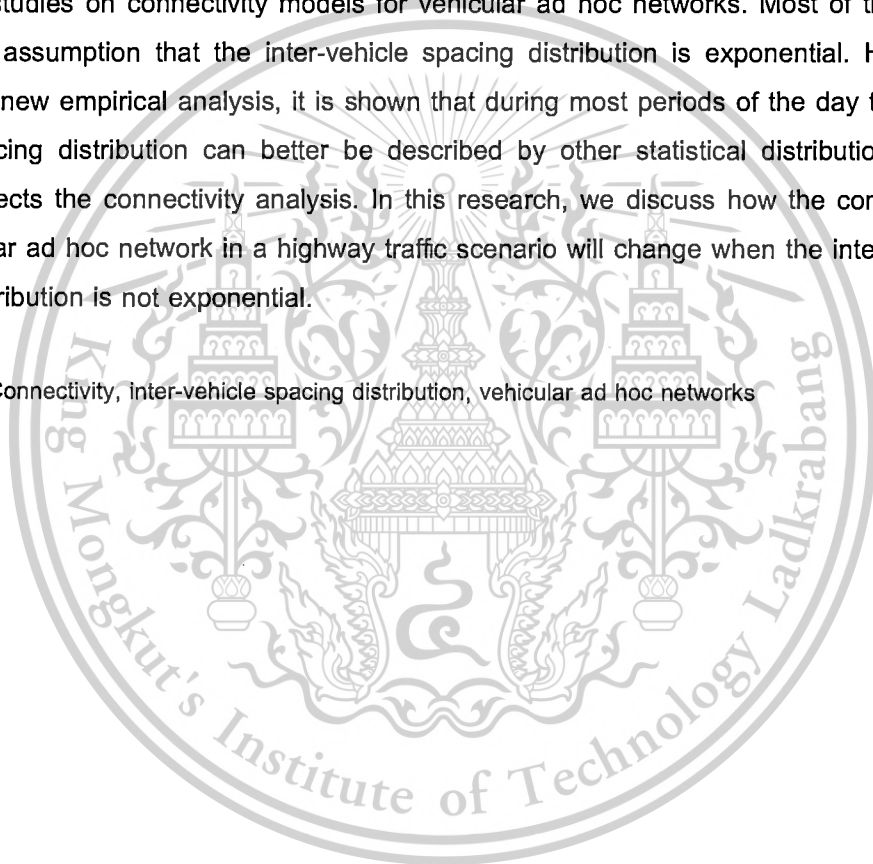
Researcher: Sooksan Panichpapiboon

Faculty: Faculty of Information Technology

ABSTRACT

Connectivity is an important property for information dissemination in a vehicular ad hoc network. Basically, connectivity ensures that a message from a source can be spread to reach all the vehicles in the network. Over the past few years, there have been a significant number of studies on connectivity models for vehicular ad hoc networks. Most of them rely on the key assumption that the inter-vehicle spacing distribution is exponential. However, based on a new empirical analysis, it is shown that during most periods of the day the inter-vehicle spacing distribution can better be described by other statistical distributions. This certainly affects the connectivity analysis. In this research, we discuss how the connectivity of a vehicular ad hoc network in a highway traffic scenario will change when the inter-vehicle spacing distribution is not exponential.

Keywords : Connectivity, inter-vehicle spacing distribution, vehicular ad hoc networks



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

II

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีจาก Dr. Lin Cheng แห่งมหาวิทยาลัย Trinity College รัฐคอนเนกติกัต ประเทศสหรัฐอเมริกา ผู้วิจัยขอขอบคุณ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินรายได้คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

สุขสันต์ พาณิชพาพิบูล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

III

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในเครือข่ายเฉพาะกิจเคลื่อนที่	3
2.2 การเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในเครือข่ายเฉพาะกิจเคลื่อนที่ของยานพาหนะ	3
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัยและผลการศึกษา	5
3.1 การระบุลักษณะทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะ	5
3.2 การเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันภายใต้การกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่ต่างกัน	9
3.3 การเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันภายใต้สภาพการจราจรจริง	13
บทที่ 4 บทสรุป	17
เอกสารอ้างอิง	19
ภาคผนวก	21
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่จากโครงการวิจัย	22
ประวัตินักวิจัย	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ผลการทดสอบ K-S Test.....	8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

v

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 สถานการณ์ที่นำมาพิจารณาโดยที่ยานพาหนะมีการกระจายแบบสุ่มบนช่วงของถนน	11
3.2 ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันซึ่งเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นของยานพาหนะ ค่ารัศมีการส่งสามค่าที่นำมาพิจารณาคือ 100 เมตร 250 เมตร และ 1000 เมตร ความยาวของช่วงถนนคือ 10 กิโลเมตร ผลที่นำมาแสดงอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่า การกระจายของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นไปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	11
3.3 ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันซึ่งเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นของยานพาหนะ ค่ารัศมีการส่งสองค่าที่นำมาพิจารณาคือ 250 เมตร และ 500 เมตร ความยาวของช่วงถนนคือ 10 กิโลเมตร ผลการวิเคราะห์ภายใต้สมมติฐานที่ว่า การกระจายของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นไปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและผลการวิเคราะห์ภายใต้สมมติฐานที่ว่า การกระจายของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นไปแบบจีสี่วีได้ถูกนำมาแสดงเปรียบเทียบ	12
3.4 ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในแต่ละชั่วโมงของวัน ค่ารัศมีการส่งที่นำมาพิจารณาคือ (a) 250 เมตร (b) 500 เมตร (c) 750 เมตร และ (d) 1000 เมตร	14
3.5 ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในแต่ละชั่วโมงของวัน ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันคำนวณภายใต้สมมติฐานว่าการจราจรในสองทิศทางสมมาตรกัน	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทางด้าน การคำนวณและการสื่อสารไร้สายได้ช่วยปูทางสำหรับระบบข้อมูลจราจรรูปแบบใหม่ ตรงกันข้ามกับระบบข้อมูลจราจรที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันซึ่งข้อมูลจราจรจะถูกเก็บโดยอาศัยตัวรับรู้แบบอยู่กับที่ (fixed sensor) ระบบข้อมูลจราจรในอนาคตจะสามารถใช้ยานพาหนะเป็นตัวรับรู้ข้อมูลแบบเคลื่อนที่ (mobile sensor) เพื่อเก็บข้อมูลจราจรได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ยานพาหนะเป็นตัวกระจายข้อมูลจราจรแบบเรียลไทม์ (real-time) ได้อีกด้วย ยานพาหนะที่เสริมอุปกรณ์ซึ่งมีความสามารถในการรับรู้และการสื่อสารเหล่านี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการช่วยเพิ่มความปลอดภัยและความสะดวกสบายในการขับขี่

ระบบข้อมูลจราจรแบบไม่พึ่งพาโครงสร้างพื้นฐาน (infrastructureless traffic information system) ในรูปแบบของเครือข่ายเฉพาะกิจเคลื่อนที่ของยานพาหนะ (vehicular ad hoc network, VANET) ได้เป็นที่สนใจอย่างมากของนักวิจัยทางด้านระบบการขนส่งอัจฉริยะ (intelligent transportation system) ในเครือข่ายเฉพาะกิจเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ยานพาหนะสามารถที่จะสร้างเครือข่ายระหว่างกันด้วยตนเอง (self-organize) เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูล ข้อมูลจากพาหนะต้นทางสามารถที่จะถูกส่งและกระจายไปยังพาหนะคันอื่นๆ ที่อยู่ห่างไกลออกไปได้ ความสามารถนี้เป็นประโยชน์สำคัญในการกระจายข้อมูลจราจรต่างๆ เช่น ข้อมูลอุบัติเหตุ ข้อมูลสภาพการจราจร โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาโครงสร้างพื้นฐานซึ่งมีราคาแพงในการเก็บและกระจายข้อมูล

การกระจายข้อมูลจราจรในเครือข่ายเฉพาะกิจเคลื่อนที่ของยานพาหนะนั้นจำเป็นต้องอาศัยความเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันของเครือข่าย (network connectivity) กล่าวคือความเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันจะทำให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลจากยานพาหนะคันหนึ่งจะสามารถถูกส่งไปยังพาหนะทุกคันในเครือข่ายได้ อย่างไรก็ตามในการที่จะได้มาซึ่งความเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในเครือข่าย ยานพาหนะบนถนนจะต้องมีความหนาแน่นอย่างเพียงพอ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ถ้าหากยานพาหนะบนถนนมีความหนาแน่นน้อย ระยะห่างระหว่างยานพาหนะสองคันบนถนนอาจจะมากเกินกว่าระยะรัศมีการส่งคลื่นวิทยุสำหรับการสื่อสารได้ สิ่งนี้จะทำให้เกิดการขาดช่วง (disconnectedness) ในเครือข่าย เป็นหน้าที่ของผู้ออกแบบระบบที่จะต้องหาจำนวนยานพาหนะที่น้อยที่สุดที่จำเป็นต้องมีบนถนนและรัศมีการส่งที่เหมาะสมของยานพาหนะแต่ละคันเพื่อที่จะสามารถสร้างเครือข่ายที่เชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันได้ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาความเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันเพื่อที่จะสามารถกำหนดค่าตัวแปรที่สำคัญเหล่านี้ได้

แม้ว่าจะมีการศึกษาจำนวนมากเกี่ยวกับการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในเครือข่ายเฉพาะกิจเคลื่อนที่ของยานพาหนะ การศึกษาส่วนใหญ่จะตั้งอยู่บนสมมติฐานพื้นฐานที่ว่าระยะห่างระหว่างยานพาหนะมีการกระจายทางสถิติแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (exponential) แม้ว่าการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลสามารถจำลองการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะได้ดีในกรณีที่มีการจราจรเบาบางมาก หรือในกรณีที่ยานพาหนะสามารถไหลได้อย่างอิสระ ข้อมูลทางสถิติจากการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถแก้ไขหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหม่ได้บ่งชี้ว่า ในกรณีที่มีการจราจรมีความคับคั่งระหว่างระหว่างยานพาหนะจะสามารถถูกบรรยายด้วยการกระจายทางสถิติแบบอื่นที่มีความเหมาะสมมากกว่า ยิ่งไปกว่านั้นในรายงานการวิจัยฉบับนี้จะชี้ให้เห็นว่าการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเป็นตัวเลือกที่ไม่เหมาะสมเลยสำหรับการจำลองการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างรถบนถนนในหลายๆ ช่วงเวลาของวัน สิ่งนี้สร้างความน่ากังวลที่สำคัญ กล่าวคือ ถ้าหากการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างรถบนถนนไม่เป็นไปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลตามที่หลายคนใช้เป็นสมมติฐาน สิ่งนี้จะส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์การเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในเครือข่ายเฉพาะกิจเคลื่อนที่ของยานพาหนะอย่างไร ระดับความหนาแน่นของยานพาหนะที่จำเป็นต้องมีในเครือข่ายและรัศมีการส่งจะเปลี่ยนไปเล็กน้อยเพียงใดหากการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะไม่ได้เป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล เหล่านี้คือคำถามสำคัญที่จะค้นหาคำตอบในงานวิจัยชิ้นนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างรถบนถนนในสถานการณ์ที่มีการจราจรคับคั่งและสภาพการจราจรไม่เป็นแบบการไหลอย่างอิสระ
2. เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นของการกระจายทางสถิติที่เปลี่ยนไปต่อการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในเครือข่ายเฉพาะกิจเคลื่อนที่ของยานพาหนะ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. การจำแนกลักษณะการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างรถบนถนนนั้นจะอาศัยข้อมูลทางสถิติจากข้อมูลที่เก็บตัวอย่างจากยานพาหนะจริงบนถนน แล้วนำมาวิเคราะห์หารูปแบบการกระจายทางคณิตศาสตร์ที่สามารถจำลองการกระจายทางสถิติที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงที่สุด
2. การวิเคราะห์หาระดับการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในเครือข่ายเป็นการวิเคราะห์โดยอาศัยกรอบการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเท่านั้น ในงานวิจัยนี้จะไม่ครอบคลุมการทดลองบนเครือข่ายจริงของยานพาหนะ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้องค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับลักษณะการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างรถในสภาพการจราจรคับคั่ง และผลกระทบอันจะเกิดขึ้นกับการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในเครือข่ายเฉพาะกิจเคลื่อนที่ของยานพาหนะ
2. ได้ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ 1 ฉบับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล่านี้ก็คือ โหนดหรือยานพาหนะได้กระจายตัวอยู่บนเส้นตรง (บนส่วนของถนน) โดยการกระจายตัวนั้นเป็นไปตามการกระจายแบบปัวซอง จะสังเกตได้อีกอย่างหนึ่งว่าการกระจายตัวแบบปัวซองยังหมายความว่าระยะห่างระหว่างยานพาหนะแต่ละคันมีการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

การเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในเครือข่ายเฉพาะกิจเคลื่อนที่ของยานพาหนะนั้นจะขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของยานพาหนะบนถนน หนึ่งในสมมติฐานสำคัญที่นิยมใช้กันก็คือการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล แม้ว่าการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจะใช้ได้ดีในการอธิบายการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะในกรณีที่มีการจราจรเบาบางมาก [10] ในงานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นว่าในสภาพการจราจรหนาแน่นสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะจะสามารถถูกบรรยายได้ดีกว่าด้วยการกระจายทางสถิติชนิดอื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัยและผลการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวเกี่ยวกับวิธีดำเนินการวิจัยและผลการศึกษาที่ได้

3.1 การระบุลักษณะทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะ

ในบรรดาปัจจัยทั้งหลาย การเชื่อมต่องานทั่วถึงกันในเครือข่ายเฉพาะกิจเคลื่อนที่ของยานพาหนะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักที่สำคัญที่สุด 2 ประการ คือ ระยะห่างระหว่างยานพาหนะ และรัศมีการส่ง เพื่อให้ได้มาซึ่งการเชื่อมต่องานทั่วถึงกันในเครือข่าย รัศมีการส่งจะต้องถูกกำหนดอย่างเหมาะสมตามลักษณะการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะ โดยปกติแล้วเครือข่ายเฉพาะกิจเคลื่อนที่ของยานพาหนะจะเกิดการเชื่อมต่องานทั่วถึงกันถ้าหากมีอนุกรมของลิงค์เชื่อมต่อโหนดต้นทางจากปลายด้านหนึ่งของเครือข่ายไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง เพื่อให้แน่ใจว่าเงื่อนไขนี้จะบรรลุระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่อยู่ติดกันคู่ใดๆ จะต้องน้อยกว่าระยะรัศมีการส่ง อย่างไรก็ตาม ระยะห่างระหว่างยานพาหนะบนถนนแต่ละคู่เป็นปริมาณที่ไม่แน่นอน ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะสามารถรับรองการเชื่อมต่องานทั่วถึงกันแบบแน่นอน 100% ดังนั้นการจำลองทางสถิติจึงเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ประเมินหาความน่าจะเป็นที่เครือข่ายจะเกิดการเชื่อมต่องานทั่วถึงกันขึ้นเมื่อกำหนดรัศมีการส่งและประเภทของการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะบนถนน ในรายงานเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์การเชื่อมต่องานทั่วถึงกันส่วนใหญ่ นั้น จะใช้สมมติฐานที่ว่า การกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล อย่างไรก็ตามเราจำเป็นต้องศึกษาว่า การกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะนั้นเป็นไปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลอย่างแท้จริง ถ้าหากการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลไม่สามารถอธิบายการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่เกิดขึ้นจริงแล้ว การเชื่อมต่องานทั่วถึงกันในเครือข่ายอาจจะผิดเพี้ยนไป

เพื่อให้สามารถจำลองการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะบนถนนได้อย่างถูกต้องนั้น เราใช้ข้อมูลจริงที่เก็บได้บนถนนมาวิเคราะห์ ข้อมูลจริงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก Berkeley Highway Laboratory [11] ข้อมูลเหล่านี้ถูกเก็บรวบรวมในเดือนมิถุนายน ค.ศ. 2006 จากวงแหวนเหนี่ยวนำแบบคู่ (dual-loop detector) ที่ติดตั้งบนทางหลวง I-80 ในรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา วงแหวนเหนี่ยวนำแต่ละตัวมีความสามารถในการตรวจจับการมีอยู่ของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ข้ามผ่านมัน และมีความสามารถในการประเมินหาความเร็วของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ข้ามผ่านมันอีกด้วย ดังนั้น สำหรับยานพาหนะทุกคันที่เคลื่อนที่ผ่านจุดสังเกต เราจะมีบันทึกของเวลาที่ยานพาหนะมาถึงและความเร็วของมัน บันทึกของเวลาในการมาถึงของยานพาหนะมีความแม่นยำถึงระดับ 1/60 วินาที ข้อมูลสองชิ้นนี้ทำให้เราสามารถที่จะคำนวณหาระยะห่างระหว่างยานพาหนะแต่ละคู่ที่วิ่งติดกันได้ กล่าวอย่างง่าย ๆ ระยะห่างระหว่างยานพาหนะแต่ละคู่สามารถหาได้จากผลคูณของระยะห่างระหว่างเวลาในการมาถึงของรถทั้งสองและความเร็ว ราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละเอียดวิธีการคำนวณหาระยะห่างระหว่างยานพาหนะจากเวลาในการมาถึงและความเร็วสามารถดูได้จาก [10]

ในงานวิจัยนี้เราได้เลือกใช้ข้อมูลการจราจร ณ วันที่ 26 มิถุนายน ค.ศ. 2006 เป็นตัวแทนของข้อมูลเนื่องจากวันดังกล่าวเป็นตัวแทนของการจราจรที่เกิดขึ้นในวันทำงานธรรมดาต่างๆ ไป โดยธรรมชาติแล้ว สถิติของการกระจายของระยะห่างระหว่างยานพาหนะจะแปรเปลี่ยนไปตามช่วงเวลาของวัน ยกตัวอย่างเช่น ระยะห่างระหว่างยานพาหนะในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนในตอนเช้า จะมีความแตกต่างจากระยะห่างระหว่างยานพาหนะในช่วงตอนดึก ดังนั้นเราจึงระบุลักษณะของการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นรายชั่วโมง ในการระบุลักษณะทางสถิตินี้ เราได้แยกข้อมูลระยะห่างระหว่างยานพาหนะออกเป็นรายชั่วโมง จากนั้นนำข้อมูลดิบที่ได้มาเรียงลำดับและจัดทำฟังก์ชันการกระจายสะสมเชิงประจักษ์ (empirical cumulative distribution function, ECDF) ซึ่งจะได้ฟังก์ชันการกระจายสะสมเชิงประจักษ์ทั้งสิ้น 24 ฟังก์ชันด้วยกัน

ในลำดับต่อไป เป็นหน้าที่ของเราที่จะต้องหาสมการฟังก์ชันการกระจายทางสถิติที่เหมาะสมมาเพื่ออธิบายฟังก์ชันการกระจายสะสมเชิงประจักษ์ในแต่ละชั่วโมง วิธีการทั่วไปที่นิยมใช้กันในหมู่นักวิจัยก็คือ การตั้งสมมติฐานว่าฟังก์ชันการกระจายสะสมเชิงประจักษ์นั้นสามารถอธิบายได้โดยสมการฟังก์ชันการกระจายทางสถิติที่นำมาเป็นสมมติฐาน (hypothesized distribution) และยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานนั้นผ่านกระบวนการทดสอบทางสถิติที่เรียกว่า Kolmogorov-Smirnov Test หรือ K-S Test [12] ซึ่งโดยปกติแล้วกระบวนการทดสอบ K-S Test นี้จะช่วยระบุได้ว่าการกระจายทางสถิติฟังก์ชันหนึ่งมีความคล้ายคลึงหรือใกล้เคียงกับการกระจายทางสถิติอีกฟังก์ชันหนึ่งหรือไม่ ในงานวิจัยนี้เราได้ใช้ K-S Test เพื่อประเมินว่าฟังก์ชันการกระจายทางสถิติที่นำมาเป็นสมมติฐานนั้นมีความใกล้เคียงกับฟังก์ชันการกระจายสะสมเชิงประจักษ์หรือไม่ ในการทดสอบ K-S Test นั้น ความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันการกระจายทางสถิติ 2 ฟังก์ชันจะถูกวัดโดยตัวชี้วัดที่เรียกว่า D-Statistic ซึ่งนิยามได้ดังนี้

$$D = \max_x ||H(x) - F(x)||$$

โดยที่ $H(x)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายทางสถิติที่นำมาเป็นสมมติฐาน และ $F(x)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายสะสมเชิงประจักษ์ เมื่อได้ D-Statistic แล้วก็สามารถที่จะนำไปคำนวณค่าระดับวิกฤต (critical level) ซึ่งเป็นปริมาณที่บอกระดับความคล้ายกันระหว่างการกระจายทางสถิติทั้งสอง โดยทั่วไปแล้วค่าระดับวิกฤตจะบอกถึงความน่าจะเป็นที่ฟังก์ชันการกระจายทางสถิติที่นำมาเป็นสมมติฐานจะสามารถให้ค่าตัวอย่างที่มากเท่ากับตัวอย่างที่สุ่มได้จากฟังก์ชันการกระจายสะสมเชิงประจักษ์เมื่อสมมติฐานเป็นจริง สมมติฐานที่ว่า การกระจายสะสมเชิงประจักษ์ของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นไปตามฟังก์ชันการกระจายทางสถิติที่นำมาเป็นสมมติฐานนั้นจะถูกยอมรับหรือปฏิเสธบนพื้นฐานของค่าระดับวิกฤต ถ้าระดับค่าวิกฤตต่ำเกินไป เช่น น้อยกว่า 95% สมมติฐานก็จะถูกปฏิเสธ มิฉะนั้นมันก็จะถูกยอมรับ ในงานวิจัยนี้ สมมติฐานจะถูกปฏิเสธที่ค่าระดับวิกฤต 95%

การทดสอบ K-S Test ได้ถูกทำกับฟังก์ชันการกระจายสะสมเชิงประจักษ์ในแต่ละชั่วโมงของวัน โปรดสังเกตว่าการทดสอบ K-S Test ถูกทำบนฟังก์ชันการกระจายสะสม ซึ่งทำให้มีความ

เอกสารนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการที่ทดสอบเฉพาะค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถใช้รูปแบบการกระจายสะสม 2 แบบมาเป็นสมมติฐาน ได้แก่ การกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และการกระจายแบบจีอีวี (Generalized Extreme Value, GEV)

3.1.1 การกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

ฟังก์ชันการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเป็นไปตามสมการ

$$F_X(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\rho x} & , x \geq 0 \\ 0 & , \text{else} \end{cases}$$

ในแต่ละชั่วโมงของวัน เราได้หาฟังก์ชันการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลที่มีความใกล้เคียงกับฟังก์ชันการกระจายสะสมเชิงประจักษ์ในชั่วโมงนั้นๆ แล้วนำมาผ่านกระบวนการทดสอบ K-S Test ผลจากกระบวนการทดสอบ K-S Test สำหรับการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่มีค่า D-Statistic ที่น้อยที่สุดได้ถูกรูปและแสดงในคอลัมน์ที่สามของตารางที่ 3.1 ฟังก์ชันการกระจายที่มีค่า D-Statistic น้อยที่สุดถือว่าเป็นฟังก์ชันการกระจายที่ดีที่สุดในการเป็นตัวแทนของฟังก์ชันการกระจายสะสมเชิงประจักษ์ในชั่วโมงนั้นๆ

เราจะสามารถสังเกตได้ว่าการทดสอบไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลที่ระดับค่าวิกฤต 95% ในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 01.00 น. ถึงเวลา 05.00 น. ได้อย่างไรก็ตาม การทดสอบได้ปฏิเสธสมมติฐานการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในทุกช่วงเวลาอื่นของวัน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ผลการทดสอบบ่งชี้ว่าฟังก์ชันการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลสามารถนำมาใช้แทนฟังก์ชันการกระจายสะสมเชิงประจักษ์ได้ในช่วงเวลาตั้งแต่เวลา 01.00 น. ถึง 05.00 น. เท่านั้น แต่ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้กับช่วงเวลาอื่นๆ โปรดสังเกตว่าความหนาแน่นของยานพาหนะในช่วงเวลาเหล่านี้จะน้อยมาก (ความหนาแน่นของยานพาหนะในช่วงเวลาเหล่านี้มีค่าน้อยกว่า 0.005 คัน/เมตร) สิ่งนี้เองเป็นตัวบ่งชี้ว่าการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลมีความเหมาะสมสำหรับการจำลองการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะในสภาวะที่การจราจรเบาบางมากเท่านั้น

3.1.2 การกระจายแบบจีอีวี

ฟังก์ชันการกระจายแบบจีอีวีเป็นฟังก์ชันที่มีความยืดหยุ่น ซึ่งมีความสามารถในการรวมการกระจายหลายๆ รูปแบบ ฟังก์ชันการกระจายแบบจีอีวีเป็นไปตามสมการ

$$F_X(x) = \begin{cases} e^{-[1+\xi(x-\nu)/\eta]^{-1/\xi}} & , 1 + \xi(x - \nu)/\eta > 0 \\ 0 & , \text{else} \end{cases}$$

โดยที่ $\nu \in \mathbb{R}$ คือ โลเคชันพารามิเตอร์ (location parameter) $\eta > 0$ คือ สเกลพารามิเตอร์ (scale parameter) และ $\xi \in \mathbb{R}$ คือ เชพพารามิเตอร์ (shape parameter) เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบ K-S Test

Periods	Empirical avg. intervehicle spacing (m)	K-S test results for EXP	K-S test results for GEV	Selected distributions	Distribution parameters
0:00-1:00	121.5922	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.4873, \nu = 54.8339, \eta = 51.6532$
1:00-2:00	254.5556	Accept	Accept	EXP	$\rho = 0.0039$
2:00-3:00	264.1398	Accept	Accept	EXP	$\rho = 0.0038$
3:00-4:00	330.4168	Accept	Accept	GEV	$\xi = 0.6098, \nu = 133.8231, \eta = 140.4971$
4:00-5:00	223.8198	Accept	Accept	GEV	$\xi = 0.6059, \nu = 86.7318, \eta = 89.1143$
5:00-6:00	94.4145	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.5950, \nu = 39.2119, \eta = 37.9574$
6:00-7:00	45.2156	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.4048, \nu = 22.30876, \eta = 20.2837$
7:00-8:00	32.2028	Reject	Reject	—	—
8:00-9:00	24.5185	Reject	Reject	—	—
9:00-10:00	33.5256	Reject	Reject	—	—
10:00-11:00	40.5211	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.2608, \nu = 23.4071, \eta = 19.1804$
11:00-12:00	40.1199	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.2581, \nu = 23.0535, \eta = 19.2996$
12:00-13:00	40.9839	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.2603, \nu = 23.6375, \eta = 19.4597$
13:00-14:00	36.4779	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.2367, \nu = 21.2908, \eta = 17.7936$
14:00-15:00	27.8407	Reject	Reject	—	—
15:00-16:00	13.2158	Reject	Reject	—	—
16:00-17:00	12.7363	Reject	Reject	—	—
17:00-18:00	12.2840	Reject	Reject	—	—
18:00-19:00	14.1251	Reject	Reject	—	—
19:00-20:00	40.6600	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.2595, \nu = 23.3881, \eta = 19.3659$
20:00-21:00	49.2442	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.2965, \nu = 27.4853, \eta = 23.2307$
21:00-22:00	56.7665	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.3432, \nu = 28.9384, \eta = 25.4499$
22:00-23:00	62.2362	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.3437, \nu = 33.0085, \eta = 28.9144$
23:00-24:00	85.9951	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.4611, \nu = 39.8109, \eta = 36.2537$

เช่นเดียวกับกับกรณีของการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ในแต่ละชั่วโมงของวัน เราได้หาฟังก์ชันการกระจายแบบจีอีวีที่มีความใกล้เคียงกับฟังก์ชันการกระจายสะสมเชิงประจักษ์ในชั่วโมงนั้นๆ แล้วนำมาผ่านกระบวนการทดสอบ K-S Test ผลจากกระบวนการทดสอบ K-S Test สำหรับการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่มีค่า D-Statistic ที่น้อยที่สุดได้ถูกสรุปและแสดงในคอลัมน์ที่สี่ของตารางที่ 3.1 ฟังก์ชันการกระจายที่มีค่า D-Statistic น้อยที่สุดถือว่าเป็นฟังก์ชันการกระจายที่ดีที่สุดในการเป็นตัวแทนของฟังก์ชันการกระจายสะสมเชิงประจักษ์ในชั่วโมงนั้นๆ

เราสามารถสังเกตเห็นได้ว่าการทดสอบ K-S Test ได้ปฏิเสธสมมติฐานใน 8 ช่วงชั่วโมงด้วยเอกสารที่แนบ ซึ่งได้แก่ ช่วงเวลา 07.00 น.-10.00 น. และในช่วงเวลา 14.00 น.-19.00 น. ที่ค่าระดับวิกฤต ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

95% เหล่านี้คือช่วงเวลาที่มีการจราจรมีความหนาแน่นคับคั่งมาก ในทางกลับกัน ความหนาแน่นของการจราจรในช่วงเวลาที่มีการทดสอบไม่สามารถปฏิบัติเสมือนได้มีความหลากหลายตั้งแต่เบาบางไปจนถึงคับคั่ง

จากผลการทดสอบในช่วงเวลาต่าง ๆ เราจำเป็นต้องตัดสินใจเลือกว่าฟังก์ชันการกระจายแบบใด (เอ็กซ์โพเนนเชียลหรือจีวี) ที่สมควรนำมาใช้จำลองการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะในแต่ละชั่วโมงของวัน ฟังก์ชันการกระจายที่ถูกเลือกในแต่ละชั่วโมงของวันได้ถูกแสดงไว้ในคอลัมน์ที่ห้าของตารางที่ 3.1 ฟังก์ชันการกระจายในแต่ละชั่วโมงจะถูกเลือกจากเกณฑ์ต่างๆ ดังนี้

- ถ้าหากทั้งสองสมมติฐานการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและสมมติฐานการกระจายแบบจีวีวีไม่ถูกปฏิเสธ ฟังก์ชันการกระจายที่มีค่า D-Statistic น้อยกว่าจะถูกเลือกมาใช้
- ถ้าหากสมมติฐานการกระจายเพียงแบบเดียวผ่านการทดสอบโดยไม่ถูกปฏิเสธ ฟังก์ชันการกระจายชนิดนั้นก็จะถูกเลือกมาใช้
- ถ้าหากสมมติฐานการกระจายทั้งสองรูปแบบถูกปฏิเสธโดยการทดสอบ ก็จะไม่มีการกระจายชนิดใดที่จะถูกเลือกมาใช้ในการวิเคราะห์

กล่าวโดยสรุป เราสามารถสังเกตจากรายที่ 3.1 ได้ว่ามีเพียง 2 ช่วงเวลาเท่านั้น (ระหว่าง 01.00 น. และ 03.00 น.) ที่การกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจะมีความเหมาะสมมากกว่าการกระจายแบบจีวีวี ในการจำลองการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะ ในช่วงเวลาเหล่านี้เป็นช่วงเวลาที่สามารถจราจรเบาบางมาก ในทางตรงกันข้าม การกระจายแบบจีวีวีสามารถที่จะจำลองการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะทั้งในสภาพการจราจรที่เบาบางไปจนถึงสภาพการจราจรที่หนาแน่นคับคั่ง โปรดสังเกตว่ามี 8 ช่วงเวลาที่การทดสอบ K-S Test ปฏิเสธทั้งสองสมมติฐานการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและสมมติฐานการกระจายแบบจีวีวี สิ่งนี้หมายความว่า การกระจายทั้งสองรูปแบบไม่ดีเพียงพอที่จะเป็นตัวแทนของการกระจายสะสมเชิงประจักษ์ของระยะห่างระหว่างยานพาหนะในช่วงเวลาดังกล่าวที่ระดับความถูกต้องที่ต้องการ (ที่ระดับ 95%) อย่างไรก็ตาม หากระดับความถูกต้องที่ต้องการผ่อนคลายนลง ฟังก์ชันการกระจายที่นำมาเป็นสมมติฐานอาจจะไม่ถูกปฏิเสธและอาจสามารถนำมาใช้จำลองการกระจายสะสมเชิงประจักษ์ของระยะห่างระหว่างยานพาหนะในช่วงเวลาดังกล่าวได้

จากรายที่ 3.1 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีช่วงเวลาจำนวนมากถึง 22 ชั่วโมงที่ไม่สามารถนำการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลมาใช้ได้อย่างถูกต้อง สิ่งนี้อาจจะส่งผลกระทบต่อการศึกษาการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันของเครือข่ายซึ่งมักจะตั้งอยู่บนสมมติฐานของการใช้การกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล จากช่วงเวลา 22 ชั่วโมง มีช่วงเวลาจำนวนมากถึง 14 ชั่วโมงที่สามารถจำลองได้อย่างถูกต้องโดยการกระจายแบบจีวีวี อย่างไรก็ตาม เท่านั้นก็เพียงพอที่จะแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในเครือข่าย

3.2 การเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันภายใต้การกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่ต่างกัน

การเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในเครือข่ายจะมักจะถูกประเมินหรือวัดระดับค่าโดยใช้ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกัน (connectivity probability) กล่าวคือ ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเนื้อหาเป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามมิให้ผู้ใดนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

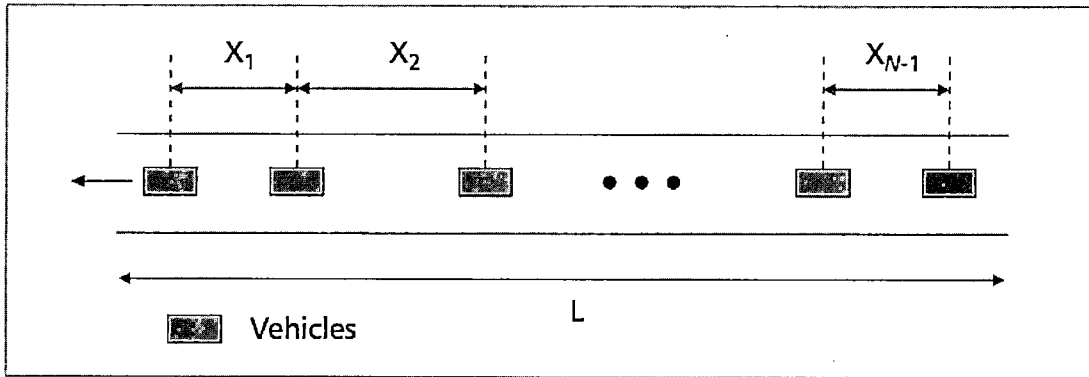
อย่างทั่วถึงกันเป็นสิ่งบ่งบอกว่ามีความเป็นไปได้มากน้อยเพียงใดที่เครือข่ายซึ่งมีความหนาแน่นของยานพาหนะตามที่กำหนดจะอยู่ในสถานะที่เชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกัน โดยปกติแล้วความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันจะเพิ่มขึ้นเมื่อยานพาหนะในเครือข่ายมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของยานพาหนะกับระยะห่างระหว่างยานพาหนะมีความสัมพันธ์กันโดยตรง กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างยานพาหนะจะลดลงเมื่อความหนาแน่นของยานพาหนะเพิ่มขึ้นนั่นเอง ในส่วนนี้เราจะอภิปรายว่าความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันนั้นถูกวิเคราะห์และคำนวณอย่างไร และจะอภิปรายถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการที่การกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเปลี่ยนแปลงไป

ข้อตกลงเบื้องต้นที่มักใช้ในการวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

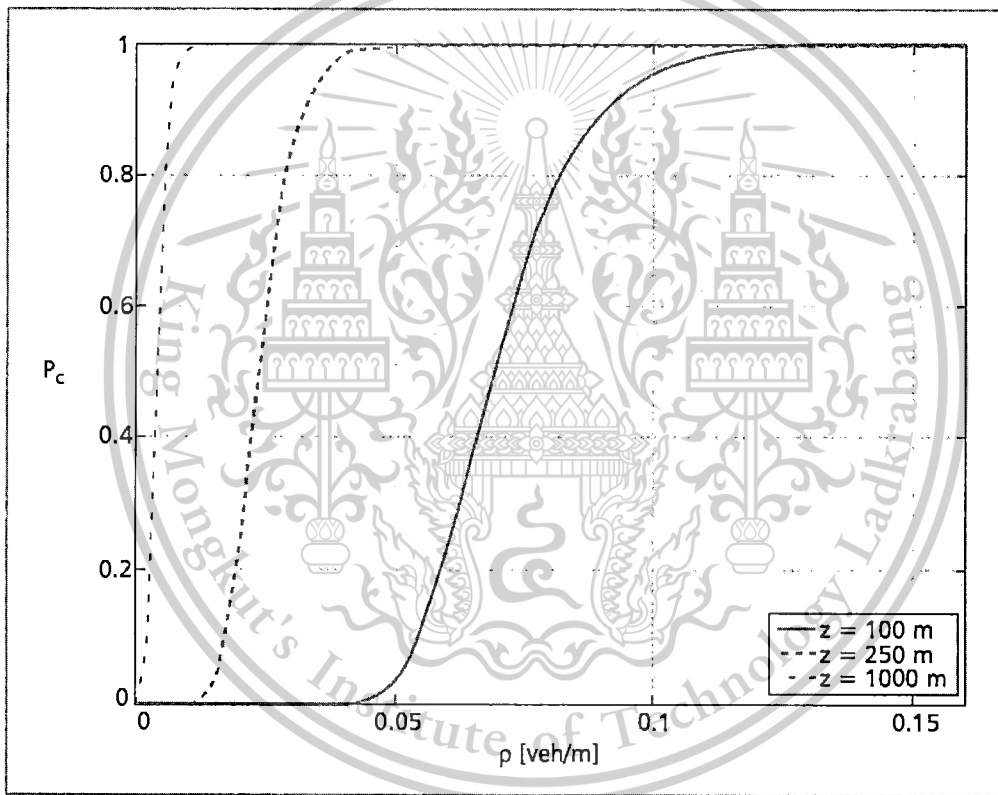
- ยานพาหนะมีการกระจายแบบสุ่มบนช่วงถนนที่มีความยาว L เมตร ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 ระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่อยู่ติดกันสามารถบรรยายโดยการกระจายทางสถิติ การกระจายทางสถิตินี้สามารถหาได้จากข้อมูลจริงที่เก็บได้ นอกจากนี้ยังได้มีสมมติฐานว่าระยะห่างระหว่างยานพาหนะแต่ละคู่เป็นอิสระต่อกันและมีการกระจายทางสถิติเหมือนกัน
- ยานพาหนะแต่ละคันมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถสื่อสารกับยานพาหนะคันอื่นได้ และอุปกรณ์สื่อสารมีรัศมีการส่งที่จำกัดซึ่งแทนได้ด้วยตัวแปร z กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มีการตั้งสมมติฐานว่ายานพาหนะสองคันสามารถสื่อสารถึงกันได้โดยตรงหากระยะห่างระหว่างยานพาหนะทั้งสองมีค่าน้อยกว่า z
- แพ็กเก็ตจากยานพาหนะ A สามารถถูกส่งต่อไปยังยานพาหนะ B ได้ ถ้าหากระยะห่างระหว่างลิงก์แต่ละลิงก์ที่เชื่อมต่อจากยานพาหนะ A ไปยัง B มีค่าน้อยกว่ารัศมีการส่ง

ด้วยข้อสมมติฐานเหล่านี้เป็นที่ตั้ง เราสามารถที่จะหาความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันได้ ในงานวิจัยนี้เราจะมุ่งประเด็นไปที่การไหลของการจราจรแบบทางเดียว การอาศัยประโยชน์จากการไหลของการจราจรแบบสองทิศทางสามารถเพิ่มความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันได้ [9,14] พิจารณาช่วงของถนนซึ่งยานพาหนะถูกจำลองเสมือนจุดในเครือข่ายแบบหนึ่งมิติดังเช่นที่แสดงในรูปที่ 3.1 เครือข่ายจะมีการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันถ้าหากมีเส้นทางสำหรับเชื่อมต่อยานพาหนะทุกๆ คู่ในเครือข่าย นี่หมายความว่าความน่าจะเป็นที่ระยะห่างระหว่างพาหนะแต่ละคันที่อยู่ติดกันจะต้องมีค่าน้อยกว่ารัศมีการส่ง ถ้าหากเราทราบการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเราก็จะสามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันได้ สมการสำหรับบรรยายความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในกรณีที่ระยะห่างระหว่างยานพาหนะมีการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ถูกนำเสนอไว้ใน [9] นอกจากนี้เมื่อปฏิบัติตามแนวทางที่ได้บรรยายไว้ใน [9] ก็สามารถที่จะหาความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในกรณีที่ระยะห่างระหว่างยานพาหนะมีการกระจายทางสถิติแบบอื่นๆ ได้ โดยปกติแล้วความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันจะเป็นฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของยานพาหนะ ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันและความหนาแน่นของยานพาหนะสามารถแสดงได้อย่างชัดเจนขึ้นในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

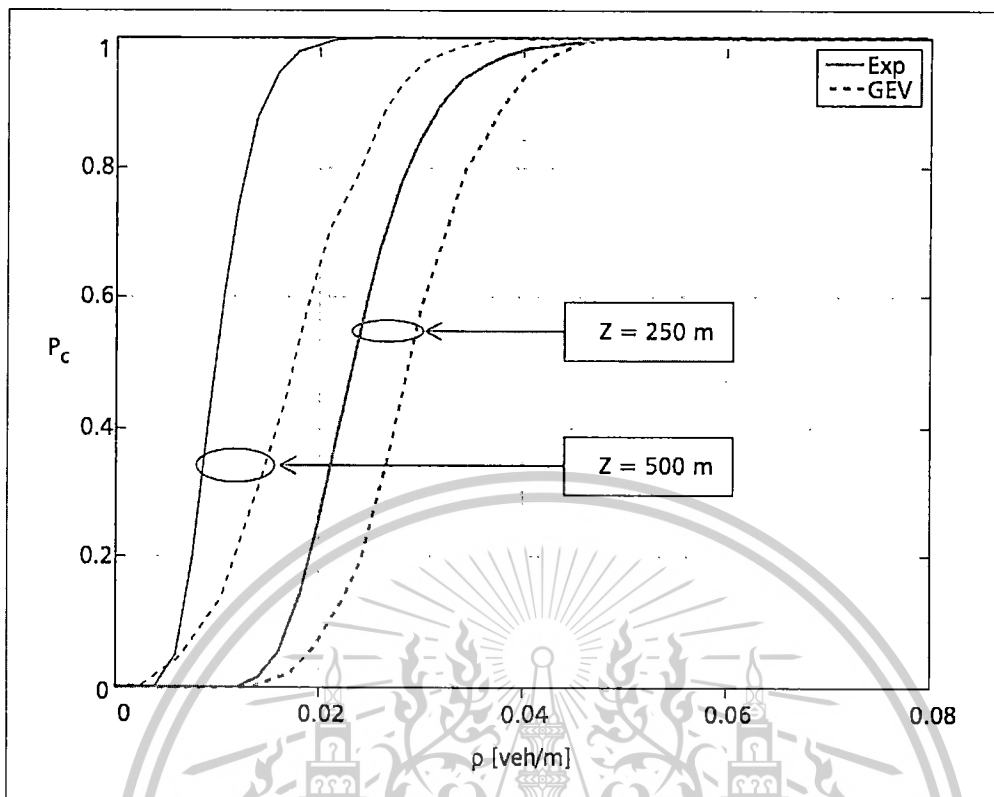


รูปที่ 3.1 สถานการณ์ที่นำมาพิจารณาโดยที่ยานพาหนะมีการกระจายแบบสุ่มบนช่วงของถนน



รูปที่ 3.2 ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่อย่างทั่วถึงกันซึ่งเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นของยานพาหนะ ค่ารัศมีการส่งสามค่าที่นำมาพิจารณาคือ 100 เมตร 250 เมตร และ 1000 เมตร ความยาวของช่วงถนนคือ 10 กิโลเมตร ผลที่นำมาแสดงอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่า การกระจายของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นไปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

ในรูปที่ 3.2 ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่อย่างทั่วถึงกันได้ถูกแสดงเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นของยานพาหนะ ค่าที่แตกต่างกัน 3 ค่าของรัศมีการส่งได้แก่ 100 เมตร 250 เมตร และ 1000 เมตร ได้ถูกนำมาพิจารณา ผลการวิเคราะห์ที่นำมาแสดงได้มาจากกรณีสมมติฐานว่าการไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ความน่าจะเป็นในการเชื่อมตอย่างั่วถึงกันซึ่งเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นของยานพาหนะ ค่ารัศมีการส่งสองค่าที่นำมาพิจารณาคือ 250 เมตร และ 500 เมตร ความยาวของช่วงถนนคือ 10 กิโลเมตร ผลการวิเคราะห์ภายใต้สมมติฐานที่ว่า การกระจายของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นไปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและผลการวิเคราะห์ภายใต้สมมติฐานที่ว่า การกระจายของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นไปแบบจีอีวีได้ถูกนำมาแสดงเปรียบเทียบ

กระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล โดยทั่วไปแล้วจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าสำหรับแต่ละค่าของรัศมีการส่งที่กำหนด ความน่าจะเป็นในการเชื่อมตอย่างั่วถึงกันเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของยานพาหนะเพิ่มขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เมื่อจำนวนยานพาหนะบนถนนมากขึ้น โอกาสที่เครือข่ายจะเกิดการเชื่อมตอย่างั่วถึงกันก็มีมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ สำหรับแต่ละค่าความหนาแน่นของยานพาหนะที่กำหนด ค่าความน่าจะเป็นในการเชื่อมตอย่างั่วถึงกันสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มรัศมีการส่ง ยกตัวอย่างเช่น ที่ระดับความหนาแน่น 0.05 คัน/เมตร เครือข่ายแทบจะไม่มีการเชื่อมต่อกันเกิดขึ้นเลยเมื่อรัศมีการส่งที่ใช้เป็น 100 เมตร แต่ทว่าเมื่อรัศมีการส่งถูกเพิ่มเป็น 250 เมตร เครือข่ายจะเกิดการเชื่อมต่อกันอย่างั่วถึงกันด้วยความน่าจะเป็นที่สูง

ในรูปที่ 3.3 ความน่าจะเป็นในการเชื่อมตอย่างั่วถึงกันได้ถูกแสดงเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นของยานพาหนะ ความน่าจะเป็นในการเชื่อมตอย่างั่วถึงกันที่ได้มาจากกรณีมีสมมติฐานว่าการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ถูกแสดงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

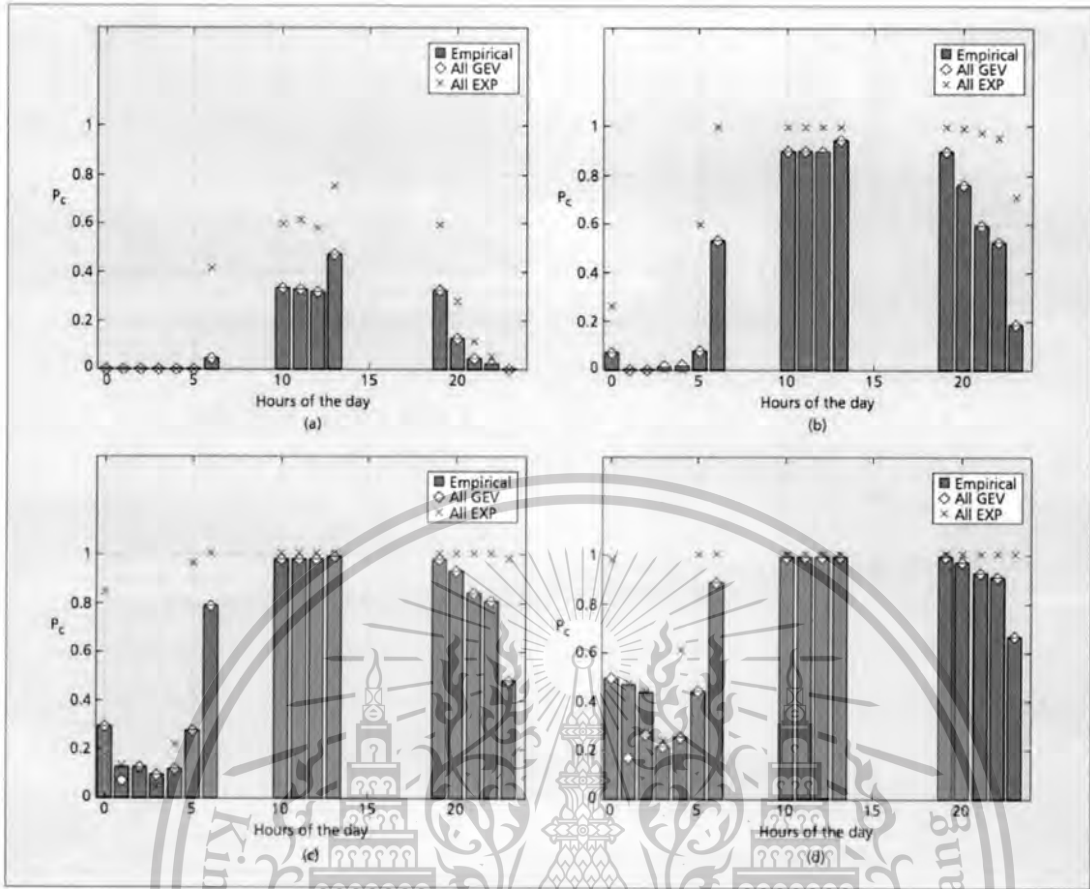
กราฟเส้นทึบ และความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่อนานพาทะเป็นแบบจีโอวีที่ได้มาจากกรณีที่มีสมมติฐานว่าการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นแบบจีโอวีได้ถูกแสดงด้วยกราฟเส้นประ เราจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่า สำหรับแต่ละค่าความหนาแน่นของยานพาหนะที่กำหนด ค่าความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่อนานพาทะเป็นแบบจีโอวีจะสูงกว่าในกรณีที่การกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นแบบจีโอวี ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่รัศมีการส่งมีค่าเท่ากับ 500 เมตร และความหนาแน่นมีค่า 0.02 คัน/เมตร เครื่องข่ายจะเชื่อมต่อนานพาทะเป็นแบบจีโอวีได้ด้วยความน่าจะเป็นที่สูงถ้าหากการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ในทางตรงกันข้าม ถ้าหากการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นแบบจีโอวี เครื่องข่ายก็จะเชื่อมต่อนานพาทะเป็นแบบจีโอวีได้ด้วยความน่าจะเป็นที่ต่ำ ($P_c \approx 0.6$) เหตุผลที่ทำให้การกระจายแบบจีโอวีให้ค่าความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่อนานพาทะที่ต่ำกว่าก็เนื่องมาจากการกระจายสะสมของมันเมื่อคำนวณที่ขอบของรัศมีการส่งจะมีค่าน้อยกว่ากรณีของการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ความน่าจะเป็นที่ระยะห่างระหว่างยานพาหนะจะมีค่าน้อยกว่ารัศมีการส่งในกรณีของการกระจายแบบจีโอวีจะน้อยกว่าในกรณีของการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

เนื่องจากเราได้แสดงให้เห็นแล้วว่า ในช่วงเวลาส่วนใหญ่ของวัน ระยะห่างระหว่างยานพาหนะจะถูกบรรยายได้ดีกว่าด้วยการกระจายทางสถิติแบบจีโอวี สิ่งนี้จะส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่อนานพาทะเป็นแบบจีโอวี สิ่งนี้บ่งชี้ว่าความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่อนานพาทะจะถูกประเมินเกินจริงไปในหลายๆ ช่วงเวลาของวันถ้าหากใช้สมมติฐานการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล นี่ย่อมมีผลกระทบที่สำคัญ มันได้บ่งบอกว่าสำหรับความหนาแน่นของยานพาหนะที่กำหนด รัศมีการส่งที่จำเป็นซึ่งคำนวณได้จากสมมติฐานการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจะน้อยกว่ารัศมีการส่งที่ต้องการในความเป็นจริง ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ความหนาแน่นของยานพาหนะเท่ากับ 0.02 คัน/เมตร การใช้รัศมีการส่งที่มีค่า 500 เมตรจะเพียงพอที่จะทำให้เครื่องข่ายเกิดการเชื่อมต่อนานพาทะเป็นแบบจีโอวีได้ถ้าหากการกระจายของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล อย่างไรก็ตามถ้าหากการกระจายของระยะห่างระหว่างยานพาหนะในความเป็นจริงเป็นแบบจีโอวี รัศมีการส่งที่จำเป็นจะต้องมากกว่า 500 เมตรอย่างมาก

3.3 การเชื่อมต่อนานพาทะที่สภาพการจราจรจริง

ในส่วนนี้ ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่อนานพาทะจะถูกวิเคราะห์บนพื้นฐานของการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่เก็บได้จากสภาพการจราจรจริง ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่อนานพาทะในแต่ละชั่วโมงจะถูกคำนวณตามข้อมูลการวิเคราะห์การกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่ได้รายงานในตารางที่ 3.1 ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่อนานพาทะในแต่ละชั่วโมงได้ถูกแสดงในรูปที่ 3.4a, 3.4b, 3.4c, และ 3.4d โดยมีสมมติฐานว่ารัศมีการส่งเป็น 250 เมตร, 500 เมตร, 750 เมตร, และ 1000 เมตร ตามลำดับ ในรูปเหล่านี้ ความสูงของแท่งกราฟแต่ละแท่งหมายถึงความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่อนานพาทะในแต่ละชั่วโมง เพื่อการเปรียบเทียบ ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่อนานพาทะในกรณีที่การกระจายของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ภายในเท่านั้น เมื่อผู้รู้เห็นหน้าของเอกสารนี้เป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในแต่ละชั่วโมงของวัน คาร์ตมีการส่งที่นำมาพิจารณา คือ (a) 250 เมตร (b) 500 เมตร (c) 750 เมตร และ (d) 1000 เมตร

พาหนะถูกสมมติว่าเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในแต่ละชั่วโมงได้ถูกแสดงด้วยเครื่องหมาย 'x' นอกจากนี้ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันบนสมมติฐานที่ว่า การกระจายของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นแบบจีวีวี ได้ถูกแสดงเป็นสัญลักษณ์ข้าวหลามตัด โปรดสังเกตว่ามีแปดช่วงเวลาที่ไม่มีแท่งกราฟ ช่วงเวลาเหล่านี้คือช่วงเวลาที่การกระจายของระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่แท้จริงบนถนนไม่ได้เป็นทั้งแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและจีวีวี

จากการสังเกตผลที่แสดงในรูปที่ 3.4 สามารถสรุปข้อสังเกตได้ดังนี้

- ในช่วงเวลาที่การกระจายของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นแบบจีวีวี ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันจะน้อยกว่าความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันที่คำนวณได้ในกรณีที่การกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล สิ่งนี้สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนในช่วงเวลาตั้งแต่ 10.00 น. ถึง 14.00 น. และในช่วงเวลาตั้งแต่ 19.00 น. ถึง 24.00 น. สิ่งนี้เป็นเครื่องยืนยันว่า ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันซึ่งคำนวณบนสมมติฐานที่ว่า การกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจะถูกประเมินให้ค่าสูงเกินความเป็นจริง

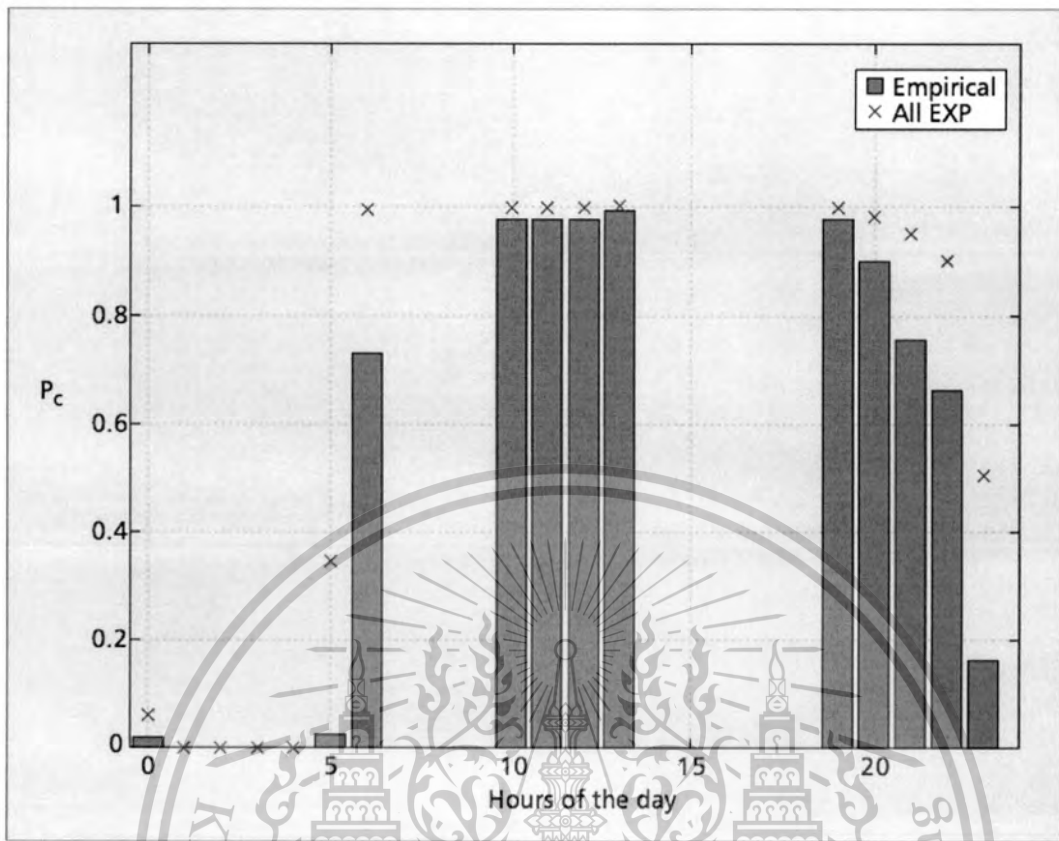
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระหว่างช่วงเวลา 10.00 น. ถึง 14.00 น. และระหว่างช่วงเวลา 19.00 น. ถึง 24.00 น. ความหนาแน่นของยานพาหนะในช่วงเวลาเหล่านี้ค่อนข้างที่จะสูง ในช่วงเวลาเหล่านี้ความแตกต่างระหว่างการกระจายทางสถิติทั้งสองแบบมีความเด่นชัดมาก อย่างไรก็ตาม เมื่อรัศมีการส่งมีค่ามากขึ้น ความแตกต่างก็จะลดน้อยลง
- ช่วงเวลาระหว่าง 01.00 น. ถึง 04.00 น. ความแตกต่างระหว่างความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันซึ่งคำนวณจากการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่เกิดขึ้นจริงและที่คำนวณจากสมมติฐานว่าการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลไม่ได้แตกต่างกันแบบมีนัยสำคัญตลอดทุกๆ ค่าของรัศมีการส่ง ทั้งนี้เนื่องมาจากความหนาแน่นของยานพาหนะในช่วงเวลาดังกล่าวมีความเบาบางมาก ดังนั้นการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจึงสามารถจำลองการกระจายของระยะห่างระหว่างยานพาหนะจริงในช่วงเวลาดังกล่าวได้ดี

นอกจากนี้แล้วยังมีความสำคัญที่จะศึกษาว่าความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันถูกผลกระทบอย่างไรเมื่อมีการจราจรในสองทิศทาง ในเมื่อเราไม่มีข้อมูลจราจรที่บันทึกไว้ของทางหลวงในอีกทิศทางของถนน เราพิจารณากรณีที่การจราจรในสองทิศทางของทางหลวงมีการกระจายเหมือนกัน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เราพิจารณากรณีที่ว่าการกระจายของระยะห่างระหว่างยานพาหนะบนถนนในทิศทางตรงกันข้ามมีการกระจายแบบเดียวกับที่เป็นอยู่ในทิศทางที่พิจารณา นี่สามารถเทียบได้กับสถานการณ์ที่การจราจรเป็นแบบสมมาตร การคำนวณหาความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในกรณีที่มีการจราจรแบบสองทิศทางสามารถทำได้โดยทำตามวิธีที่นำเสนอไว้ใน [9]

ในรูปที่ 3.5 ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในกรณีที่การกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะในแต่ละชั่วโมงเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในกรณีที่การกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะในแต่ละชั่วโมงเป็นไปตามที่รายงานในตารางที่ 3.1 ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบ รัศมีการส่งในกรณีนี้มีค่า 250 เมตร เราจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าการจราจรแบบสองทิศทางจะถูกพิจารณาความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันซึ่งคำนวณในกรณีที่มีสมมติฐานว่าการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะในแต่ละชั่วโมงเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลนั้นยังคงถูกประเมินสูงเกินกว่าความเป็นจริงในหลายๆ ช่วงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในแต่ละชั่วโมงของวัน ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันคำนวณภายใต้สมมติฐานว่าการจราจรในสองทิศทางสมมาตรกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

บทสรุป

ในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะในหลาย ๆ ช่วงเวลาของวันไม่ได้เป็นไปตามกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ในความเป็นจริงแล้วในหลาย ๆ ช่วงเวลาของวันการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะสามารถที่จะถูกบรรยายได้ดีกว่าโดยใช้การกระจายทางสถิติแบบจีอีวี สิ่งนี้ก่อให้เกิดความน่ากังวลที่สำคัญเพราะมันจะมีการตั้งสมมติฐานว่าการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะนั้นเป็นไปตามกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าการสมมติว่าการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะเป็นไปตามกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจะทำให้ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันที่คำนวณได้มีค่าสูงเกินความเป็นจริงไปอย่างมาก ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณการส่งที่น้อยที่สุดที่จำเป็นเพื่อการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันที่คาดการณ์ได้น้อยกว่าปริมาณการส่งที่จำเป็นต้องใช้จริง ดังนั้นควรใช้ความระมัดระวังในการคำนวณหาความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันเมื่อคำนวณด้วยสมมติฐานการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล อย่างไรก็ตาม การกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลสามารถใช้จำลองการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะได้ดีในกรณีที่ความหนาแน่นของการจราจรเบาบางมาก (เช่น น้อยกว่า 0.005 คัน/เมตร) แต่ในกรณีที่การจราจรมีความหนาแน่นค่อนข้างคับคั่ง การกระจายแบบจีอีวีจะเป็นตัวเลือกที่ดีกว่าในการจำลองการกระจายทางสถิติของระยะห่างระหว่างยานพาหนะ

แน่นอนว่ามีข้อจำกัดในแบบการวิเคราะห์และสมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผลกระทบที่เกิดจากสมมติฐานเหล่านั้นและแนวทางในการขยับขยายมีดังนี้

- แบบจำลองการจราจร -- ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลจราจรในพื้นที่ทางตอนเหนือของประเทศสหรัฐอเมริกาด้วยสมมติฐานที่ว่ารูปแบบการจราจรเป็นไปตามรูปแบบหนึ่ง ๆ ในแต่ละชั่วโมงของวัน แม้ว่ารูปแบบการจราจรนี้อาจจะไม่จำเป็นต้องเป็นจริงสำหรับพื้นที่บริเวณอื่นๆ ของโลก แต่มันก็สามารถใช้เป็นหลักฐานว่ามีหลายกรณีที่มีการกระจายของระยะห่างระหว่างพาหนะบนถนนไม่สามารถจำลองได้ด้วยการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของการจราจรในภูมิภาคอื่นสามารถดูข้อมูลเพิ่มเติมได้จาก [13]
- การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกัน -- ในงานวิจัยนี้ เราได้ตั้งสมมติฐานว่ายานพาหนะมีการกระจายตัวแบบอิสระต่อกันและเป็นการกระจายแบบเดียวกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์ของเราแพ็กเก็ตจะถูกปฏิบัติเหมือนหน่วยย่อยในการส่งข้อมูลและจะถูกส่งแบบแยกย่อยไม่ได้ในทิศทางเดียว การส่งแบบ "สโตร์-แคร์รี่-ฟอร์เวิร์ด (Store-Carry-Forward)" เป็นวิธีการส่งอีกวิธีหนึ่งซึ่งได้รับความนิยมในเครือข่ายเฉพาะกิจเคลื่อนที่ของยานพาหนะ อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์หาความเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกันในเครือข่ายที่ใช้วิธีการส่งแบบสโตร์-แคร์รี่-ฟอร์เวิร์ดนั้นมีความซับซ้อน ดังนั้นเราจึงจะให้เป็นการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่างในกรณีดังกล่าว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ที่จำเป็นต้องถูกดำเนินการซ้ำไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างขึ้นใหม่เพื่อหาความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่ออย่างทั่วถึงกัน ตัวอย่างของแบบจำลอง
ดังกล่าวสามารถดูได้ใน [15]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Takagi and L. Kleinrock, "Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-32, no. 3, Mar. 1984, pp. 246–57.
- [2] Y.-C. Cheng and T. G. Robertazzi, "Critical Connectivity Phenomena in Multihop Radio Models," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, no. 7, July 1989, pp. 770–77.
- [3] T. K. Philips, S. S. Panwar, and A. N. Tantawi, "Connectivity Properties of A Packet Radio Network Model," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 35, no. 5, Sept. 1989, pp. 1044–47.
- [4] M. Desai and D. Manjunath, "On the Connectivity in Finite Ad Hoc Networks," *IEEE Commun. Letters*, vol. 6, no. 10, Oct. 2002, pp. 437–39.
- [5] C. Bettstetter, "On the Minimum Node Degree and Connectivity of A Wireless Multihop Network," *Proc. ACM Int'l Symp. Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, Lausanne, Switzerland, June 2002, pp. 80–91.
- [6] P. Santi and D. Blough, "The Critical Transmitting Range for Connectivity in Sparse Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 2, no. 1, Jan.–Mar. 2003, pp. 25–39.
- [7] S. Yousefi *et al.*, "Connectivity in Vehicular Ad Hoc Networks in Presence of Wireless Mobile Base-Station," *Proc. IEEE Int'l. Conf. ITS Telecommun.*, Sophia Antipolis, France, June 2007, pp. 1–6.
- [8] S. Ukkusuri and L. Du, "Geometric Connectivity of Vehicular Ad Hoc Networks: Analytical Characterization," *Transportation Research Part C*, vol. 16, no. 5, Oct. 2008, pp. 615–34.
- [9] S. Panichpapiboon and W. Pattara-atikom, "Connectivity Requirements for Self-Organizing Traffic Information Systems," *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 57, no. 6, Nov. 2008, pp. 3333–40.
- [10] N. Wisitpongphan *et al.*, "Routing in Sparse Vehicular Ad Hoc Wireless Networks," *IEEE JSAC*, vol. 25, no. 8, Oct. 2007, pp. 1538–56.
- [11] Berkeley Highway Laboratory website, <http://bhl.path.berkeley.edu/>.
- [12] D. Sheskin, *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*, 4th ed., Chapman & Hall, 2007.
- [13] M. Gramaglia *et al.*, "New Insights from the Analysis of Free Flow Vehicular Traffic in Highways," *Proc. IEEE Int'l Symp. World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, Lucca, Italy, June 2011, pp. 1–9.
- [14] E. Baccelli *et al.*, "Information Propagation Speed in Bidirectional Vehicular Delay Tolerant Networks," *Proc. IEEE INFOCOM*, Shanghai, China, Apr. 2011, pp. 436–40.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[15] A. Kesting, M. Treiber, and D. Helbing, "Connectivity Statistics of Store-and-Forward Intervehicle Communication," *IEEE Trans. Intelligent Transportation Sys.*, vol. 11, no. 1, Mar. 2010, pp. 172–81.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่จากโครงการวิจัย

ผลงานจากโครงการวิจัยนี้ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ 1 เรื่องคือ

- L. Cheng and **S. Panichpapiboon**, "Effects of Intervehicle Spacing Distributions on Connectivity of VANET: A Case Study from Measured Highway Traffic," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 10, pp. 90-97, Oct. 2012.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effects of Intervehicle Spacing Distributions on Connectivity of VANET: A Case Study from Measured Highway Traffic

Lin Cheng, Trinity College, Hartford, Connecticut

Sooksan Panichpapiboon, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

Connectivity is an important property for information dissemination in a vehicular ad hoc network. Basically, connectivity ensures that a message from a source can be spread to reach all the vehicles in the network. Over the past few years, there have been a significant number of studies on connectivity models for vehicular ad hoc networks. Most of them rely on the key assumption that the intervehicle spacing distribution is exponential. However, based on a new empirical analysis, it is shown that during most periods of the day the intervehicle spacing distribution can better be described by other statistical distributions. This certainly affects the connectivity analysis. In this article, we discuss how the connectivity of a vehicular ad hoc network in a highway traffic scenario will change when the intervehicle spacing distribution is not exponential.

INTRODUCTION

Recent advances in computing and wireless technologies have paved the way for a new kind of traffic information systems. As opposed to the current systems where traffic data are mostly collected from fixed sensors, it is envisioned that a future traffic information system will be able to use vehicles as mobile sensors for collecting and distributing real-time traffic information. Equipped with communication and sensing capabilities, these vehicles can be exploited to improve driving safety and comfort. An infrastructureless traffic information system in the form of vehicular ad hoc networks (VANETs) has attracted a great deal of attention from the intelligent transportation system research community. In a VANET, vehicles can self-organize and form a network to exchange information. Messages from a source vehicle can be relayed to a distant vehicle, which may be multiple hops

or several blocks away. This capability is particularly useful for distributing traffic information, such as safety alerts and navigation information, without the need for expensive infrastructure.

Distributing traffic information in a VANET requires network connectivity. Basically, connectivity ensures that a message from one vehicle can be relayed to reach all the vehicles in the network. In order to achieve this connectivity, however, the road must be sufficiently dense. In other words, if the vehicles are too sparsely distributed, the distance between two consecutive vehicles may exceed the radio transmission range, making them unable to communicate. This causes disconnectedness in the network. It is a task of system designers to determine the minimum number of vehicles (i.e., the minimum penetration) necessary to form a connected network as well as the critical transmission range required to provide such connectivity. Thus, many connectivity models have been developed so that these key parameters can be determined properly.

While there are many studies on the connectivity of VANETs, most of them rely on the crucial assumption that the intervehicle spacing, or the distance between consecutive vehicles on the road, is exponentially distributed. Although an exponential distribution is a good approximation for the intervehicle spacing distribution in extremely light traffic conditions, a new empirical analysis suggests that in a moderate traffic condition the intervehicle spacing can better be described by other statistical distributions. In fact, it is shown in this article that an exponential distribution is a poor choice for modeling the empirical traffic distribution in many hours of the day. This raises an important concern. If the intervehicle spacing distribution is not exponential, how does it affect the connectivity analysis? To what extent would the density and the transmission range required for network connectivity change if the intervehicle spacing distribu-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

tion was not exponential? These are the key questions that will be discussed in this article. The main focus of this article will be on a highway traffic scenario. An urban traffic scenario is left for future study.

RELATED WORK ON CONNECTIVITY

Connectivity is one of the main topics of study in mobile ad hoc networks (MANETs) and VANETs. We briefly discuss some of the related work on connectivity in this section.

CONNECTIVITY IN MANET

Network connectivity and the range assignment problem have long been studied in the past. In the early work such as [1], an optimal transmission range, which maximizes a one-hop forward progress toward the direction of the destination, is investigated. The transmission range required for network connectivity was later explored in [2–6], where a Poisson point process is used to model the distribution of nodes in a network. In [2], network connectivity is studied in the context of broadcast percolation. A stochastic model for broadcast percolation is proposed, and the effects of node spatial density and transmission range on the number of broadcast cycles are investigated. However, an analytical expression of the critical transmission range for network connectivity is not given. In [3], network connectivity is studied as a covering problem, and analytical expressions for the minimum transmission range required for network connectivity are derived. The connectivity probability and critical transmission range in two-dimensional networks as well as in higher-dimensional networks are studied in [5, 6].

Although there are a number of studies on the connectivity of MANETs, most of them are not suitable for VANETs. This is due to the fact that the topology of nodes in a VANET is different from those in a typical MANET. In fact, nodes in a VANET are distributed on a structural road network, and they do not move as freely as nodes in a MANET. In other words, vehicles move in a more specific direction. Moreover, nodes in a VANET usually move at a higher speed than those in a MANET. These factors create topological and behavioral differences between the two types of networks.

CONNECTIVITY IN VANETS

There are a number of studies on the connectivity of VANETs. The connectivity probability of a one-dimensional ad hoc network and a vehicular network are analytically studied in [4, 7–9]. One of the main assumptions in these studies is that the nodes or vehicles in a VANET are distributed on a linear line (e.g., a road segment) according to a Poisson point process. Note that a Poisson assumption also implies that the intervehicle spacing is exponentially distributed.

The connectivity of a VANET depends largely on how the vehicles are spatially distributed on a road. One of the key assumptions that has traditionally been used is the exponential distribution. Although an exponential distribution is a good assumption for describing the intervehicle spacing in a very light traffic condition [10], it will be shown in this article that in a moderate

traffic condition the inter-vehicle spacing can better be described by other distributions.

CHARACTERIZATION OF INTERVEHICLE SPACING DISTRIBUTIONS

Among many parameters, connectivity of a VANET depends on two main factors: intervehicle spacing and radio transmission range. To achieve network connectivity, the radio transmission range of each vehicle must be set properly based on the characteristic of the intervehicle spacing. Intuitively, a VANET is connected if there is a series of links connecting a source from one end of the network to a destination on the other end. To ensure this condition, the distance between any two consecutive vehicles should be less than the radio transmission range. Since the distance between each pair of consecutive vehicles on a road is a random quantity, it is not possible to guarantee a “surely connected” network. Hence, statistical modeling is often used to assess the likelihood that a network will be connected based on a given radio transmission range and the statistical distribution of the intervehicle spacing. In most reported connectivity models, an exponential distribution is often assumed for the intervehicle spacing. However, it needs to be investigated if the intervehicle spacing indeed follows this specific distribution. If the exponential distribution cannot accurately represent the underlying intervehicle spacing distribution, the connectivity predicted may be invalid.

In order to model the intervehicle spacing distribution accurately, we characterize it through an empirical data analysis. The empirical data used in our study were provided by the Berkeley Highway Laboratory [11]. These data were collected in June 2006 from the dual-loop detectors installed along the I-80 Highway in California. Each dual-loop detector is capable of sensing the presence of a vehicle passing over it as well as estimating the speed of the passing vehicle. As a result, for each vehicle arriving at an observation point, we have a record of its arrival instant and its speed. The arrival instants are accurate within 1/60 of a second. These two pieces of information allow us to further compute a headway distance between two consecutive arrivals or an intervehicle spacing. Basically, an intervehicle spacing between consecutive vehicles can be obtained from the product of their interarrival time and instantaneous speed. More technical details on how to obtain the intervehicle spacing from the arrival time and speed data can be found in [10]. In this article, we select the data on June 26, 2006 for presentation as they represent typical weekday traffic. Naturally, the statistics of the intervehicle spacing will vary based on the hours of the day. For example, the intervehicle spacing during rush hour, when vehicles arrive as a burst, is expected to be drastically different from that in an off-peak period where the traffic is light. Therefore, we identify the exact statistical properties of the intervehicle spacing on an hourly basis. More specifically, for each hour of the day, a set of

Among many parameters, connectivity of a VANET depends on two main factors: intervehicle spacing and radio transmission range. To achieve network connectivity, the radio transmission range of each vehicle must be set properly based on the characteristic of the intervehicle spacing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A GEV distribution is a flexible three-parameter model that combines a family of common distributions. Similarly to the case of the exponential distributions, for each hourly period, we fit the empirical CDF with the closest GEV distribution.

intervehicle spacing samples from the raw data are acquired and sorted based on their values to produce an empirical cumulative distribution function (CDF). This procedure is repeated to obtain a complete set of 24 empirical CDFs.

Next, it is our task to find a suitable analytical statistical distribution that can closely describe each of the empirical CDFs. A common approach, employed by many researchers, is to hypothesize that an empirical CDF follows a particular analytical distribution and then accept or reject the hypothesis based on the Kolmogorov-Smirnov test (K-S test) [12]. Basically, the K-S test helps determine whether one statistical distribution can be regarded as "close enough" to the other distribution. In our case, we use the K-S test to assess how close the hypothesized analytical CDF is to the empirical CDF. In the K-S test, the difference between the two CDFs is measured through a metric called *D*-statistic, which is defined as

$$D = \max_x |H(x) - F(x)| \quad (1)$$

where $H(x)$ is a hypothesized analytical CDF and $F(x)$ is an empirical CDF. The *D*-statistic can then be used to calculate the *critical level*, which is a quantity describing a level of similarity between the two distributions. Generally, the critical level describes the probability that the hypothesized distribution will be able to yield a sample value, which is as extreme as a sample randomly drawn from the empirical distribution when the hypothesis is true. The hypothesis that the empirical intervehicle spacing follows the hypothesized distribution will be accepted or rejected based on the assessed critical level. If the value of the critical level is too small (e.g., less than 95 percent), then the hypothesis should be rejected. Otherwise, it should be accepted. In this study, the hypothesis will be rejected at the 95 percent critical level.

The K-S test is performed for each empirical CDF in each hour of the day. Note that the K-S test is performed on the CDF rather than on the order measures such as mean and variance. Two classes of distributions are used as hypothesized distributions: exponential distributions and generalized extreme value distributions.¹

Exponential (EXP) distributions — For each hour, we fit the empirical CDF with the closest exponential distribution. The K-S test results for the inter-vehicle spacing distributions with the smallest *D*-statistic are summarized in the third column of Table 1. The distribution with the smallest *D*-statistic is expected to be the best distribution to model the empirical distribution in each period. It can be observed that the test cannot reject the exponential hypothesis at the 95 percent critical level for the four 1-h periods from 1 a.m. to 5 a.m. However, the test rejects the exponential hypothesis for all the other periods. In other words, the test results suggest that the exponential distribution functions can be used to represent the empirical CDFs in the periods between 1 a.m. and 5 a.m., but not otherwise. Note that the vehicle densities in these periods are very small (e.g., all of the densities in these periods are below 0.005 vch/m.² This suggests that the exponential distribution is suitable

for modeling the intervehicle spacing distribution in a very light traffic condition.

Generalized extreme value (GEV) distributions — A GEV distribution is a flexible three-parameter model that combines a family of common distributions. Similar to the case of the exponential distributions, for each hourly period, we fit the empirical CDF with the closest GEV distribution. The results of the K-S test for the intervehicle spacing distributions with the smallest *D*-statistic are summarized in the fourth column of Table 1. It can be observed that the test rejects the hypothesis in eight one-hour periods, which are 7 a.m.–10 a.m. and 2 p.m.–7 p.m., at the 95 percent critical level. These are the periods where the traffic densities are relatively heavy. In contrast, the densities in the periods where the hypothesis cannot be rejected vary from very light to moderate.

Based on the test results, we need to determine which analytical distribution should be used to model the empirical distribution in each hour of the day. The selected distribution for each hour of the day is shown in the fifth column of Table 1. The distribution in each period is selected based on the following criteria:

- If both the exponential distribution hypothesis and the GEV distribution hypothesis are accepted, the one with smaller *D*-statistic will be chosen to model the intervehicle spacing distribution in that hour.
- If one of the hypothesized distributions is accepted and the other is rejected, the distribution with the accepted hypothesis will be chosen.
- If none of the hypothesized distributions is accepted, neither of the two distributions will be chosen, and the connectivity in that period will not be analyzed.

In summary, it can be observed from Table 1 that there are only two periods (i.e., between 1 a.m. and 3 a.m.) in which the exponential distribution is more suitable for modeling the intervehicle spacing distribution than the GEV distribution. In these periods, the traffic densities are very light. On the other hand, the GEV distribution can model the intervehicle spacing in a light as well as in a moderate traffic scenario quite well. Note that there are eight periods where the K-S test rejects both the exponential distribution and the GEV distribution. This simply means that both types of distributions are not good enough to fit the empirical distributions at the desired level of accuracy (95 percent critical level). However, had a lower level of accuracy been used, the hypothesized distributions might not be rejected and could be used to model the empirical distributions. According to Table 1, it is evident that there are 22 periods where the intervehicle spacing cannot be modeled accurately by the exponential distributions. This could seriously affect the connectivity analysis, which relies on the exponential distribution assumption. Out of the 22 periods, there are only 14 periods where the intervehicle spacing can be described by the GEV distributions. Nonetheless, these are sufficient to illustrate the effects they have on the network connectivity.

¹ We have also experimented with other types of distributions (e.g., Gaussian-Exponential mixture distributions [13]). However, the generalized extreme value distributions can better model the empirical distribution.

² The vehicle density in each period can be obtained from the reciprocal of the average intervehicle spacing shown in the second column of Table 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Periods	Empirical avg. intervehicle spacing (m)	K-S test results for EXP	K-S test results for GEV	Selected distributions	Distribution parameters
0:00-1:00	121.5922	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.4873, v = 54.8339, \eta = 51.6532$
1:00-2:00	254.5556	Accept	Accept	EXP	$\rho = 0.0039$
2:00-3:00	264.1398	Accept	Accept	EXP	$\rho = 0.0038$
3:00-4:00	330.4168	Accept	Accept	GEV	$\xi = 0.6098, v = 133.8231, \eta = 140.4971$
4:00-5:00	223.8198	Accept	Accept	GEV	$\xi = 0.6059, v = 86.7318, \eta = 89.1143$
5:00-6:00	94.4145	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.5950, v = 39.2119, \eta = 37.9574$
6:00-7:00	45.2156	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.4048, v = 22.30876, \eta = 20.2837$
7:00-8:00	32.2028	Reject	Reject	—	—
8:00-9:00	24.5185	Reject	Reject	—	—
9:00-10:00	33.5256	Reject	Reject	—	—
10:00-11:00	40.5211	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.2608, v = 23.4071, \eta = 19.1804$
11:00-12:00	40.1199	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.2581, v = 23.0535, \eta = 19.2996$
12:00-13:00	40.9839	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.2603, v = 23.6375, \eta = 19.4597$
13:00-14:00	36.4779	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.2367, v = 21.2908, \eta = 17.7936$
14:00-15:00	27.8407	Reject	Reject	—	—
15:00-16:00	13.2158	Reject	Reject	—	—
16:00-17:00	12.7363	Reject	Reject	—	—
17:00-18:00	12.2840	Reject	Reject	—	—
18:00-19:00	14.1251	Reject	Reject	—	—
19:00-20:00	40.6600	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.2595, v = 23.3881, \eta = 19.3659$
20:00-21:00	49.2442	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.2965, v = 27.4853, \eta = 23.2307$
21:00-22:00	56.7665	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.3432, v = 28.9384, \eta = 25.4499$
22:00-23:00	62.2362	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.3437, v = 33.0085, \eta = 28.9144$
23:00-24:00	85.9951	Reject	Accept	GEV	$\xi = 0.4611, v = 39.8109, \eta = 36.2537$

CDF expression for the EXP distribution: $F_X(x) = 1 - e^{-x}$ for $x > 0$
 CDF expression for the GEV distribution: $F_X(x) = e^{-1 + (x-v)\eta^{-1}}$ for $1 + \xi(x-v)/\eta > 0$

Table 1. K-S test results for the hypothesized distributions.

CONNECTIVITY UNDER DIFFERENT INTERVEHICLE SPACING DISTRIBUTIONS

The connectivity of a network is often evaluated by a connectivity probability. Basically, the connectivity probability describes how likely a network with a given vehicle density will be in the

connected state. Normally, the connectivity probability will increase as the network becomes denser. The vehicle density and intervehicle spacing are directly related. Obviously, the average distance between vehicles decreases as the vehicle density increases. In this section, we briefly discuss how the connectivity probability is typically modeled and describe how it is affected by different types of intervehicle spacing distributions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The following are the common assumptions normally used in a network connectivity model:

- It is often assumed that the vehicles are randomly distributed along a road segment of length L as illustrated in Fig. 1. The intervehicle spacing between each pair of consecutive vehicles can be described by a stochastic distribution. This stochastic distribution may be derived from the empirical data. In addition, it is normally assumed that the distance between each pair of consecutive vehicles is independent and identically distributed (i.i.d.).
- Each vehicle is equipped with a communication device, which has a finite radio transmission range denoted by z . In other words, it is assumed that two vehicles can directly communicate if the distance between them is less than or equal to z .
- It is assumed that a packet from vehicle A can be forwarded to vehicle B if the length of every intermediate link on the path from A to B is smaller than the transmission range.

Based on this set of assumptions, the connectivity probability can be derived. In this article,

we mainly consider a unidirectional traffic flow, which is a conservative assumption. Taking advantage of a bidirectional traffic flow can increase connectivity [9, 14]. Consider a road segment where vehicles are modeled as points in a one-dimensional network as shown in Fig. 1. The network will be connected if there is a path connecting any pair of vehicles. This implies that the distance between any two consecutive vehicles must be smaller than the radio transmission range. If the statistical distribution of the intervehicle spacing is known, the connectivity probability can be calculated. An expression for a connectivity probability in the scenarios where the intervehicle spacing is exponentially distributed is presented in [9]. Moreover, following the approach described in [9], the connectivity probability in the scenarios where the intervehicle spacing follows other kinds of distributions can also be derived. Normally, the connectivity probability is an increasing function of the vehicle density. The relation between the connectivity and the vehicle density can be described more clearly in Figs. 2 and 3.

In Fig. 2, the connectivity probability is shown as a function of the vehicle density. Three different values of the transmission ranges (100 m, 250 m, and 1000 m) are considered. The results shown are obtained based on the assumption that the intervehicle spacing distribution is exponential. Generally, it can be observed that for a given transmission range, the connectivity probability increases as the vehicle density increases. In other words, the higher the number of vehicles on the road segment, the higher the chance of having a connected network. In addition, for a given vehicle density, the connectivity probability can be increased by increasing the transmission range. For example, at the vehicle density of $\rho = 0.05$ veh/m, the network is barely connected when the used transmission range is $z = 100$ m. However, if the transmission range is increased to 250 m, the network will be connected with high probability.

In Fig. 3, the connectivity probability is shown as a function of the vehicle density. The connectivity probabilities obtained under the exponential distribution assumption are shown with solid lines, while the connectivity probabilities obtained under the GEV distribution assumption are shown with dashed lines. It can be observed that for a given vehicle density, the connectivity probability obtained under the exponential distribution assumption is generally higher than that obtained under the GEV distribution assumption. For example, in the scenario where $z = 500$ m and $\rho = 0.02$ veh/m, the network will be connected with high probability if the underlying intervehicle spacing distribution is exponential. On the contrary, if the intervehicle spacing distribution is GEV, the network will be connected with relatively low probability (i.e., $P_c \approx 0.6$). The reason the GEV-distributed intervehicle spacings yield worse connectivity probability is that their CDF, evaluated at the edge of the transmission range (z), is generally smaller than that of the exponential distribution. In other words, the probability that an intervehicle spacing will be less than a transmission range in the case with GEV distribution is generally smaller than the case with exponential distribu-

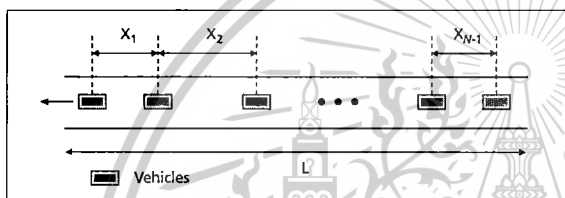


Figure 1. An illustrative scenario where the vehicles are randomly distributed along the road segment.

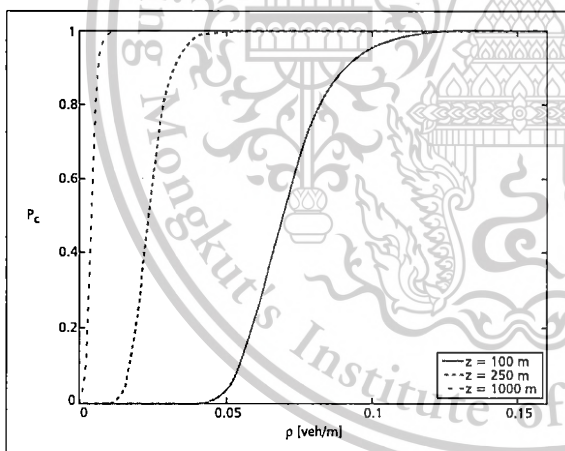


Figure 2. The connectivity probability as a function of vehicle density. Three values of the transmission ranges (100 m, 250 m, and 1000 m) are considered. The road segment length is $L = 10$ km. The results shown are obtained based on the assumption that the intervehicle spacing distribution is exponential.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

tion. Since it is shown that in most periods of the day the intervehicle spacing can better be described by a GEV distribution, this seriously affects the connectivity model. It suggests that the connectivity probability will be overestimated in most cases if the traditional assumption about the exponential intervehicle spacing distribution is used. This has a significant implication. It means that for a given density, the required radio transmission range predicted under the exponential distribution assumption will be smaller than that actually required in practice. For example, in the scenario where $\rho = 0.02$ veh/m, using a radio transmission range of 500 m will be sufficient to get the network connected if the intervehicle spacing distribution is exponential. However, if the actual intervehicle spacing distribution is GEV, the required transmission range needs to be much higher than 500 m.

CONNECTIVITY UNDER REAL TRAFFIC

In this section, the connectivity probability will be analyzed based on the intervehicle spacing distribution obtained from the real traffic data. The connectivity probability in each hour of the day will be computed according to the empirical intervehicle spacing distribution described in Table 1. The connectivity probability in each hour of the day is shown in Figs. 4a, 4b, 4c, and 4d, assuming that the radio transmission range of each vehicle is 250 m, 500 m, 750 m, and 1000 m, respectively. In these figures, the height of each bar indicates the connectivity probability, computed from the empirical distribution, at a specific hour of the day. For comparison, the connectivity probability obtained under the assumption that the inter-vehicle spacing distribution in every period is exponential is shown with an "x" mark. In addition, the connectivity probability obtained under the assumption that the intervehicle spacing distribution in every period is GEV is shown with a diamond symbol. Note that there are eight periods without bars. These are the periods where the empirical distributions are neither exponential nor GEV.

The following observations can be noted from Fig. 4:

- In the periods where the empirical intervehicle spacing distributions are GEV, the connectivity probabilities are lower than those obtained under the exponential distribution assumption. This can be clearly observed in the period from 10 a.m. to 2 p.m. and in the period from 7 p.m. to 12 a.m. It confirms that the connectivity probability computed under the exponential distribution assumption will be overestimated.
- During 10 a.m.–2 p.m. and 7 p.m.–12 a.m., the densities in these periods are moderately high. In these periods, the discrepancy between the two types of distributions are very notable. However, as the transmission range increases, the discrepancy becomes smaller.
- During 1 a.m.–4 a.m., the difference between the connectivity probability obtained from the empirical distribution and the connectivity probability obtained under the exponential distribution assumption

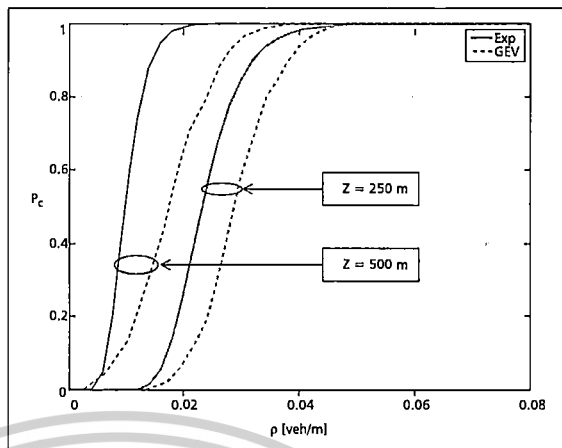


Figure 3. The connectivity probability as a function of the vehicle density. The connectivity probabilities obtained under the exponential distribution assumption and those obtained under the GEV distribution assumption are compared. Two different values of the transmission ranges are considered (250 m and 500 m). The road segment length is $L = 10$ km.

tion is not significantly large across all the transmission ranges. This is due to the fact that the vehicle densities in these periods are very light, and thus the exponential distribution can model the empirical intervehicle spacing quite accurately.

It is also important to see how the connectivity is affected when the bidirectional traffic is considered. Since we do not have logged traffic data of the highway in the opposite direction, we consider a scenario where the traffic in both directions of the highway are distributed with the same distribution. In other words, we assume that the intervehicle spacings of the vehicles in the opposite traffic direction have the same distribution as the one in the current direction. This can be regarded as a symmetric traffic scenario. To obtain the connectivity probability based on the bidirectional traffic, we follow the simulation approach given in [9].

In Fig. 5, the connectivity probability in the case where the intervehicle spacing distribution in each period is assumed to be exponential and the connectivity probability in the case where the intervehicle spacing distribution is modeled with the distribution described in Table 1 are compared. The transmission range in this case is assumed to be $z = 250$ m. It can be observed that even when bidirectional traffic is considered, the connectivity probabilities obtained by assuming that the intervehicle spacing distributions are exponential tend to be overestimated in many periods.

CONCLUDING REMARKS

In this study, we have shown that the intervehicle spacing distributions in most periods of the day do not follow an exponential distribution. In

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

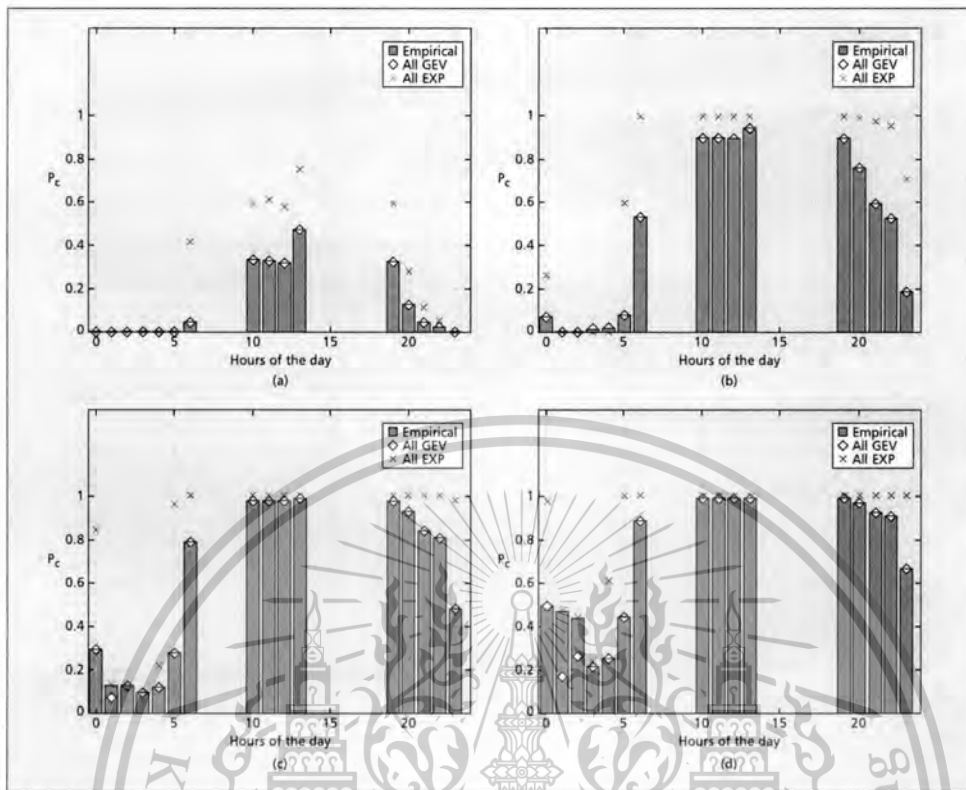


Figure 4. Connectivity probability in each hour of the day. The radio transmission range is assumed to be: a) $z = 250$ m; b) $z = 500$ m; c) $z = 750$ m; d) $z = 1000$ m.

particular, in most periods the intervehicle spacing distribution can better be described by a GEV distribution. This raises an important concern because it is commonly assumed in most connectivity models that the intervehicle spacing distribution is exponential. It is shown in this article that assuming the intervehicle spacing distribution is exponential will overestimate the connectivity probability by a significant amount. Consequently, it makes the minimum required transmission range predicted under the exponential distribution assumption to be smaller than what is actually required in real practice. Thus, precautions should be taken when modeling the connectivity probability with the exponential distribution assumption. Finally, the exponential distribution can be used to model the intervehicle spacing in the scenario where the traffic density is extremely light (e.g., below 0.005 veh/m). However, in the scenario where the traffic density is moderately high, the GEV distribution is a more appropriate choice for modeling the intervehicle spacing distribution.

There are, of course, a few limitations on the models and the assumptions used in this article.

The implications of such assumptions and possible extensions are discussed below.

Traffic model: Our approach is based on measured traffic in one region of North America with the assumption that the traffic follows a similar distribution during certain hours of the day. While this traffic model may not necessarily apply to the characteristics of the traffic in other geographical regions, it does serve as evidence that there are cases where the empirical intervehicle spacing cannot be described correctly by the exponential distribution. For the characterization of highway traffic in other regions, see, for example, the work in [13].

Connectivity analysis: In this article, we assume that the vehicles are distributed in an i.i.d. fashion. Thus, in our analysis, a packet is treated as a basic unit for forwarding and is always transmitted as an indivisible entity in one direction. Store-carry-and-forward is another popular strategy for distributing packets in vehicular networks, and it can be more suitable for implementation in a scenario where the network is sparse. However, due to the inherent complexity involved in connectivity analysis for VANETS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

with the store-carry-and-forward approach, it is left for future study. In such a case, a new analytical model for deriving the connectivity probability would be needed. An example of such models can be found in [15].

REFERENCES

- [1] H. Takagi and L. Kleinrock, "Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-32, no. 3, Mar. 1984, pp. 246-57.
- [2] Y.-C. Cheng and T. G. Robertazzi, "Critical Connectivity Phenomena in Multihop Radio Models," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, no. 7, July 1989, pp. 770-77.
- [3] T. K. Philips, S. S. Panwar, and A. N. Tantawi, "Connectivity Properties of A Packet Radio Network Model," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 35, no. 5, Sept. 1989, pp. 1044-47.
- [4] M. Desai and D. Manjunath, "On the Connectivity in Finite Ad Hoc Networks," *IEEE Commun. Letters*, vol. 6, no. 10, Oct. 2002, pp. 437-39.
- [5] C. Bettstetter, "On the Minimum Node Degree and Connectivity of A Wireless Multihop Network," *Proc. ACM Int'l Symp. Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, Lausanne, Switzerland, June 2002, pp. 80-91.
- [6] P. Santi and D. Blough, "The Critical Transmitting Range for Connectivity in Sparse Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 2, no. 1, Jan.-Mar. 2003, pp. 25-39.
- [7] S. Yousefi et al., "Connectivity in Vehicular Ad Hoc Networks in Presence of Wireless Mobile Base Stations," *Proc. IEEE Int'l. Conf. ITS Telecommun.*, Sophia Antipolis, France, June 2007, pp. 1-6.
- [8] S. Ukkusuri and L. Du, "Geometric Connectivity of Vehicular Ad Hoc Networks: Analytical Characterization," *Transportation Research Part C*, vol. 16, no. 5, Oct. 2008, pp. 615-34.
- [9] S. Panichpapiboon and W. Pattara-atikom, "Connectivity Requirements for Self-Organizing Traffic Information Systems," *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 57, no. 6, Nov. 2008, pp. 3333-40.
- [10] N. Wisitpongphan et al., "Routing in Sparse Vehicular Ad Hoc Wireless Networks," *IEEE JSAC*, vol. 25, no. 8, Oct. 2007, pp. 1538-56.
- [11] Berkeley Highway Laboratory website, <http://bhl.path.berkeley.edu/>.
- [12] D. Sheskin, *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*, 4th ed., Chapman & Hall, 2007.
- [13] M. Gramaglia et al., "New Insights from the Analysis of Free Flow Vehicular Traffic in Highways," *Proc. IEEE Int'l Symp. World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, Lucca, Italy, June 2011, pp. 1-9.
- [14] E. Baccelli et al., "Information Propagation Speed in Bidirectional Vehicular Delay Tolerant Networks," *Proc. IEEE INFOCOM*, Shanghai, China, Apr. 2011, pp. 436-40.

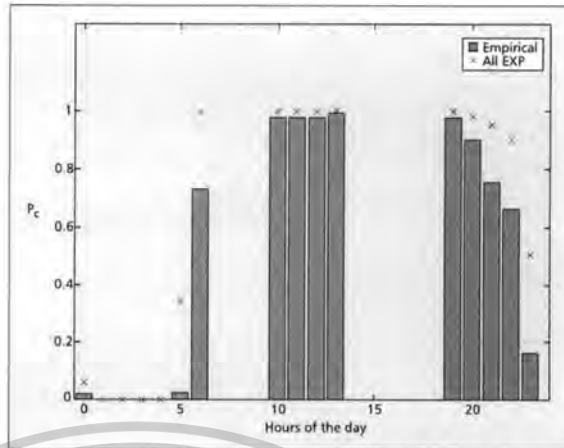


Figure 5. Connectivity probability in each hour of the day. The connectivity probabilities are obtained based on the assumption that the traffic in both directions of the highway is symmetric.

- [15] A. Kesting, M. Treiber, and D. Helbing, "Connectivity Statistics of Store-and-Forward Intervehicle Communication," *IEEE Trans. Intelligent Transportation Sys.*, vol. 11, no. 1, Mar. 2010, pp. 172-81.

BIOGRAPHIES

LIN CHENG (lin.cheng@trincoll.edu) is an assistant professor of engineering at Trinity College, Connecticut. He received M.S. and Ph.D. degrees in electrical and computer engineering from Carnegie Mellon University. His current research interests include communication networks and intelligent transportation systems.

SOOKSAN PANICHAPABOON (sooksan@alumini.cmiu.edu) is an assistant professor in the Faculty of Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. He received B.S., M.S., and Ph.D. degrees in electrical and computer engineering from Carnegie Mellon University in 2000, 2002, and 2006, respectively. His current research interests include ad hoc wireless networks, intelligent transportation systems, and performance modeling.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัตินักวิจัย

ชื่อ-สกุล สุขสันต์ พาณิชพาพิบูล
ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

- Ph.D. Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, USA, 2006
- M.S. Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, USA, 2002
- B.S. Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, USA, 2000

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ

- Intelligent Transportation Systems
- Vehicular Ad Hoc Networks
- Sensor Networks

ผลงานวิจัย

ประเภทวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

1. L. Cheng and **S. Panichpapiboon**, "Effects of Intervehicle Spacing Distributions on Connectivity of VANET: A Case Study from Measured Highway Traffic," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 10, pp. 90-97, Oct. 2012.
2. **S. Panichpapiboon** and W. Pattara-atikom, "A Review of Information Dissemination Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 14, no. 3, pp. 784-798, Third Quarter, 2012.
3. **S. Panichpapiboon** and W. Pattara-atikom, "Exploiting Wireless Communication in Vehicle Density Estimation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 6, pp. 2742-2751, Jul. 2011.
4. **S. Panichpapiboon**, G. Ferrari, and O. K. Tonguz, "Connectivity of Ad Hoc Wireless Networks: An Alternative to Graph-Theoretic Approaches," *Wireless Networks*, vol. 16, no. 3, pp. 793-811, Apr. 2010.
5. **S. Panichpapiboon** and W. Pattara-atikom, "Connectivity Requirements for Self-Organizing Traffic Information Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 6, pp. 3333-3340, Nov. 2008.
6. **S. Panichpapiboon** and J. M. Peha, "Providing Secondary Access to Licensed Spectrum Through Coordination," *Wireless Networks*, vol. 14, no. 3, pp. 295-307, Jun. 2008.
7. **S. Panichpapiboon**, G. Ferrari, N. Wisitpongphan, and O. K. Tonguz, "Route Reservation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้