บทที่ 5

สถานการณ์ที่มีผู้ใช้บริการไม่ปฏิบัติตามกฎการจองช่องสัญญาณ

บทนี้จะกล่าวถึงที่มาของปัญหาและความสำคัญของปัญหาโดยอ้างอิงถึงสถานการณ์ที่มีผู้ใช้บริการหนึ่งรายหรือมากกว่านั้นไม่ปฏิบัติตามกฎการจองช่องสัญญาณบนพื้นฐานการทำงานของเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ CFP (Cascade Fixed Probability) และเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ FPT (Fixed Probability Technique) เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบที่เกิดจากการที่มีผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองและหาแนวการป้องกันหรือแก้ไขต่อไป

5.1 ที่มาของปัญหาและความสำคัญของปัญหา

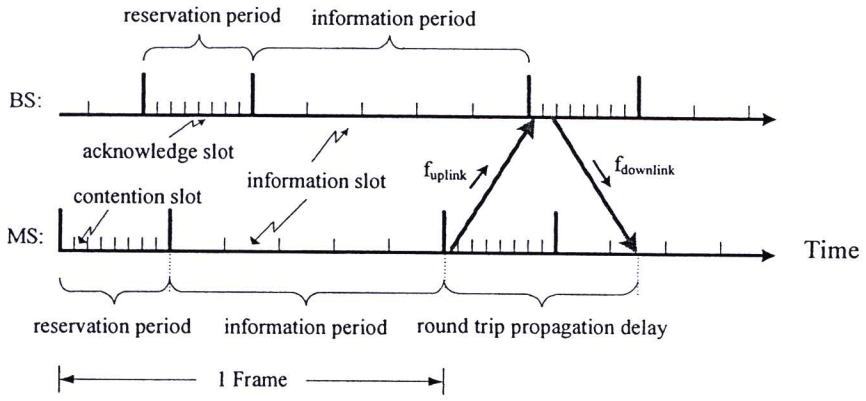
สถานการณ์ที่มีผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองช่องสัญญาณในชั้นควบคุมการเข้าถึงช่องสัญญาณหรือ Media Access Control (MAC) ในปัจจุบันได้กลายมาเป็นประเด็นสำหรับเครือข่ายการเข้าถึงบรอดแบนด์ไร้สายที่มีนักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจ [31–36] โดยเฉพาะอย่างยิ่งมุมมองในเรื่องของสมรรถนะและความปลอดภัย สำหรับมุมมองในเรื่องของสมรรถนะนั้นผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจอง (misbehaved) อาจจะไปเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเข้าถึงช่องสัญญาณเพื่อให้ตนเองได้รับโอกาสในการเข้าใช้ช่องสัญญาณมากขึ้นอย่างไม่ยุติธรรม (unfairness) และสำหรับมุมมองในเรื่องของความปลอดภัยนั้นผู้ใช้บริการที่มีจุดมุ่งหมายที่จะเข้ามาเพื่อทำลาย (malicious) กฎเกณฑ์ในการเข้าจองช่องสัญญาณซึ่งเป็นสาเหตุให้ผู้ใช้บริการที่ทำตามกลไกการจองปกติ (well-behaved) หรือผู้ใช้บริการที่ปฏิบัติตามกฎการจองช่องสัญญาณได้รับผลกระทบโดยตรงซึ่งอาจจะไม่สามารถทำการจองได้เป็นเวลานานหรือไม่ก็ทำให้สมรรถนะของระบบทั้งหมดแย่ลง

ความหลากหลายของปัญหาในแง่มุมต่างๆ ภายใต้สถานการณ์ที่มีผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองในชั้น MAC ได้มีการศึกษามาอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับ IEEE 802.11 WLANs ได้นำเสนอเทคนิคการโกง (cheating) [50–53] บนพื้นฐานการทำงานของโพรโทคอล DCF (Distributed Coordination Function) ซึ่งเป็นโพรโทคอลประเภทที่ต้องทำการแข่งขันเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณตามมาตรฐาน IEEE 802.11 [57,58] วิธีการโกงสามารถทำได้ง่ายและให้ค่าวิสัยสามารถสูงกว่าผู้ใช้บริการทั่วไป วิธีการที่ผู้ใช้บริการไม่ปฏิบัติตามกฎการจองมีมากมายทั้งในส่วนของช่องสัญญาณขาขึ้นและขาลงซึ่งได้ถูกนำเสนอใน [31–34] จากเอกสารอ้างอิงนี้ได้รวมเอาวิธีการเลือกช่วงการแบ็กออฟ (backoff interval) ที่มีเวลาน้อยกว่าตาม ที่ได้ระบุไว้ในโพรโทคอล DCF โดยการใช้วิธีการส่งซ้ำของแพ็กเกตที่แตกต่างกันเมื่อเกิดการ

ชนขึ้นซึ่งจะไม่ต้องขยายขนาดหน้าต่างแข่งขัน (Contention Window: CW) ออกเป็นสองเท่า [31,34] หรือการกำหนดช่วงเวลาในการรอให้มีค่ามากกว่าเวลาในการส่งข่าวสารที่ต้องการจริงในเฟรมหนึ่ง [37] ซึ่งทำให้ผู้ใช้บริการรายอื่นๆ ต้องรอเข้าใช้ช่องสัญญาณ (Network Allocation Vector: NAV) เป็นเวลานานขึ้นกว่าเดิมหรือเป็นสาเหตุให้เกิดการชนของเฟรม CTS, ACK หรือ DATA กับผู้ใช้บริการรายอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียงกันด้วยความตั้งใจเพื่อให้หน้าต่างแข่งขันขยายขนาดเป็นสองเท่า [45] สำหรับผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองในชั้นที่สูงขึ้นเช่นการหาเส้นทางในการเชื่อมต่อเครือข่ายได้มีการศึกษากันมาก ยกตัวอย่างเช่นเครือข่ายไร้สายแบบแอดฮอกผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองอาจจะทำการปฏิเสธที่จะส่งต่อแพ็กเกตตลอดเวลาในฐานะที่เป็นผู้ใช้รายหนึ่งซึ่งไม่ใช่ผู้ใช้ที่อยู่ต้นทางหรือปลายทางเพื่อต้องการลดการใช้พลังงานของตนเองหรือค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ที่จะเกิดขึ้น [34,35] การกระทำดังกล่าวปกติแล้วจะมีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบหรือ ไม่ก็ทำให้เกิดการขาดการติดต่อกับผู้ใช้บริการบางราย ความเป็นไปได้ในการปฏิเสธการโจมตีสัญญาณซิกแนลลิ่งหรือสัญญาณควบคุมของเครือข่ายไร้สาย 3G บทพื้นฐานของ CDMA2000 และ UMTS ซึ่งได้ถูกนำเสนอและศึกษาใน [46] วัตถุประสงค์ของการศึกษาเหล่านี้ประกอบด้วยการแบ่งประเภทของเทคนิคการจองที่แตกต่างกันคือ ผลกระทบที่มีต่อผู้ใช้ที่ปฏิบัติตามกฎการจอง และการกำจัดผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองในชั้น MAC โดยการออกแบบโพรโทคอลชนิดใหม่ที่สามารถลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจอง [39] หรือนำเสนอ อัลกอริทึมการตรวจจับ (detection) ผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองที่มีประสิทธิภาพ [48]–[51] ร่วมกับแบบแผนการลงโทษ (punishment) [41] นอกจากนั้นแล้วในเครือข่ายที่มีผู้ใช้บริการไม่ปฏิบัติตามกฎการจองมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ตนเองได้ประโยชน์สูงสุดสำหรับการแก้ปัญหานั้นนิยมนำทฤษฎีเกม (game theory) มาประยุกต์สร้างแบบจำลองปัญหาเครือข่ายซึ่งถูกพิจารณาให้เป็นเหมือนเกมส์ [52]–[54]

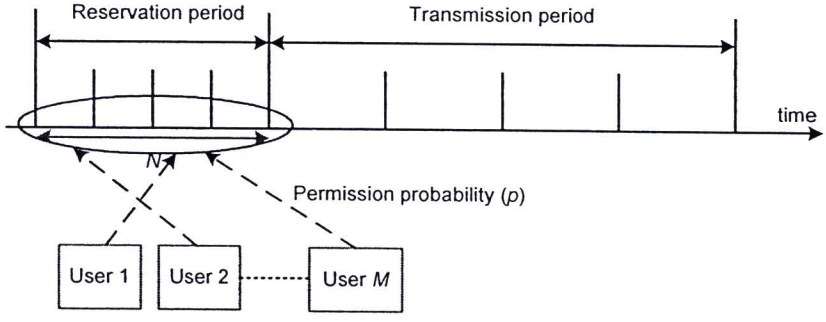
5.2 สถานการณ์ที่มีผู้ใช้บริการไม่ปฏิบัติตามกฎการจองสำหรับเทคนิคการจองแบบ CFP

เทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ CFP สำหรับโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารสัญญาณไร้สายที่เวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบมีค่าน้อยกว่าเวลาที่ใช้ข้อมูล จากข้อสมมติฐานนี้ทำให้ทราบว่าผู้ใช้บริการจะสามารถรู้ผลการจองของตนเองได้หลังจากสิ้นสุดช่วงการจองในแต่ละเฟรมซึ่งหมายความว่าผู้ใช้บริการแต่ละรายสามารถทำการจองได้เพียงครั้งเดียวในแต่ละเฟรม สำหรับโครงสร้างเฟรมและการทำงานของระบบที่นำเสนอสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 โครงสร้างเฟรมและการทำงานของระบบที่นำเสนอ

สำหรับกลไกการจองช่องสัญญาณของเทคนิค CFP สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.2 ผู้ใช้บริการแต่ละรายจะพยายามทำการจองช่องสัญญาณในแต่ละสล็อตอย่างเป็นลำดับจากสล็อตแรกถึงสล็อตสุดท้าย ในแต่ละสล็อตผู้ใช้จะตัดสินใจที่จะทำการจองหรือไม่โดยทำการสุ่มความน่าจะเป็นมาหนึ่งค่าแล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นที่สถานีฐานเป็นผู้กำหนดและกระจายข่าวสารนี้ไปยังผู้ใช้บริการทุกรายในพื้นที่ของตนเองซึ่งความน่าจะเป็นนี้จะถูกเรียกว่า "ความน่าจะเป็นการอนุญาตส่งแพ็กเกตการจองช่องสัญญาณ" หรือ permission probability (p) ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดช่วงการจองในแต่ละเฟรม หากความน่าจะเป็นที่สุ่มได้มีค่าน้อยกว่า p จะสามารถเข้าทำการจองได้ หากไม่เป็นเช่นนั้นแล้วผู้ใช้บริการจะพยายามเข้าจองใหม่อีกครั้งในเฟรมถัดไป



รูปที่ 5.2 กลไกการเข้าจองช่องสัญญาณของเทคนิค CFP

การวิเคราะห์สมรรถนะทางคณิตศาสตร์ของเทคนิค CFP ได้ถูกศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะกับเทคนิคอื่น ๆ [19] เมื่อพิจารณาระบบที่มีผู้ใช้บริการจำนวน M ราย และจำนวนสล็อตการจอง N สล็อตในแต่ละเฟรม ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาจำนวนความสำเร็จโดยเฉลี่ยในการจองช่องสัญญาณโดยใช้สมการ (1) ได้ดังนี้

$$S[M,N,p]=\sum_{k=0}^{M} k\,P[k\mid M,N,p] \tag{1}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}P[k\mid M,N,p]&=b[M,0,p]P[k\mid M,N-1,p]\\&\quad+b[M,1,p]P[k-1\mid M-1,N-1,p]\\&\quad+\sum_{i=2}^{M}b[M,i,p]P[k\mid M-i,N-1,p]\end{aligned} \tag{2}$$

และ $b[M,i,p]$ คือฟังก์ชั่นความน่าจะเป็นแบบไบโนเมียลซึ่งมีผู้ใช้ i รายจากผู้ใช้บริการทั้งหมด M ราย ทำการจองในสล็อตหนึ่งด้วยความน่าจะเป็น p ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

$$b[M,i,p]=\binom{M}{i}p^{i}(1-p)^{M-i} \tag{3}$$

และมีเงื่อนไขขอบเขตคือ

$$P[k\mid m,n,p]=\begin{cases}0, & k<0,m\geq 0,n\geq 0\\ 1, & k=0,m\geq 0,n=0\\ 0, & k>0,m\geq 0,n=0\\ 1, & k=0,m=0,n\geq 0\\ 0, & k>0,m=0,n\geq 0\end{cases} \tag{4}$$

เมื่อ $m\in\{0,1,\ldots,M\}$ และ $n\in\{0,1,\ldots,N\}$ จากสมการ (1) ถึง (4) ถูกสร้างขึ้นในรูปของรีเคอร์ซีพ (recursive formula) ซึ่งหมายความว่าการค้นหาคำตอบของปัญหาทั้งหมดที่ต้องการจะได้จากคำตอบเล็กๆ และจะขยายต่อเนื่องไปจนได้คำตอบทั้งหมดในที่สุด การแสดงสูตรเพื่อหาคำตอบในลักษณะนี้จะใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มมากขึ้นตามปัญหาที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้นเพื่อลดปัญหาข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้นำเสนอสูตรการหาคำตอบรูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าและยังคงให้ความถูกต้องเช่นเดิมซึ่งถูกแสดงในสมการ (5)

$$\begin{aligned}S[M,N,p]&=M\left(\begin{array}{l}\left(p(1-p)^{M-1}\right)+\left(p(1-p)\left(1-p(1-p)\right)^{M-1}\right)\\ +\left(p(1-p)^{2}\left(1-p(1-p)^{2}\right)^{M-1}\right)\\ +\cdots+\left(p(1-p)^{N-1}\left(1-p(1-p)^{N-1}\right)^{M-1}\right)\end{array}\right)\\&=M\sum_{i=1}^{N}\left(p(1-p)^{i-1}\left(1-p(1-p)^{i-1}\right)^{M}\right)\end{aligned} \tag{5}$$

5.3 กลไกการทำงานของเทคนิคที่นำเสนอและการวิเคราะห์สมรรถนะทางคณิตศาสตร์

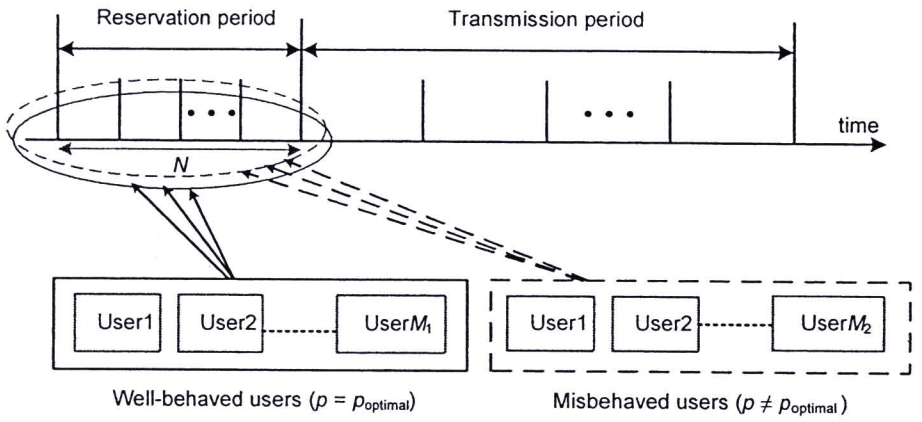
หลังจากได้อธิบายเทคนิคการจองช่องสัญญาณ CFP มาในข้างต้น ในหัวข้อนี้จะพิจารณาปัญหาของผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองช่องสัญญาณ โดยทั่วไปแล้วผู้ใช้บริการทั้งหมด

จะทำการจองช่องสัญญาณโดยใช้กฎเกณฑ์และข้อสมมติฐานเดียวกัน โดยวัตถุประสงค์หลักคือการนำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณสูงกว่าเดิม การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบจะแสดงในรูปของจำนวนความสำเร็จโดยเฉลี่ยในการจองของผู้ใช้บริการทั้งหมดในระบบ ผู้ใช้บริการทั่วไป และผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจอง

สำหรับสถานการณ์ของผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการอาจใช้ความน่าจะเป็นในการเข้าจองช่องสัญญาณเป็นค่าอื่น ๆ ที่แตกต่างไปจากค่าที่เหมาะสมที่สุด ($p_{optimal}$) ซึ่งค่านี้ได้มาจากการคำนวณของเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ CFP หรืออาจเป็นการร้องขอเพื่อทำการจองช่องสัญญาณมากกว่าหนึ่งครั้งในแต่ละเฟรม นอกจากนั้นแล้วอาจมีการเลื่อนหรือประวิงเวลาในการเข้าจองช่องสัญญาณเพื่อลดโอกาสในการชนให้น้อยลง จากสถานการณ์เหล่านี้อาจเกิดขึ้นเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างรวมกันเพื่อให้ได้เปรียบเหนือผู้ใช้บริการทั่วไป ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอสถานการณ์การไม่ปฏิบัติตามกฎการจองที่แตกต่างกัน 3 สถานการณ์ คือ CPP (Changed Permission Probability) CPP+MT (Changed Permission Probability + Multi-Token) และ CPP+SRT (Changed Permission Probability + Shifted Reservation Time) โดยจะอธิบายระบบการทำงานของสถานการณ์การที่นำเสนอทั้งหมด ตลอดจนวิธีการวิเคราะห์สมรรถนะทางคณิตศาสตร์ในลำดับถัดไป

5.3.1 สถานการณ์แบบ CPP

จากหัวข้อ 5.2 ทำให้ทราบถึงกลไกการทำงานของเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ CFP ซึ่งผู้ใช้บริการทั่วไป (well-behaved) จะยังคงใช้ค่าความน่าจะเป็นการอนุญาตการจองช่องสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด ($p_{optimal}$) ถึงแม้ว่าจำนวนผู้ใช้บริการจะลดลงเมื่อเทียบกับจำนวนผู้ใช้บริการทั้งหมด ซึ่งได้มาจากการคำนวณตามสมการที่ (1) ถึง (4) ในขณะที่ความน่าจะเป็นของผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจอง (misbehaved) จะมีค่าแตกต่างจากค่าความน่าจะเป็นของผู้ใช้บริการทั่วไปโดยอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงให้มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าเพื่อให้ได้รับโอกาสที่จะประสบความสำเร็จในการจองมากขึ้น จากลักษณะการทำงานจึงเรียกสถานการณ์นี้ว่า Changed Permission Probability (CPP) โดยกลไกการเข้าจองช่องสัญญาณภายใต้สถานการณ์แบบ CPP สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 กลไกการเข้าจองช่องสัญญาณภายใต้สถานการณ์แบบ CPP

สำหรับการวิเคราะห์สมรรถนะทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาจำนวนความสำเร็จโดยเฉลี่ยในการจองของสถานการณ์แบบ CPP เมื่อพิจารณาระบบที่มีผู้ใช้บริการทั่วไป M_1 ราย และผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจอง M_2 ราย โดยมีจำนวนสล็อตการจอง N สล็อต เมื่อกำหนดให้ค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินเข้าจองของผู้ใช้บริการทั่วไปและผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองกับ p_1 และ p_2 ตามลำดับ ดังนั้นจำนวนความสำเร็จโดยเฉลี่ยในการจองช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้บริการทั่วไปและผู้ใช้บริการไม่ปฏิบัติตามกฎการจองในแต่เฟรมสามารถคำนวณได้จากสมการ (6) และ (7) ดังนี้

$$S_{CPP_1}[M_1, M_2, N, p_1, p_2] = \sum_{k_1=0}^{M_1} \sum_{k_2=0}^{M_2} k_1 P[k_1, k_2 \mid M_1, M_2, N, p_1, p_2] \tag{6}$$

และ

$$S_{CPP_2}[M_1, M_2, N, p_1, p_2] = \sum_{k_1=0}^{M_1} \sum_{k_2=0}^{M_2} k_2 P[k_1, k_2 \mid M_1, M_2, N, p_1, p_2] \tag{7}$$

เมื่อ $P[k_1, k_2 \mid M_1, M_2, N, p_1, p_2]$ คือความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้บริการทั่วไปจำนวน k_1 ราย และผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองจำนวน k_2 ราย ประสบความสำเร็จในการจอง โดยกำหนดให้ระบบมีผู้ใช้บริการทั่วไปและไม่ปฏิบัติตามกฎการจองจำนวน M_1 และ M_2 ตามลำดับ และมีจำนวนสล็อตการจอง N สล็อต โดยใช้ความน่าจะเป็นการอนุญาตการจองสำหรับผู้ใช้บริการทั่วไปและไม่ปฏิบัติตามกฎการจองเป็น p_1 และ p_2 ตามลำดับ

$$\begin{aligned} P[k_1, k_2 \mid M_1, M_2, N, p_1, p_2] &= P[k_1, k_2 \mid M_1, M_2, N] \\ &= b[M_1, 0, p_1] b[M_2, 0, p_2] P[k_1, k_2 \mid M_1, M_2, N-1] \\ &\quad + b[M_1, 1, p_1] b[M_2, 0, p_2] P[k_1 - 1, k_2 \mid M_1 - 1, M_2, N-1] \end{aligned}$$

$$+b[M_1,0,p_1]b[M_2,1,p_2]P[k_1,k_2-1\mid M_1,M_2-1,N-1]$$
$$+b[M_1,0,p_1]\sum_{i_2=2}^{M_2}b[M_2,i_2,p_2]P[k_1,k_2\mid M_1,M_2-i_2,N-1]$$
$$+b[M_2,0,p_2]\sum_{i_1=2}^{M_1}b[M_1,i_1,p_1]P[k_1,k_2\mid M_1-i_1,M_2,N-1]$$
$$+\sum_{i_1=1}^{M_1}\sum_{i_2=1}^{M_2}b[M_1,i_1,p_1]b[M_2,i_2,p_2]P[k_1,k_2\mid M_1-i_1,M_2-i_2,N-1] \quad (8)$$

และมีเงื่อนไขขอบเขตคือ

$$P[k_1,k_2\mid m_1,m_2,n]=\begin{cases}0, & k_1<0 \text{ or } k_2<0, m_1+m_2\geq 0, n\geq 0\\ 0, & k_1+k_2>n, m_1+m_2\geq 0, n\geq 0\\ 0, & k_1>m_1 \text{ or } k_2>m_2, m_1+m_2\geq 0, n\geq 0\\ 1, & k_1+k_2=0, m_1+m_2\geq 0, n=0\\ 1, & k_1+k_2=0, m_1+m_2=0, n\geq 0.\end{cases} \quad (9)$$

ในทำนองเดียวกันกับสูตรการวิเคราะห์สมรรถนะทางคณิตศาสตร์ของเทคนิค CFP ดังแสดงในสมการ (1) ถึง (5) ในรูปของรีเคอร์ซีพ อย่างไรก็ตามภาระในการคำนวณจะเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวน *M* และ *N* ด้วยเหตุนี้จึงได้เสนอรูปแบบการคำนวณใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อแก้ปัญหาเดียวกันนี้โดยยังคงให้ความถูกต้องเช่นเดิม ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาจำนวนความสำเร็จโดยเฉลี่ยในการจองสำหรับผู้ใช้บริการทั่วไปและผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองจากสมการ (10) และ (11) ตามลำดับดังนี้

$$S_{CPP_1}[M_1,M_2,N,p_1,p_2]=M_1\sum_{i=1}^{N}\left(p_1(1-p_1)^{i-1}\left(1-p_1(1-p_1)^{i-1}\right)^{M_1-1}\left(1-p_2(1-p_2)^{i-1}\right)^{M_2}\right) \quad (10)$$

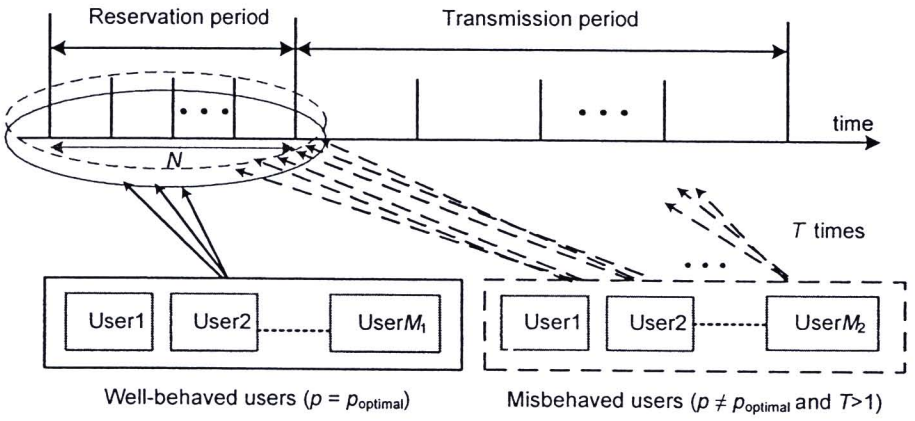
และ

$$S_{CPP_2}[M_1,M_2,N,p_1,p_2]=M_2\sum_{i=1}^{N}\left(p_2(1-p_2)^{i-1}\left(1-p_2(1-p_2)^{i-1}\right)^{M_2-1}\left(1-p_1(1-p_1)^{i-1}\right)^{M_1}\right) \quad (11)$$

5.3.2 สถานการณ์แบบ CPP+MT

สำหรับสถานการณ์แบบ CPP+MT ผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองไม่เพียงแค่เปลี่ยนแปลงค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินทำการจองเช่นเดียวกับสถานการณ์แบบ CPP แต่ยังพิจารณาถึงความพยายามในการเข้าจองช่องสัญญาณมากกว่าหนึ่งครั้งในแต่ละเฟรม ตามหลักในการจองโดยทั่วไปแล้ว การอนุญาตให้ผู้ใช้บริการมีโอกาสในการทำการจองมากขึ้นจะส่งผลให้ผู้ใช้รายนั้นมีโอกาสที่จะประสบความสำเร็จมากขึ้นตามไปด้วย จากกลไกการทำงานดังกล่าวจะเรียกสถานการณ์นี้ว่า Changed Permission Probability + Multi-Token (CPP+MT) เมื่อจำนวน

โทเค็นใช้แทนจำนวนครั้งในการอนุญาตให้สามารถทำการจองได้ในแต่ละเฟรม กลไกการเข้าจองช่องสัญญาณภายใต้สถานการณ์แบบ CPP+MT สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 กลไกการเข้าจองช่องสัญญาณภายใต้สถานการณ์แบบ CPP+MT

กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับสถานการณ์แบบ CPP+MT

M_1 แทนจำนวนผู้ใช้บริการที่ปฏิบัติตามกฎการจอง

M_2 แทนจำนวนโทเค็นของผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจอง

N แทนจำนวนสล็อตการจองช่องสัญญาณ

T_i แทนจำนวนโทเค็น (จำนวนครั้งในการอนุญาตให้สามารถทำการจองได้ในแต่ละเฟรม) สำหรับผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจอง i เมื่อ $i = 1, 2, \ldots, M_2$

R แทนจำนวนผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองที่เหลืออยู่ในระบบเมื่อพิจารณาในสล็อตการหนึ่ง

B_i แทนตัวเลขแบบไบนารี่ เริ่มต้น i จะถูกกำหนดให้มีค่าเป็น 0 ซึ่งหมายถึงยังทำการจองไม่สำเร็จ แต่เมื่อใดก็ตามที่สามารถทำการจองสำเร็จแล้วค่าของ i จะเปลี่ยนเป็น 1 ทันที การกระทำเช่นก็เพื่อป้องกันไม่ให้มีการนับความสำเร็จซ้ำสำหรับผู้ใช้รายหนึ่ง เนื่องจากผู้ใช้บริการแต่ละรายไม่ทราบผลการจอง ดังนั้นผู้ใช้จะทำการจองไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งไม่มีโทเค็นสำหรับทำการจองเหลืออยู่หรือสิ้นสุดสล็อตการจองในแต่ละเฟรม

$$R = M_2 - \text{the number of } T_i\text{'s that are zero.} \tag{12}$$

ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาจำนวนความสำเร็จโดยเฉลี่ยในการจองช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้บริการที่ปฏิบัติตามและไม่ปฏิบัติตามกฎการจองสามารถแสดงการคำนวณได้ดังในสมการ (13) และ (14)

$$S_{CPP+MT_1}[M_1,M_2,N,p_1,p_2]=\sum_{k_1=0}^{M_1}\sum_{k_2=0}^{M_2}k_1P[k_1,k_2\mid M_1,T_1,T_2,...,T_{M_2},B_1,B_2,...,B_{M_2},N] \quad (13)$$

และ

$$S_{CPP+MT_2}[M_1,M_2,N,p_1,p_2]=\sum_{k_1=0}^{M_1}\sum_{k_2=0}^{M_2}k_2P[k_1,k_2\mid M_1,T_1,T_2,...,T_{M_2},B_1,B_2,...,B_{M_2},N] \quad (14)$$

เมื่อ $P[k_1,k_2\mid M_1,T_1,T_2,...,T_{M_2},B_1,B_2,...,B_{M_2},N]$ คือความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้บริการทั่วไปจำนวน k_1 ราย และผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองจำนวน k_2 ราย ประสบความสำเร็จในการจอง โดยกำหนดให้ระบบมีผู้ใช้บริการทั่วไปและไม่ปฏิบัติตามกฎการจองจำนวน M_1 และ M_2 ตามลำดับ และมีจำนวนสล็อตการจอง N สล็อต ในขณะที่ผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจอง i โดยมีจำนวนโทเค็นเป็น T_i และมีสถานะของความสำเร็จในการจองเป็น B_i ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (15)

$$\begin{aligned}P[k_1,k_2\mid M_1,T_1,T_2,...,T_{M_2},B_1,B_2,...,B_{M_2},N]&\\ =b[M_1,0,p_1](1-p_2)^RP_A+b[M_1,1,p_1](1-p_2)^RP_B&\\ +b[M_1,0,p_1]p_2(1-p_2)^{R-1}P_C+\sum_{i_1=2}^{M_1}b[M_1,i_1,p_1](1-p_2)^RP_D&\\ +\sum_{i_2=2}^{R}b[M_1,0,p_1]p_2^{i_2}(1-p_2)^{R-i_2}G_{i_2}&\\ +\sum_{i_1=1}^{M_1}\sum_{i_2=1}^{R}b[M_1,i_1,p_1]p_2^{i_2}(1-p_2)^{R-i_2}H_{i_2}&\end{aligned} \quad (15)$$

เมื่อ

$$P_A=P[k_1,k_2\mid M_1,T_1,T_2,...,T_{M_2},B_1,B_2,...,B_{M_2},N-1]$$

$$P_B=P[k_1-1,k_2\mid M_1-1,T_1,T_2,...,T_{M_2},B_1,B_2,...,B_{M_2},N-1]$$

$$P_C=\sum_{\substack{i_2=1\\T_{i_2}\neq 0}}^{M_2}P[k_1,k_2-\delta(B_{i_2})\mid M_1,T_1,...,T_{i_2-1},T_{i_2}-1,T_{i_2+1},...,T_{M_2},B_1,...,B_{i_2-1},1,B_{i_2+1},...,B_{M_2},N-1]$$

$$\delta(x)=\begin{cases}1, & x=0 \quad ;\text{new success}\\ 0, & x\neq 0 \quad ;\text{repeated success}\end{cases}$$

$$P_D = P[k_1, k_2 \mid M_1 - i_1, T_1, ..., T_{M_2}, B_1, ..., B_{M_2}, N-1]$$

$$G_2 = \sum_{\substack{j<j' \\ T_j, T_{j'} \neq 0}} P[k_1, k_2 \mid M_1, T_1, ..., T_{j-1}, T_j - 1, T_{j+1}, ..., T_{j'-1}, T_{j'} - 1, T_{j'+1}, ..., T_{M_2}, B_1, ..., B_{M_2}, N-1]$$

$$G_i = \sum_{\substack{j_1<j_2<\cdots<j_i \\ T_{j_1}, T_{j_2}, ..., T_{j_i} \neq 0}} P[k_1, k_2 \mid M_1, T_1, ..., T_{j_1-1}, T_{j_1} - 1, T_{j_1+1}, ..., T_{j_2-1}, T_{j_2} - 1, T_{j_2+1}, ..., T_{j_i-1}, T_{j_i} - 1, T_{j_i+1}, ...,$$
$$T_{M_2}, B_1, ..., B_{M_2}, N-1], \quad 2 \le i \le R$$

$$H_1 = \sum_{j, T_j \neq 0} P[k_1, k_2 \mid m_1 - i_1, T_1, ..., T_{j-1}, T_j - 1, T_{j+1}, ..., T_{m_2}, B_1, ..., B_{m_2}, n-1]$$

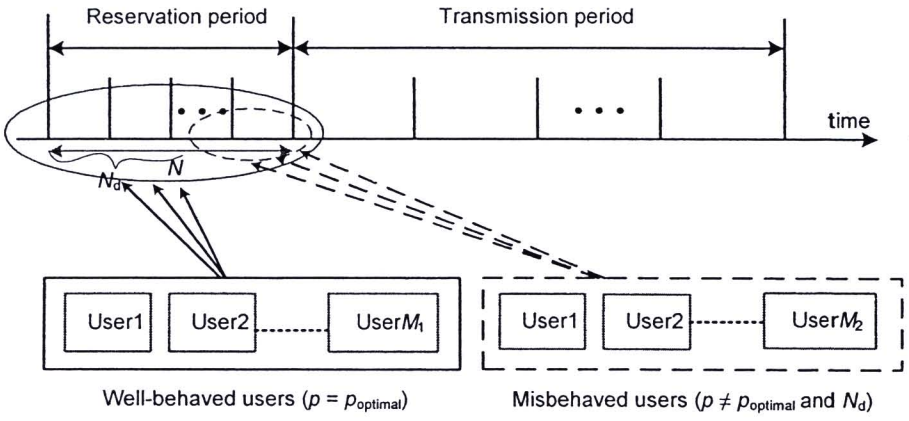
$$H_i = \sum_{\substack{j_1<j_2<\cdots<j_i \\ T_{j_1}, T_{j_2}, ..., T_{j_i} \neq 0}} P[k_1, k_2 \mid m_1 - i_1, T_1, ..., T_{j_1-1}, T_{j_1} - 1, T_{j_1+1}, ..., T_{j_2-1}, T_{j_2} - 1, T_{j_2+1}, ..., T_{j_i-1}, T_{j_i} - 1, T_{j_i+1}, ...,$$
$$T_{M_2}, B_1, ..., B_{M_2}, N-1], \quad 2 \le i \le R$$

และมีเงื่อนไขขอบเขตคือ

$$P[k_1, k_2 \mid m_1, T_1, ..., T_{m_2}, B_1, ..., B_{m_2}, n] = \begin{cases} 0, & k_1 < 0 \text{ or } k_2 < 0, m_1 + T_i \ge 0, B_i \ge 0, n \ge 0 \\ 0, & k_1 + k_2 > n, m_1 + T_i \ge 0, B_i \ge 0, n \ge 0 \\ 0, & k_1 > m_1 \text{ or } k_2 > m_2, m_1 + T_i \ge 0, B_i \ge 0, n \ge 0 \\ 1, & k_1 + k_2 = 0, m_1 + T_i = 0, B_i \ge 0, n \ge 0 \\ 1, & k_1 + k_2 = 0, m_1 + T_i \ge 0, B_i \ge 0, n = 0. \end{cases} \quad (16)$$

5.3.3 สถานการณ์แบบ CPP+SRT

กลไกการทำงานของสถานการณ์แบบ CPP+SRT ผู้ใช้บริการทั่วไปจะใช้ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจเข้าจองที่เหมาะสมที่สุด ($p_{optimal}$) โดยได้มาจากการคำนวณสำหรับเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ CFP ซึ่งทำให้ได้จำนวนความสำเร็จโดยเฉลี่ยในการจองช่องสัญญาณสูงสุดโดยมีค่าคงที่ตลอดในทุก ๆ สล็อตการจอง ในขณะที่ผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองนอกจากจะใช้ความน่าจะเป็นที่แตกต่างไปจากค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้รับโอกาสความสำเร็จในการจองสูงกว่าผู้ใช้บริการทั่วไปนอกจากนั้นแล้วยังกำหนดให้มีการประวิงเวลาในการเข้าจองช้ากว่าผู้ใช้บริการทั่วไปเพื่อจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสล็อตการจองแรกๆ ที่มักมีผู้ใช้บริการทำการจองเป็นจำนวนมากซึ่งจะช่วยลดโอกาสที่จะเกิดการชนลงอีกขั้นตอนหนึ่ง จากกลไกการทำงานที่กล่าวมานี้จึงเรียกสถานการณ์แบบนี้ว่า Changed Permission Probability + Shifted Reservation Time (CPP+SRT) โดยกลไกการเข้าจองช่องสัญญาณภายใต้สถานการณ์แบบ CPP+SRT สามารถพิจาณาได้จากรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 กลไกการเข้าจองช่องสัญญาณภายใต้สถานการณ์แบบ CPP+SRT

ดังนั้นจำนวนความสำเร็จโดยเฉลี่ยในการจองช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้บริการที่ปฏิบัติตามแส่ะไม่ปฏิบัติตามกฎการจองสามารถแสดงการคำนวณได้ดังในสมการ (17) และ (18)

$$S_{CPP+SRT_1}[M_1, M_2, l = N] = \sum_{k_1=0}^{M_1} \sum_{k_2=0}^{M_2} k_1 P[k_1, k_2 \mid M_1, M_2, l = N] \tag{17}$$

และ

$$S_{CPP+SRT_2}[M_1, M_2, l = N] = \sum_{k_1=0}^{M_1} \sum_{k_2=0}^{M_2} k_2 P[k_1, k_2 \mid M_1, M_2, l = N] \tag{18}$$

เมื่อ N แทนจำนวนสล็อตการจองทั้งหมด และ l แทนจำนวนสล็อตการจองที่ถูกประวิงเวลาในการจองสำหรับผู้ใช้ที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองนั่นหมายความว่าผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองจะสามารถทำการจองได้ในสล็อตที่ $l + 1$ โดยที่

$$P[k_1, k_2 \mid M_1, M_2, l] = \begin{cases} b[M_1, 0, p_1] P[k_1, k_2 \mid M_1, M_2, l-1] \\ +b[M_1, 1, p_1] P[k_1 - 1, k_2 \mid M_1 - 1, M_2, l-1] \\ +\sum_{i_1=2}^{M_1} b[M_1, i_1, p_1] P[k_1, k_2 \mid M_1 - i_1, M_2, l-1], \\ \qquad\qquad\qquad\qquad M_1 > 0,\ l > N - N_d \\ P[k_1, k_2 \mid M_1, M_2, l-1], \quad M_1 = 0,\ l > N - N_d \end{cases} \tag{19}$$

และ

$$\begin{aligned} P[k_1, k_2 \mid M_1, M_2, l] \ &= b[M_1, 0, p_1] b[M_2, 0, p_2] P[k_1, k_2 \mid M_1, M_2, l-1] \\ &\quad +b[M_1, 1, p_1] b[M_2, 0, p_2] P[k_1 - 1, k_2 \mid M_1 - 1, M_2, l-1] \\ &\quad +b[M_1, 0, p_1] b[M_2, 1, p_2] P[k_1, k_2 - 1 \mid M_1, M_2 - 1, l-1] \end{aligned}$$

$$+b[M_1,0,p_1]\sum_{i_2=2}^{M_2} b[M_2,i_2,p_2]P[k_1,k_2 \mid M_1,M_2-i_2,l-1]$$

$$+b[M_2,0,p_2]\sum_{i_1=2}^{M_1} b[M_1,i_1,p_1]P[k_1,k_2 \mid M_1-i_1,M_2,l-1]$$

$$+\sum_{i_1=1}^{M_1}\sum_{i_2=1}^{M_2} b[M_1,i_1,p_1]b[M_2,i_2,p_2]P[k_1,k_2 \mid M_1-i_1,M_2-i_2,l-1],$$

$$l \le N - N_d \qquad (20)$$

เมื่อ N_d คือจำนวนสล็อตการจองที่ถูกประวิงเวลาในการจองสำหรับผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามเงื่อนไขการจอง การคำนวณของ $P[k_1,k_2 \mid M_1,M_2,l]$ ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือสมการ (19) และ (20) โดยสมการ (19) จะเป็นการคำนวณสำหรับสถานการณ์ที่มีเฉพาะผู้ใช้บริการทั่วไปทำการจองเท่านั้น และสมการ (20) จะเป็นการคำนวณสำหรับสถานการณ์ที่มีทั้งผู้ใช้บริการทั่วไปและผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองพยายามทำการจองและมีเงื่อนไขขอบเขตคือ

$$P[k_1,k_2 \mid m_1,m_2,l] = \begin{cases} 0,\ k_1 < 0 \text{ or } k_2 < 0, m_1+m_2 \ge 0, l \ge 0 \\ 0,\ k_1+k_2 > n, m_1+m_2 \ge 0, l \ge 0 \\ 0,\ k_1 > m_1 \text{ or } k_2 > m_2, m_1+m_2 \ge 0, l \ge 0 \\ 1,\ k_1+k_2 = 0, m_1+m_2 \ge 0, l = 0 \\ 1,\ k_1+k_2 = 0, m_1+m_2 = 0, l \ge 0. \end{cases} \qquad (21)$$

ดังนั้นจะแสดงการวิเคราะห์สมรรถนะทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับปัญหาเดียวกันนี้โดยยังคงให้ความถูกต้องเช่นเดิม จำนวนความสำเร็จโดยเฉลี่ยในการจองช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้บริการที่ปฏิบัติตามและไม่ปฏิบัติตามกฎการจองสามารถแสดงการคำนวณได้ดังในสมการ (22) และ (23)

$$S_{CPP+SRT_1}[M_1,M_2,N,N_d,p_1,p_2] = M_1\left(\begin{array}{l} \sum_{i=1}^{N_d}\left(p_1(1-p_1)^{i-1}\left(1-p_1(1-p_1)^{i-1}\right)^{M_1-1}\right) \\ +\sum_{i=N_d+1}^{N}\left(p_1(1-p_1)^{i-1}\left(1-p_1(1-p_1)^{i-1}\right)^{M_1-1}\left(1-p_2(1-p_2)^{i-N_d}\right)^{M_2}\right) \end{array}\right) \qquad (22)$$

และ

$$S_{CPP+SRT_2}[M_1,M_2,N,N_d,p_1,p_2] = M_2\sum_{i=N_d+1}^{N}\left(p_2(1-p_2)^{i-N_d}\left(1-p_2(1-p_2)^{i-N_d}\right)^{M_2-1}\left(1-p_1(1-p_1)^{i-1}\right)^{M_1}\right) \qquad (23)$$

จากเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ได้นำเสนอมาทั้งหมดในข้างต้น จำนวนความสำเร็จโดยเฉลี่ยในการจองสำหรับผู้ใช้บริการทั้งหมดสามารถหาได้จากสมการ (24)

$$S_T = S_1 + S_2 \quad (24)$$

ในขณะที่ S_1 และ S_2 แทนจำนวนความสำเร็จโดยเฉลี่ยในการจองสำหรับผู้ใช้บริการที่ปฏิบัติตามและไม่ปฏิบัติตามกฎการจองตามลำดับ

5.4 สถานการณ์ที่มีผู้ใช้บริการไม่ปฏิบัติตามกฎการจองสำหรับเทคนิคการจองแบบ FPT

จากเนื้อหาในบทที่ 3 ได้อธิบายถึงกลไกการเข้าจองช่องสัญญาณของเทคนิค FPT และการกำหนดลำดับความสำคัญให้กับผู้ใช้บริการเพื่อให้สามารถรองรับคุณภาพการให้บริการที่แตกต่างกัน 2 คลาส ซึ่งเป็นเรื่องที่มีความสำคัญในระบบการให้บริการสำหรับการสื่อสารแบบไร้สาย นอกจากนั้นแล้วปัญหาหนึ่งที่มีความสำคัญเช่นเดียวกันซึ่งได้นำเสนอในส่วนนี้คือ สถานการณ์ที่มีผู้ใช้บริการไม่ปฏิบัติตามกฎการจอง (misbehaved) สำหรับเทคนิคการจองแบบ FPT เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบที่มีต่อความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการทั่วไป (well-behaved) และผู้ใช้บริการทั้งหมด โดยสถานการณ์ที่มีผู้ใช้บริการไม่ปฏิบัติตามกฎการจองที่สามารถเกิดขึ้นได้คือสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความน่าจะเป็นการอนุญาตส่งแพ็กเกตการจอง และสถานการณ์ที่มีการเลื่อนสล็อตในการเข้าจองช่องสัญญาณ โดยมีจุดประสงค์เพื่อต้องการให้ได้รับความสำเร็จในการจองเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามบางสถานการณ์ไม่สามารถที่จะพิจารณาในลักษณะเช่นนี้ได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงจำนวนโทเค็นหรือจำนวนครั้งในการอนุญาตให้สามารถทำการจองได้ เนื่องจากการไปจำกัดจำนวนโทเค็นให้กับผู้ใช้บริการกลุ่มหนึ่งจะเป็นการลดโอกาสในการเข้าจองซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถทำการจองในทุกสล็อต ดังนั้นจึงส่งผลให้ผู้ใช้บริการกลุ่มนี้มีจำนวนความสำเร็จโดยเฉลี่ยลดลงซึ่งผิดกับหลักการของผู้ใช้บริการไม่ปฏิบัติตามกฎการจองที่ต้องการได้เปรียบผู้ใช้บริการทั่วไป สำหรับวิธีการแบ่งแยกจำนวนสล็อตในการจองช่องสัญญาณให้กับผู้ใช้บริการในแต่ละกลุ่ม และวิธีการที่กำหนดให้ผู้ใช้บริการกลุ่มหนึ่งเข้าทำการจองก่อนจนกระทั่งผู้ใช้บริการทุกรายในกลุ่มนี้สามารถทำการจองได้สำเร็จแล้วจึงอนุญาตให้ผู้ใช้บริการอีกกลุ่มหนึ่งทำการจองต่อไปก็ไม่สามารถเกิดสถานการณ์ที่มีผู้ใช้บริการไม่ปฏิบัติตามกฎการจองได้ เนื่องจากผู้ใช้บริการทั้งสองกลุ่มไม่ได้ทำการแข่งขันเพื่อเข้าจองช่องสัญญาณร่วมกันซึ่งไม่สอดคล้องกับหลักการของสถานการณ์ที่มีผู้ใช้บริการไม่ปฏิบัติตามกฎการจอง

เมื่อพิจารณาความแตกต่างของกลไกการเข้าจองช่องสัญญาณระหว่างเทคนิคการจองแบบ FPT และ CFP คือเทคนิคการจองแบบ FPT จะอนุญาตให้ผู้ใช้บริการทำการจองต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสามารถทำการจองได้สำเร็จหรือไม่ก็สิ้นสุดช่วงการจอง ในขณะที่เทคนิคการจองแบบ CFP อนุญาตให้ทำการจองได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้นในแต่ละเฟรม อย่างไรก็ตามทั้งสองเทคนิคนี้จะนับความสำเร็จเพียงครั้งเดียวสำหรับผู้ใช้บริการแต่ละรายเมื่อทำการจองแต่ในละเฟรม

5.4.1 สถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความน่าจะเป็นการอนุญาตส่งแพ็กเกตการจอง

สถานการณ์ที่มีผู้ใช้บริการไม่ปฏิบัติตามกฎการจองเมื่อเกิดสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความน่าจะเป็นการอนุญาตส่งแพ็กเกตการจอง โดยกำหนดให้ผู้ใช้บริการทั่วไปจะยังคงใช้ค่าความน่าจะเป็นการอนุญาตการจองช่องสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด ($p_{optimal}$) ซึ่งทำให้ได้จำนวนความสำเร็จโดยเฉลี่ยในการจองช่องสัญญาณสูงสุดโดยมีค่าคงที่ตลอดในทุก ๆ สล็อตการจอง ในขณะที่ความน่าจะเป็นของผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองจะมีค่าแตกต่างจากค่าความน่าจะเป็นของผู้ใช้บริการทั่วไปโดยอาจจะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่า $p_{optimal}$ เพื่อให้ได้รับโอกาสที่จะประสบความสำเร็จในการจองมากขึ้น โดยกลไกการทำงานจะคล้ายกับสถานการณ์แบบ CPP ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.3

5.4.2 สถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความน่าจะเป็นการอนุญาตส่งแพ็กเกตการจองและจำนวนสล็อตการจองที่ถูกเลื่อน

สถานการณ์ที่มีผู้ใช้บริการไม่ปฏิบัติตามกฎการจองเมื่อเกิดสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความน่าจะเป็นและจำนวนสล็อตการจองที่ถูกเลื่อน กลไกการทำงานของสถานการณ์แบบนี้ผู้ใช้บริการทั่วไปจะใช้ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจเข้าจองที่เหมาะสมที่สุด ($p_{optimal}$) โดยได้มาจากการคำนวณสำหรับเทคนิการจองช่องสัญญาณแบบ FPT ซึ่งทำให้ได้จำนวนความสำเร็จโดยเฉลี่ยในการจองช่องสัญญาณสูงสุด โดยมีค่าคงที่ตลอดในทุก ๆ สล็อตการจอง ในขณะที่ผู้ใช้บริการที่ไม่ปฏิบัติตามกฎการจองนอกจากจะใช้ความน่าจะเป็นที่แตกต่างไปจากค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้รับโอกาสความสำเร็จในการจองสูงกว่าผู้ใช้บริการทั่วไป นอกจากนั้นแล้วยังกำหนดให้มีการประวิงเวลาในการเข้าจองโดยการกำหนดจำนวนสล็อตการจองที่ถูกเลื่อนเพื่อลดโอกาสในการชนกันของแพ็กเกตการจองซึ่งมักเกิดขึ้นในสล็อตการจองแรกๆ เนื่องจากมีผู้ใช้บริการทำการจองเป็นจำนวนมาก โดยกลไกการทำงานจะคล้ายกับสถานการณ์แบบ CPP+SRT ซึ่งสามารถพิจาณาได้จากรูปที่ 5.5