

การออกแบบสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่

ดูอัลแบนด์

สัญญา พินัยกุล.

ปัจจุบันออกแบบสายอากาศไว้ในตัวเครื่องโทรศัพท์เป็นสิ่งที่ยังจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะมีการแข่งขันด้านรูปทรงของโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อให้ตรงความต้องการของผู้บริโภคคือ สวยงาม ขนาดบาง กะทัดรัด ส่งผลให้การออกแบบสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ต้องใช้เทคนิคพิเศษแตกต่างจากการออกแบบสายอากาศชนิดอื่น เพื่อให้ได้สายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีประสิทธิภาพ ภายในรูปร่างของโทรศัพท์เคลื่อนที่จำกัด

โทรศัพท์เคลื่อนที่ได้มีการพัฒนาไปอย่างมากจากอดีตถึงปัจจุบันโดยเฉพาะอย่างยิ่งสายอากาศของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ในยุคแรกสายอากาศของโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นสายอากาศฮาร์ฟเวฟ (Half-Wavelength Antenna) ที่ต้องบ่อนสัญญาณหรือพีดสายอากาศด้วยสายนำสัญญาณโคแอกเซียล (Coaxial-fed) ซึ่งสายอากาศแบบนี้มีข้อเสียตรงที่มีขนาดใหญ่ เทอะทะ ต่อมาได้เปลี่ยนมาใช้สายอากาศควอเตอร์เวฟ (Quarter-Wavelength Antenna) โดยการใช้ตัวถังเป็นเคาเตอร์โพซ (ดูรายละเอียดในกรอบ “คำศัพท์เทคนิคของสายอากาศ”) ทำให้สามารถลดความยาวของสายอากาศลงได้กึ่งหนึ่งโดยยังคงมีคุณสมบัติของสายอากาศใกล้เคียงกับสายอากาศฮาร์ฟเวฟ การสร้างสายอากาศควอเตอร์เวฟที่ยึด-หดเก็บไว้ในตัวเครื่องได้ทำให้ได้สายอากาศที่มีขนาดเล็กลงไม่เกะกะเวลาพกพา แต่จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อยึดสายอากาศออกจนยาวที่สุด ในปัจจุบันได้พัฒนาเป็นการออกแบบสายอากาศให้

เป็นแบบชนิดซ่อนไว้ภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อให้ตัวเครื่องมีขนาดเล็กเพรียว สวยงามตามความต้องการของผู้บริโภค

อย่างไรก็ตามการสร้างสายอากาศไว้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่จะทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศต่ำลง แต่เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการขยายเครือข่ายสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์เป็นอย่างมาก และเพิ่มระดับความแรงของสัญญาณสูงขึ้นจากอดีตเพื่อไว้ 2-3 dB เพื่อชดเชยให้กับการออกแบบสายอากาศที่มีคุณภาพทางการรับสัญญาณได้ลดลง 2-3 dB เพื่อให้มีรูปทรงของโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งมีลักษณะ กะทัดรัด เพรียว สวยงาม โดยไม่เป็นปัญหาในการใช้งานสื่อสาร ดังนั้นหัวใจของการออกแบบสายอากาศไว้ในตัวเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่คือ เก็บสายอากาศไว้ในตัวเครื่องรูปแบบของโทรศัพท์ที่สวยงาม แต่มีประสิทธิภาพในการรับสัญญาณในระดับที่ยอมรับได้

ยิ่งไปกว่านั้นในปัจจุบันโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีความจำเป็นต้องใช้งานในความ



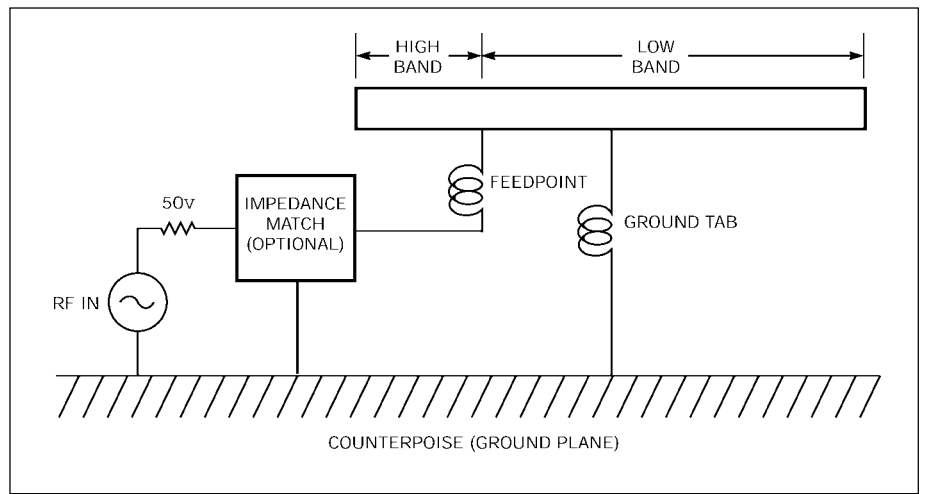
ถี่หลายแบนด์ ซึ่งความต้องการนี้ขัดแย้งกับหลักการพื้นฐานของการออกแบบสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ดูรายละเอียดจากกรอบ “องค์ประกอบที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศภายใน”) ทำให้การออกแบบสายอากาศเก็บไว้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งสามารถใช้งานได้หลายๆ แบนด์มีความซับซ้อนมากขึ้นกว่าสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่แบนด์เดียว (คำว่า “อุปกรณ์” ที่ใช้ในบทความนี้หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับความถี่สูงซึ่งอาจจะเป็น เส้นบนแผ่นปริ้นท์ หรือ อุปกรณ์เป็นชิ้นๆ เช่น ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน ฯลฯ ตามความเข้าใจปกติก็ได้)

แบบจำลองของสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่

แบบจำลองของสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ดูอัลแบนด์ที่มีการจัดวางส่วนประกอบต่างๆ ภายในดังรูปที่ 1 จะช่วยให้เข้าใจโครงสร้างสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น จากรูปจะพบว่าแบ่งสายอากาศแบบดูอัลแบนด์ที่อยู่ในโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็น 2 ส่วน คือ ท่อนแบนด์ต่ำ และท่อนแบนด์สูง

ท่อนแบนด์ต่ำจะมีความยาวมากกว่าท่อนแบนด์สูง และเรโซเนนซ์ที่มีความถี่ต่ำกว่าท่อนแบนด์สูง หรือโอเกนโหมดที่หนึ่ง โดยที่ความยาวทางกายภาพของท่อนแบนด์ต่ำจะใกล้เคียงกับเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น ซึ่งสามารถปรับความยาวเล็กน้อยเพื่อชดเชยผลกระทบจากไดโพลตริคเฉพะที่ และตัวเก็บประจุแฝงที่ต่อระหว่างท่อนแบนด์สูงกับกราวนด์ ท่อนแบนด์ต่ำนี้โดยปกติจะมีค่าอิมพีแดนซ์มากกว่าท่อนแบนด์สูง เมื่อวัดคร่อมแถบเหนียวนำที่ต่อลงกราวนด์เดียวกัน

ท่อนแบนด์สูงจะเรโซเนนซ์ที่มีความถี่สูงกว่าท่อนแบนด์ต่ำ และโดยทั่วไปจะมีความยาวที่สั้นกว่าท่อนแบนด์ต่ำ 3 เท่า (โอเกนโหมดที่สาม) จากรูปที่ 1 จะพบ



รูปที่ 1 : แบบจำลองอย่างง่ายของสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ดูอัลแบนด์ที่แสดงการจัดวางอุปกรณ์และส่วนที่แยกจากกันของท่อนแบนด์ต่ำและท่อนแบนด์สูง

ว่า โหลดที่ต่อกับอิมพีแดนซ์ของท่อนแบนด์สูงคือ ท่อนแบนด์ต่ำขนาดเท่ากับตัวเก็บประจุแฝงที่ต่อคร่อมแท็ปกราวนด์ ผนวกความถี่สำหรับท่อนแบนด์สูงนี้ ค่าอิมพีแดนซ์ของท่อนแบนด์ต่ำจะมีค่ามากกว่าท่อนแบนด์สูงมากจนไม่ค่อยจะมีผลกระทบ

ผลจากการวางแท็ปเปิด (จุดป้อนสัญญาณ) ไว่ใกล้กับแท็ปกราวนด์จะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กคล้องกัน จึงสามารถมองเสมือนเป็นหม้อแปลงได้ และสามารถนำไปใช้ในการแมทซิ่งให้อิมพีแดนซ์สายอากาศเดิมที่มีค่าประมาณ 10 โอห์มหรือน้อยกว่านั้นให้เป็น 50 โอห์มได้โดยไม่ต้องเพิ่มวงจรแมทซิ่ง แต่ต้องคำนวณระยะทางและความยาวของจุดป้อนสัญญาณให้แม่นยำ วิธีการแมทซิ่งนี้เป็นเทคนิคแบบดั้งเดิมที่เรียกว่า แกมมาแมท แม้ว่าจะมีผู้ออกแบบสายอากาศภายในหลายลักษณะต่างกันแต่โดยมากมักจะกำหนดจุดป้อนสัญญาณให้อยู่ที่ส่วนของท่อนแบนด์สูง ในการออกแบบหม้อแปลงเสมือนเพื่อแมทซิ่งสายอากาศให้มีค่า 50 โอห์มที่จุดป้อนสัญญาณมีความยุ่งยาก เนื่องจากการปรับค่าของความยาวและระยะทางของจุดป้อนสัญญาณจะมีผลต่อ

อุปกรณ์แฝงที่ซ่อนอยู่ในส่วนอื่นที่ไม่ได้เปลี่ยนแปลง ทำให้การปรับค่าของระยะใดๆ ของส่วนหม้อแปลงนี้จะมีผลกระทบต่อสายอากาศโดยรวมทั้งหมด ด้วยเหตุนี้ผู้ออกแบบต้องทดลองระยะทางและความยาวหลายๆ ค่า เพื่อที่จะแมทซิ่งอิมพีแดนซ์สายอากาศให้มีค่าได้ใกล้เคียง 50 โอห์ม ทั้งท่อนแบนด์สูงและท่อนแบนด์ต่ำ ในรูปทรงของโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งมีขนาดจำกัด จากผลการทดลองพบว่าต้องใช้ปริมาตรอย่างน้อย 7 ลูกบาศก์เซนติเมตรเพื่อบรรจุสายอากาศไว้ภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ดูอัลแบนด์ และต้องการความสูงประมาณ 7 มิลลิเมตรจากระนาบกราวนด์

ในบางกรณีจะมีการออกแบบวงจรแมทซิ่งภายนอกเพิ่มเติม เพื่อให้สมบัติทางไฟฟ้าของท่อนแบนด์ต่ำมีแบนด์ที่กว้างขึ้น (บรอดแบนด์) โดยที่วงจรแมทซิ่งนี้จะออกแบบให้เป็นวงจรผ่านความถี่สูงเพื่อที่วงจรที่สร้างเพิ่มเข้าไปจะได้มองเห็นท่อนแบนด์สูง ผลที่ได้จากการเพิ่มวงจรแมทซิ่งคือทำให้ท่อนแบนด์ต่ำจะสามารถทำงาน ณ ที่ความถี่ต่ำ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า การเพิ่มวงจรแมทซิ่งภายนอกมีผลต่อระบบสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยรวมสามารถรับ



สัญญาณที่แบนด์ต่ำได้กว้างขึ้น แต่ยังสามารถรับสัญญาณที่แบนด์สูงได้เหมือนเดิม

หากต้องการให้สายอากาศมีขอบแบนด์ที่คมจะต้องการเพิ่มโพลให้กับสายอากาศ ในปัจจุบันสามารถสร้างสายอากาศภายในชนิด 4 โพลโดยการเพิ่มอุปกรณ์แฝงในส่วนของสายอากาศภายในได้ แต่ต้องเพิ่มปริมาตรสำหรับสร้างอุปกรณ์เพิ่มเติมและเสียต้นทุนบำรุงรักษาระบบการผลิตให้มีความแม่นยำสูงกว่ามาก เมื่อเทียบกับการบำรุงรักษาระบบการผลิตสายอากาศภายใน 2 โพล ดังนั้นหากจะสร้างระบบสายอากาศภายใน 4 โพล ควรเลือกออกแบบสายอากาศ 2 โพลแล้วเพิ่มอีก 2 โพลในส่วนของวงจรแมทซึ่งจะเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่า

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นสองข้อหลักคือ ข้อแรก ในการออกแบบสายอากาศภายในต้องเสียปริมาตรของโทรศัพท์ไปค่อนข้างสูงให้กับอุปกรณ์แฝงเพื่อแลกกับการแมทซึ่งอิมพีแดนซ์เพื่อให้สายอากาศภายในมีประสิทธิภาพ ข้อสอง การกระจายของกระแสบนตัวขับ (driven)

และอุปกรณ์แฝงมักจะมีการแปรค่าสูงมาก ตลอดช่วงของแบนด์วิดท์ของสายอากาศภายในที่สร้างเสร็จแล้ว ค่ากระแสบนตัวขับและอุปกรณ์แฝงจะมีทั้งที่เสริมและหักล้างกันอยู่สลับไปมาตลอดเวลา ทำให้การตรวจสอบโครงสร้างของสายอากาศภายใน 4 โพลด้วยเน็ตเวิร์คอะนาไลเซอร์ กลับจะมองเห็นเป็นลักษณะบรอดแบนด์ เพื่อแก้ไขผลกระทบนี้จึงต้องทดสอบแกนของสายอากาศโดยการกวาดความถี่ไปมาบนอุปกรณ์ทดสอบชิ้นเดียวกัน เพื่อหาความถี่ที่แกนของสายอากาศตกลงอย่างเฉียบคม

กฎ 4 ข้อสำหรับการออกแบบสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ให้มีประสิทธิภาพในการออกแบบสูงสุด

การออกแบบสายอากาศภายในไม่ว่าจะอย่างไรก็ตาม คุณสมบัติของสายอากาศที่สร้างขึ้นจะไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้อย่างแม่นยำกล่าวคือ การออกแบบอย่างง่ายจะได้สายอากาศภายในมีประสิทธิภาพในการออกแบบต่ำกว่า 50% บนอวกาศว่างและไม่เกิน 70% ของประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้รับจากการออกแบบ ใน

ขณะที่การออกแบบสายอากาศยึดหดได้มีประสิทธิภาพการออกแบบสูงกว่า 90% แต่กฎ 4 ข้อ ต่อไปนี้จะช่วยให้ผู้ออกแบบสายอากาศภายในโทรศัพท์มือถือประสบความสำเร็จในการออกแบบสายอากาศภายในสูงสุด

1. ทำให้อุปกรณ์แฝงมีค่าต่ำที่สุด

แบนด์วิดท์สูงสุดของสายอากาศจะเกิดขึ้นเมื่อ กรุปดีเลย์มีค่าต่ำสุด จะเหมือนกับวงจรเรโซแนนท์กล่าวคือ หากต้องการให้มีกรุปดีเลย์ต่ำสุดจะต้องลดอุปกรณ์แฝงในวงจรเหลือน้อยและมีค่าต่ำที่สุด ด้วยการออกแบบให้ตัวเหนี่ยวนำ-แฝงที่เกิดจากจุดบ่อนสัญญาณและแท็ปกราวนด์ให้มีค่าต่ำสุด นั่นคือการออกแบบให้จุดบ่อนสัญญาณและแท็ปกราวนด์ห่างกันมากที่สุด และสั้นที่สุดเท่าที่ทำได้ แต่ในทางกลับกันการลดตัวเก็บประจุแฝงที่เกิดขึ้นที่ปลายเปิดของอุปกรณ์ทุกชิ้นต้องออกแบบให้ปลายเปิดที่มีค่าของแรงดันสูงสุดและอยู่ห่างจากเคาเตอร์โพซ (ระนาบกราวนด์) มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ การใช้ลายวงจรบนแผ่นปริ้นซ์แบบซิกแซก-

คำศัพท์เทคนิคของสายอากาศ

การแมทชสายอากาศ (Antenna Match) เป็นสถานะการณ์ที่อิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศมีค่าเท่ากับคอมเพลกคองจูเกตของอิมพีแดนซ์สายส่งที่พิดเข้าสายอากาศ

แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ช่วงความถี่ที่สายอากาศทำงานได้ โดยปกติจะเจาะจงว่าเป็นช่วงความถี่ของสายอากาศทั้งหมดถูกแมทชเข้ากับระบบ

บรอดแบนด์ (Broadband) ช่วงของความถี่ที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้กว้างขึ้น

เคาเตอร์โพซ (Counterpoise) สายอากาศอีกครึ่งหนึ่งที่ไม่ได้รับการกระตุ้น ส่วนมากจะเป็นระนาบกราวนด์กึ่งอนันต์ ในกรณีของโทรศัพท์เซลลูลาร์ปัจจุบันจะบรรจุอยู่ในโทรศัพท์เคลื่อนที่

ไดอิเล็กตริก (Dielectric) วัสดุที่มีสมบัติไม่นำไฟฟ้า

ไดโพล (Dipole) สายอากาศแบบสมมาตรที่แขนโลหะยื่นออกไปสองข้าง มีความยาวของแขนทั้งสองรวมกันเท่ากับครึ่งความยาวคลื่น และมีจุดบ่อนสัญญาณอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างแขนทั้งสอง

ไอเกนโหมด (Eigenmode) ตำแหน่งของจุดบนโครงสร้างทางกายภาพที่กระแสและแรงดันมีเฟสตรงกัน

เกน (Gain) เป็นการรวมการวัดประสิทธิภาพของสายอากาศและการวัดกำลังงานที่ส่งออกไปในทิศทางที่กำหนด ในทางคณิตศาสตร์เกนจะมีค่าเท่ากับ 4π คูณกับอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของการพลังงานที่ส่งออกไปในทิศทางที่กำหนดกับกำลังงานทั้งหมดที่สายอากาศได้รับจากขั้วของสายอากาศ

แกมมาแมทช (Gamma match) เป็นวงจรอย่างง่ายที่ใช้แมทชอิมพีแดนซ์สายอากาศที่จุดบ่อนสัญญาณ



ไปมา (Meander) เพื่อช่วยให้ความยาวทางไฟฟ้ามากขึ้นจะส่งผลเสียต่อระบบในเรื่องของค่าความจุแฝงที่สูงขึ้น

เพื่อให้ได้อิมพีแดนซ์สายอากาศภายในมีค่า 50 โอห์มที่จุดป้อนสัญญาณโดยมีอุปกรณ์แฝงต่ำสุดจึงต้องใช้เกมมาแมทซ์ในการแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้มีค่าสูงขึ้นเป็น 50 โอห์มที่จุดป้อนสัญญาณเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุด

ในการออกแบบเพื่อลดตัวเหนี่ยวนำแฝงจะมีปัญหาวิกฤตอยู่ที่การออกแบบแท็ปกราวนด์ โดยเกิดจากอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าต่ำมาก เมื่อต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของแท็ปกราวนด์แม้ว่าจะมีค่าต่ำ แต่เมื่อรวมผลการแปลงอิมพีแดนซ์จากหม้อแปลงในเกมมาแมทซ์จะลดประสิทธิภาพสายอากาศลงมาก (กำลังของสัญญาณไปตกอยู่ที่แท็ปกราวนด์ซึ่งไม่ถูกส่งออกไปภายนอก) นั่นคือต้องออกแบบให้อิมพีแดนซ์ของแท็ปกราวนด์ต่ำกว่า 1 โอห์มจึงจะอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

ดังนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่าง เป็นที่สุดในการออกแบบสายอากาศในทุกขั้นตอนคือ การให้ความสำคัญกับการจัดวางตำแหน่งของตัวเหนี่ยวนำแฝงในวงจรอิมพีแดนซ์ต่ำ และการจัดวางตำแหน่งของตัวเก็บประจุแฝงในวงจรอิมพีแดนซ์สูง นอกจากนี้ยังมีวิธีลดตัวเก็บประจุแฝงโดยการนำเอาปลายเปิดที่มีค่าแรงดันสูงออกห่างจากระนาบกราวนด์ให้มากที่สุดเท่าที่ทำได้ และลดช่องเปิดบริเวณที่มีไดโพลเลกทริกให้เหลือน้อยที่สุด เพราะการสูญเสียเนื่องจากไดโพลเลกทริกจะมีผลกระทบต่อสายอากาศมากที่สุดโดยเฉพาะในส่วนปลายสายอากาศที่มีแรงดันสูง (ถ้ามีไดโพลเลกทริก อยู่ในสายอากาศ) แต่จะสามารถละลายได้หากอยู่ที่ปลายของด้านที่ต่ออยู่กับกราวนด์ ด้วยเหตุนี้การใช้ไดโพลเลกทริกเพื่อลดความยาวทางกายภาพของไอเกนโหมดที่หนึ่งจะมีประสิทธิภาพเฉพาะที่ปลายเปิดด้านที่มีแรงดันสูงของสายอากาศเท่านั้น

การค้นคว้าหาวิธีมากมายเพื่อลดขนาดของอุปกรณ์ทุกอย่างที่จะนำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ เช่นการรวมอุปกรณ์เป็นกลุ่ม หรือการจัดระดับวงจรให้ไม่สม่ำเสมอ และในปัจจุบันพบเทคนิค 2 วิธีที่ใช้ลดขนาดอุปกรณ์ คือ การมีนเดียร์อุปกรณ์และการเพิ่มไดโพลเลกทริกเข้าไประหว่างอุปกรณ์และเคาเตอร์โพซเพื่อลดขนาดทางกายภาพของไอเกนโหมด

การมีนเดียร์อุปกรณ์ต้องออกแบบให้ปลายที่มีแรงดันสูงสุดและต่ำสุดอยู่ห่างกันมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ และใช้การมีนเดียร์ให้น้อยที่สุด เพราะการมีนเดียร์แม้ว่าจะช่วยลดขนาดทางกายภาพของอุปกรณ์ลง แต่จะสร้างอุปกรณ์แฝงที่เราไม่ต้องการขึ้นมาด้วยเพราะเกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ที่อยู่ใกล้กันหลังจากการมีนเดียร์

2. ใช้ไดโพลเลกทริกในการออกแบบให้น้อยที่สุด

การเพิ่มไดโพลเลกทริกเข้าไปในการทำสายอากาศจะช่วยลดขนาดอุปกรณ์แต่จะมีผลกระทบที่เป็นลบต่อสมรรถนะของสายอากาศเสมอ การสูญเสียในไดโพลเลกทริกจะลดปริมาณของกำลังสัญญาณที่สามารถส่งออกไปได้เสมือนกับการเติมตัวต้านทานลงไปที่จุดป้อนสัญญาณ

สายอากาศขนาดเล็กส่วนใหญ่จะมีคาร์เรียดแดนซ์สูงและมีค่าของความต้านทานของการแผ่กระจายคลื่นมีค่าต่ำ ดังนั้นเมื่อจูนสายอากาศให้ทำงานที่จุดเรโซแนนซ์ จะสามารถหาค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) (Quality Factor) ของสายอากาศซึ่งนิยามมาจาก

$$Q = \frac{3\text{-dB BANDWIDTH}}{\text{CENTER FREQUENCY}}$$

และมีความสัมพันธ์กับอุปกรณ์ในสายอากาศ

$$1/Q = 1/Q_{\text{การแผ่กระจายคลื่น}} + 1/Q_{\text{ค่าความสูญเสียภายในสายอากาศ}}$$

จากสมการข้างบนแสดงให้เห็นว่าตัวประกอบคุณภาพของสายอากาศเกิดจาก 2 แหล่งสูญเสียที่อิสระต่อกันคือตัวต้านทานของส่วนแผ่กระจายคลื่นและการสูญเสียภายในสายอากาศ ถ้าออกแบบสายอากาศภายในได้เหมาะสม ค่าของการสูญเสียทั้งสองแหล่งจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อขนาดของสายอากาศเล็กลง และเพิ่มไดโพลเลกทริกลงไปในสายอากาศจะทำให้ตัวประกอบคุณภาพของค่าความสูญเสียภายในกลายเป็นค่าเด่นและประมาณเท่ากับตัวประกอบคุณภาพของสายอากาศ

เพื่อแสดงรายละเอียดของการกำเนิดตัวประกอบคุณภาพของสายอากาศให้ชัดเจนจึงนำผลงานวิจัยของ แอล เจ ชู, เฮซ เอ วิลเลอร์ และ อาร์ เอฟ แฮร์ลิงตันมาอธิบาย เริ่มแรก ชู ได้ตีพิมพ์บทความเกี่ยวกับการหาค่าตัวประกอบคุณภาพสูงสุดของสายอากาศขนาดเล็กแบบสมมาตรในอุดมคติ (สายอากาศที่ไม่มีการสูญเสีย) ในปี 1948 ชู หาขีดจำกัดนี้จากการกระจายเศษส่วนย่อยของเวฟอิมพีแดนซ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในทรงกลมปิด ซึ่งจะเกิดขึ้นจริงภายนอกทรงกลมขนาดเล็กที่สุดที่ล้อมสายอากาศ จากผลงานนี้ของ ชู จึงสามารถยอมรับการแทนสายอากาศขนาดเล็กด้วยวงจรสมมูลแลตเตอร์เน็ตเวิร์ค 2 โพล และจากวงจรสมมูลนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์สายอากาศขนาดเล็กด้วยวิธีวิเคราะห์แบบวงจรทั่วไปได้ อันนำไปสู่การหาค่าตัวประกอบคุณภาพของสายอากาศขนาดเล็กจากวงจรสมมูลได้ ต่อมา แฮร์ลิงตัน และ วิลเลอร์ ได้นำงานของซูมาวิจัยเพิ่มเติมรายละเอียดมากขึ้น

จากข้อจำกัดของ ชู-แฮร์ลิงตันสามารถหาความสัมพันธ์แบบเจาะจงของสายอากาศขนาดเล็กแล้วนิยามแบนด์วิดท์สูงสุดที่เป็นไปได้ของสายอากาศ 2 โพลขนาดเล็ก โดยแบนด์วิดท์ของสายอากาศ-



ที่เติมไดอิเล็กตริกเพื่อลดความยาวทางกายภาพไอเกนโหมดของท่อนแบนด์ต่ำ และท่อนแบนด์สูงจะมีค่าไม่เกินข้อจำกัดของ ซู-แฮร์ลิงตัน เนื่องจากการสูญเสียในไดอิเล็กตริกเป็นส่วนที่ไม่ส่งกำลังงานออกไปภายนอกจะกลายเป็นค่าเด่นซึ่งเพิ่มขึ้นมากกว่าสายอากาศอุดมคติขนาดเล็กที่ไม่เติมไดอิเล็กตริกในแบบจำลองของ ซู-แฮร์ลิงตัน โดยพื้นฐานแล้วสายอากาศที่มีช่องเปิดขนาดเล็กทุกแบบที่มีประสิทธิภาพเท่ากันจะมีเกนของสายอากาศเท่ากันด้วย ดังนั้นในสายอากาศที่เติมไดอิเล็กตริกซึ่งเพิ่มความสูญเสียในสายอากาศย่อมทำให้เกนของสายอากาศนี้มีค่าลดลง

สมการของ ซู-แฮร์ลิงตัน ที่ใช้หาตัวประกอบคุณภาพซึ่งเป็นพจน์สุดท้ายของความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q_{\text{การแผ่กระจายคลื่น}} = (1 + 2(ka)^2) / ((ka)^3 (1 + (ka)^2))$$

k คือ เลขคลื่น (wave number)

a คือ รัศมีของทรงกลมที่ล้อมรอบสายอากาศ

สมการนี้หาได้จากการพิจารณาทรงกลมขนาดเล็กที่สุดที่ปิดล้อมสายอากาศทดสอบ แล้วคำนวณอัตราส่วนระหว่างสนามที่แผ่พลังงานออก (สนามที่ส่งถึงสายอากาศรับ) ไป กับสนามรีแอกทีฟ (สนามส่วนที่จางหายไปหมดก่อนที่จะไปถึงสายอากาศรับ) โดยพิจารณาให้สายอากาศมีสมบัติเป็นอุดมคติ จากนั้นแปลงค่าของอัตราส่วนนี้มาเป็นวงจรสมมูลแลตเตอร์เน็ตเวิร์ค 2 โพลจากวงจรสมมูลสามารถหาค่าตัวประกอบคุณภาพของสายอากาศ (Q) ได้ ซึ่งไม่มีสายอากาศจริงขนาดเล็กชนิดใดเลยที่มีค่าตัวประกอบคุณภาพของสายอากาศสูงกว่าขีดจำกัดนี้ เพราะในสายอากาศจริงขนาดเล็กจะมีค่าของความสูญเสียในอากาศเสมอ

ในกรณีที่ ka มีค่าน้อยมากสามารถลดรูปของสมการเป็น

$$Q_{\text{การแผ่กระจายคลื่น}} \gg 1 / (ka)^3, \quad ka \ll 1$$

หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สายอากาศขนาดเล็กจะมีแบนด์วิดท์แปรผันตรงกับปริมาตรของความยาวคลื่น

($l = 2p/k$) จากมุมมองของข้อความข้างบนคือ ถ้าการลดขนาดของสายอากาศขนาดเล็กลงแล้วแบนด์วิดท์ไม่แปรผันตรงกับปริมาตรของความยาวคลื่น แสดงว่าไม่ต้องมีผลของการสูญเสียภายในสายอากาศ ซึ่งเป็นตัวต้านทานที่ไม่แผ่กระจายคลื่นออกมาป้อนอยู่ในแบนด์วิดท์นั้น

โดยปกติแล้วผู้ออกแบบสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่จะมองสายอากาศเป็นวงจรไฟฟ้าอย่างง่ายที่มีโครงสร้าง 2 โพลและสมมติให้ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) สามารถนำไปใช้หาแบนด์วิดท์ของสายอากาศได้อย่างถูกต้อง แต่จาก

ทฤษฎีของฟิลเตอร์จะแสดงให้เห็นว่ายิ่งฟิลเตอร์มีจำนวนโพลมากขึ้นและมีจำนวนอุปกรณ์มากขึ้นจะให้แบนด์วิดท์ที่กว้างขึ้น ยกตัวอย่างเช่นฟิลเตอร์เซพบีเซพที่มี 4 โพลมีแบนด์วิดท์ที่มากกว่าฟิลเตอร์เซพบีเซพที่มี 2 โพล ในความเป็นจริงแล้วสามารถออกแบบโครงสร้างที่มี 4 โพลหรือมากกว่านั้นได้โดยการสร้างอุปกรณ์แฝงในสายอากาศหรือเพิ่มจำนวนโพลที่ส่วนของวงจรเมทซึ่ง แต่ทางเลือกที่ดีที่สุดคือ การสร้างโพลเพิ่มที่วงจรเมทซึ่งและควรหลีกเลี่ยงการใช้อุปกรณ์แฝงในสายอากาศ

กฎข้อที่ 3 เพิ่มพื้นที่ผิวของอุปกรณ์ให้กว้างที่สุด

เนื่องจากสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นการวางตัวแบบแพลนนา (วางตัวไปตามพื้นผิว) ซึ่งไม่สามารถใช้เคาเตอร์โพซเป็นแบบอุดมคติ และขีดจำกัดของแบบจำลอง

องค์ประกอบที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศภายใน

- ขนาดของโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งกำหนดไว้
- วัสดุที่ใช้สร้างโทรศัพท์เคลื่อนที่
- วัสดุสำหรับสร้างสายอากาศ
- ตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณ
- ขนาดของอุปกรณ์อื่นๆ
- พื้นที่ผิวและปริมาตรที่ใช้ในการสร้างสายอากาศ
- ตำแหน่งของอุปกรณ์
- ตำแหน่งที่คาดว่าจะเชื่อมต่อเข้ากับกราวด์กับเคาเตอร์โพซ
- ปริมาตรของสายอากาศ
- แบนด์วิดท์ที่ต้องการและที่คาดว่าจะสร้างได้ตามที่กำหนดไว้ (มักจะถูกกำหนดเป็นอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage-standing-wave ratio))
- สมรรถนะที่ต้องการได้แก่เกนสายอากาศสูงสุด ค่าเกนสายอากาศโดยเฉลี่ย ประสิทธิภาพโดยรวมและสิ่งที่สำคัญที่สุดคือ
- แบนด์ที่ใช้งานของสายอากาศทั้งหมดเป็นไปตามต้องการหรือไม่



ของ ซู-แฮร์ลิงตัน ที่คำนวณจากรูปทรงสมมาตรจะไม่สามารถนำมาใช้ได้อย่างแม่นยำ แต่การออกแบบให้ท่อนแบนด์สูงและท่อนแบนด์ต่ำมีความกว้างที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ จะเป็นการจะเพิ่มองค์ประกอบที่นำไฟฟ้าทั้งสองท่อน และลดค่าของอุปกรณ์แฝงที่เกิดขึ้นในสายอากาศตามธรรมชาติลงได้ ผลที่ตามมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวจะทำให้รูปดีเลย์มีค่าต่ำลงทำให้ได้ค่าของแบนด์วิดท์ที่เพิ่มขึ้นด้วย

ในทางทฤษฎีแล้ว จะมองสายอากาศภายนอกของโทรศัพท์เคลื่อนที่สามารถมองเป็นสายอากาศไดโพลที่สมมาตร (สายอากาศฮาร์ฟเวฟ) หรือไม่ก็สายอากาศโมโนโพลบนระนาบกราวนด์ (สายอากาศควอเตอร์เวฟ) แต่ในความเป็นจริงแล้วอากาศควอเตอร์เวฟจะเป็นสายอากาศโมโนโพลซึ่งพิดสัญญาณเข้าที่ขอบของเคาเตอร์โพซซึ่งมีขนาดเล็ก ทำให้ค่าที่คิดในทางทฤษฎียังคงถูกต้องอยู่บ้าง และขีดจำกัดของ ซู-แฮร์ลิงตัน ก็พัฒนามาจากสายอากาศสมมาตร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงการเรียนรู้ทางทฤษฎีอื่นๆ เพิ่มมากกว่านี้ เพื่อจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้ความรู้ทางทฤษฎีในบทความนี้ในกรณีสายอากาศภายในที่มีโครงสร้างทางแม่เหล็กไฟฟ้าไม่สมมาตร ซึ่งการประยุกต์ใช้ความรู้ทางทฤษฎีในบทความนี้สามารถยึดเป็นหลักการมาตรฐานในการออกแบบสายอากาศภายในได้

เนื่องจากสายอากาศที่หนาจะมีกรูปร่างดีเลย์ต่ำกว่า และให้แบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าสายอากาศที่บาง ดังนั้นโครงสร้างลายวงจรมีพื้นที่มีลายเส้นกว้างกว่าจะยอมจะมีกรูปร่างดีเลย์ต่ำกว่า และให้แบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าโครงสร้างผิวหน้าแบบลายเส้นแคบ

ในทางทฤษฎีแล้วกระแสที่ไหลอย่างคงที่ไปตามความยาวของอุปกรณ์แสดงถึงความเป็นไปได้ที่จะใช้ประโยชน์จากอุปกรณ์ได้มากที่สุด เนื่องจากส่วนของ

อุปกรณ์ที่มีกระแสไหลคงที่จะแผ่กระจายคลื่นออกไปได้มากกว่าบริเวณอื่น (บริเวณที่กระแสคงที่จะมีโอกาสเกิดเลคตรอนที่มีความเร็วอยู่มากที่สุดซึ่งเป็นต้นกำเนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมาจากสายอากาศ) แต่เงื่อนไขในทางอุดมคตินี้ยากที่จะยอมรับได้เพราะการแปรค่าง่ายมากของอิมพีแดนซ์ไปตามโอเกนโหมด

วิธีการที่ดีที่สุดซึ่งจะทำให้เงื่อนไขในอุดมคติข้างบนเป็นจริงคือต้องเพิ่มพื้นที่ผิวของอุปกรณ์ให้แปรตามค่าของแรงดันที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในอุปกรณ์แต่ละตัว โดยหลักการแล้วรูปร่างของสายอากาศแพลนนาที่เหมาะสมที่สุดต้องเป็นรูปสามเหลี่ยมแยกจากกันและพิดที่ปลายยอด แม้ว่าจะไม่สามารถทำตามหลักการออกแบบสายอากาศบนแผ่นวงจรมีพื้นที่ที่เหมาะสมได้จริง เพราะข้อจำกัดของที่ว่างในการสร้างสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ แต่หลักการนี้ยังคงช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปทรงขององค์ประกอบสายอากาศ การเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากที่สุดจะไม่ขัดแย้งกับการลดอุปกรณ์แฝง ยกตัวอย่างเช่นปลายที่มีแรงดันสูงที่ขอบของอุปกรณ์จะต้องมีขนาดกว้างที่สุดเท่าที่เป็นไปได้และจะต้องห่างจากเคาเตอร์โพซและตัวเครื่องมากที่สุดดังที่กล่าวมา

กฎข้อที่ 4 เพิ่มความสูงของสายอากาศให้อยู่เหนือระนาบกราวนด์ให้มากที่สุด

ขีดจำกัดของ ซู-แฮร์ลิงตัน แสดงให้เห็นว่าตัวประกอบคุณภาพของการแพร่กระจายคลื่น (Q) บนสายอากาศการแปรผันตรงกับปริมาตรในหน่วยลูกบาศก์ความยาวคลื่น ดังนั้นหากแบนด์วิดท์มีค่าเกินกว่าที่กล่าวมาแสดงว่าเป็นผลจากการสูญเสียในสายอากาศที่เกิดได้ทั้งจากค่าความต้านทานภายในวงจรและการสูญเสียในไดอิเล็กตริก แต่สามารถประยุกต์ใช้ขีด-

จำกัดของซู-แฮร์ลิงตัน กับโทรศัพท์เซลล์ลูลาร์ได้เพียงแค่ว่าพจนทั่วไปเท่านั้น เพราะสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่จะปรากฏเพียงครึ่งหนึ่งของสายอากาศทั้งหมด และความไม่สมมาตรของสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ส่งผลให้ระบบการแผ่กระจายคลื่นแตกต่างจากการศึกษาดั้งเดิมของ ซู-แฮร์ลิงตัน ค่อนข้างมาก

สายอากาศภายในที่ออกแบบสำเร็จพบว่าต้องใช้ปริมาตร 8-12 cc ในกรณีของระบบ CDMA/PCS และ 6-10 cc สำหรับระบบ GSM/DCS และระยะห่างระหว่างท่อนกับเคาเตอร์โพซคือ 6 และ 10 mm ในการออกแบบให้ใช้ปริมาตรน้อยสุดเท่าที่เป็นไปได้จะมีระยะห่างเพียง 5 mm แต่สายอากาศจะสูญเสียและประสิทธิภาพไปมาก กล่าวคือการลดความสูงเหนือเคาเตอร์โพซลง 5% อาจลดแบนด์วิดท์ของสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ลงได้ 15-20% ดังนั้นหากต้องการสายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงในบรรดาสายอากาศภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งยกตัวอย่างมา จึงควรใช้ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบสายอากาศกับระนาบกราวนด์ดังที่แนะนำ ซึ่งจะเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาให้เครื่องโทรศัพท์มีขนาดเล็กลง

GEW