

طراحی و شبیه سازی آنتن موج نشتی مبتنی بر موجبر مجتمع شده در زیرلایه برای کاربرد رادار خودرو در باند ۷۷ گیگاهرتز

محمود کمره ای

بنیامین یوسف پور

جمال کزازی*

دانشجوی دکترا، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران

kamarei@ut.ac.ir

benyamin.yousefp@ut.ac.ir

jamal.kazazi@ut.ac.ir

چکیده - رادارهای خودرو یکی از مهمترین فناوری های جدید برای کمک به راننده و جلوگیری از تصادفات است. برای این منظور طراحی آنتن در باند ۷۷ گیگاهرتز یکی از چالش های اولیه است. آنتن موج نشتی یکی از راهکار های مناسب برای این منظور است که با کمک فناوری موجبر مجتمع شده در زیرلایه (SIW) می تواند در حجم کمی در سامانه ها قرار گیرد. در این مقاله یک آنتن موج نشتی SIW با محفظه پشتی و شیارهای L شکل طراحی شده است که در دو مود رزونانور تشعشع می کند. شبیه سازی آنتن در نرم افزار CST انجام شده است. پهنای باند آنتن از ۷۲ تا ۷۸/۵ گیگاهرتز و بهره آن حدود ۲۰ دسیبل با دو بیم با SLL حدود ۶ دسیبل است.

کلید واژه - آنتن موج نشتی، رادار خودرو، فرکانس ۷۷ گیگاهرتز، موجبر مجتمع شده در زیرلایه، SIW.

۱- مقدمه

رسیدن سیگنال بازگشتی عمل کرده و داده های پردازش شده را به واحد کنترل الکترونیکی خودرو ارسال می نمایند تا در صورت لزوم اقدامات ایمنی مانند ترمز اضطراری خودکار یا هشدار برخورد انجام شود [۴].

رادارهای مورد استفاده در خودروها عمدتاً به دو دسته تقسیم می شوند. رادارهای بلندبرد دارای محدوده تشخیص تا ۲۵۰ متر است و در کروز کنترل تطبیقی و تشخیص برخورد با وسایل نقلیه دور استفاده می شود [۵]. رادارهای کوتاه برد محدوده تشخیصی تا حدود ۳۰ متر دارند و به منظور هشدار خروج از خط، تشخیص عابر پیاده و پارک خودکار استفاده می شود [۶]. رادارهای خودرو عموماً در دو باند فرکانسی ۲۴ گیگاهرتز و باند ۷۷ تا ۸۱ گیگاهرتز طراحی می شود. باند ۷۷ گیگاهرتز دارای دقت بالا و رزولوشن مناسب برای سیستم های بلندبرد است [۷].

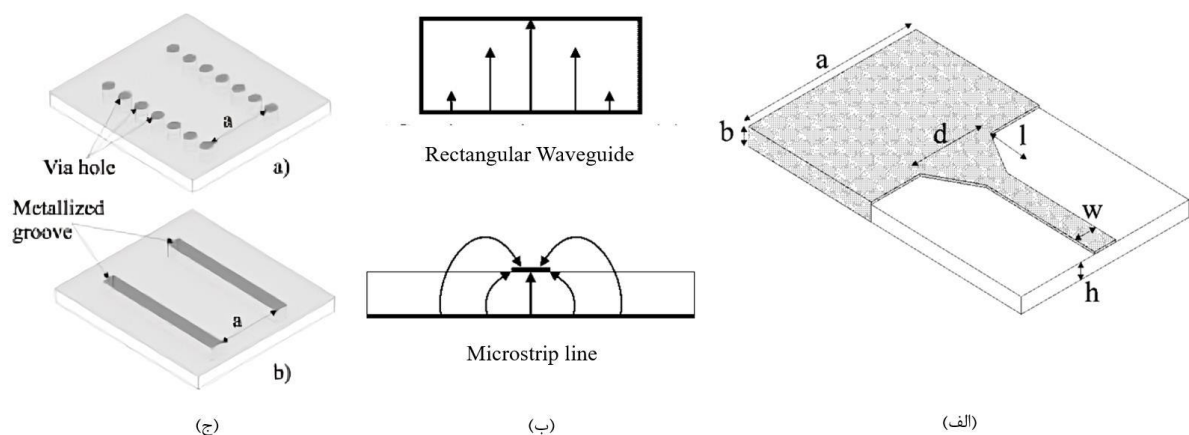
۲- آنتن موج نشتی در موجبر مجتمع شده در زیر لایه

در سال های اخیر، تحقیقات گسترده ای روی آنتن های موج نشتی انجام شده است؛ این امر ناشی از مزایای این آنتن ها از جمله ساختار ساده، طراحی آسان و روش های

با پیشرفت فناوری های نوین در صنعت خودرو سازی، سیستم های کمک راننده پیشرفته (ADAS) به عنوان یکی از ارکان اصلی افزایش ایمنی و کاهش تصادفات جاده ای مطرح شده اند. در این میان، رادارهای خودرو به دلیل دقت بالا، عملکرد قابل اطمینان در شرایط جوی مختلف و قابلیت تشخیص فاصله و سرعت اجسام متحرک، جایگاه ویژه ای در این سیستم ها پیدا کرده اند [۱].

بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت، سالانه حدود ۱،۳ میلیون نفر در اثر تصادفات جاده ای جان خود را از دست می دهند [۲]. مطالعات نشان می دهند که استفاده از رادار در خودروها می تواند تا ۴۰٪ از تصادفات ناشی از خطای انسانی را کاهش دهد [۳]. این سیستم ها با ارائه هشدارهای به موقع و مداخله خودکار در شرایط اضطراری، نقش حیاتی در افزایش ایمنی جاده ها ایفا می کنند.

رادارهای خودرو با استفاده از امواج الکترومغناطیسی در محدوده های فرکانسی مختلف، فاصله، سرعت و زاویه نسبی خودرو نسبت به سایر وسایل نقلیه یا موانع را اندازه گیری می کنند. این سیستم ها معمولاً بر اساس اصل داپلر و زمان



شکل ۱: انواع گذارها و موجبر مجتمع شده در زیرلایه

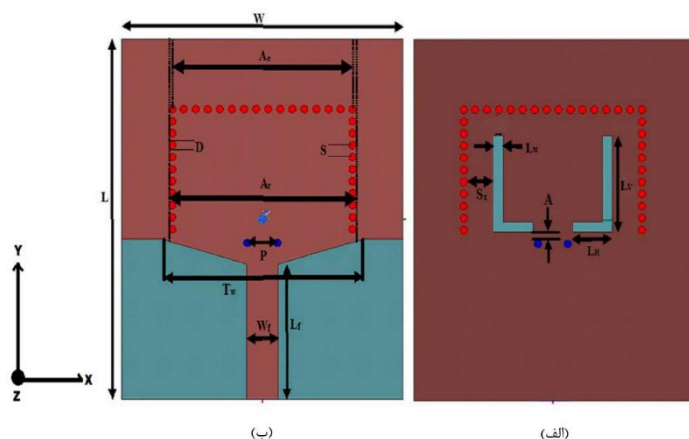
همچنین، از ویاهای هادی کوچک برای صفحات جانبی استفاده می‌شود که صفحات فوقانی و تحتانی را به یکدیگر متصل می‌کنند. با تنظیم دقیق قطر و فاصله‌ی این ویاهای فرکانس‌های عملیاتی مختلف، انتشار موج به‌طور مؤثری درون موجبر محدود می‌شود و از نشت آن به خارج از مرزهای موجبر جلوگیری می‌گردد. ساختارهای SIW دارای ویژگی‌های مطلوبی از جمله تلفات کم و ضریب کیفیت بالا هستند. علاوه بر این، مزایایی همچون مقرون‌به‌صرفه بودن و امکان ایجاد دیواره‌های جانبی مدوله شده را ارائه می‌دهند که به راحتی با چیدمان مناسب ویاهای آنها قابل دستیابی است [۱۴]. به دلیل این مزایا، ساختارهای SIW محبوبیت قابل توجهی در زمینه آنتن‌های موج نشستی پیدا کرده‌اند [۱۵] و [۱۶].

هرچند این روش ممکن است به کاهش ضریب کیفیت موجبر به دلیل پرشدن دی‌الکتریک و کاهش حجم منجر شود، اما کل مدار شامل مدار صفحه‌ای، گذار و موجبر می‌تواند با استفاده از تکنیک‌های استاندارد مورد چاپی یا دیگر تکنیک‌های پردازش صفحه‌ای ساخته شود و در

ساخت کارآمد است [۸]–[۱۲]. با وجود محبوبیت این آنتن‌ها در میان پژوهشگران، نقطه ضعف اصلی آنها طرح‌پذیری روی موجبرهای مستطیلی است. این موجبرها نه تنها حجیم هستند، بلکه انعطاف‌پذیری لازم برای بهینه‌سازی و اصلاح را نیز ندارند. در نتیجه، مهندسان علاقه‌ی فزاینده‌ای به استفاده از طرح‌های میکرواستریپ از خود نشان داده‌اند [۱۲].

در سال ۲۰۰۱، کی. وو، موجبر مجتمع شده در زیرلایه SIW را به عنوان جایگزینی مناسب برای حل مشکلات مرتبط با موجبرهای سنتی پیشنهاد کرد [۱۳]. این طراحی نوآورانه، امکان اتصال عملی بین آنتن و مدارهای میکروویو مختلف را فراهم می‌کند و همچنین تغذیه آنتن، توزیع توان و سایر عملکردهایی که پیش از این محدود به موجبرهای متداول بودند را تسهیل می‌نماید.

SIW از یک بستر متداول در بردهای مدار چاپی مانند FR4 تشکیل شده است که سطح فوقانی و تحتانی آن با صفحات مسی پوشانده شده‌اند. این صفحات مسی به عنوان صفحات هادی کامل فوقانی و تحتانی موجبر عمل می‌کنند.



شکل ۳: (الف) نمای پشت آنتن پیشنهادی (ب) نمای روبروی آنتن پیشنهادی [۱۹]

۳- طراحی و شبیه‌سازی آنتن

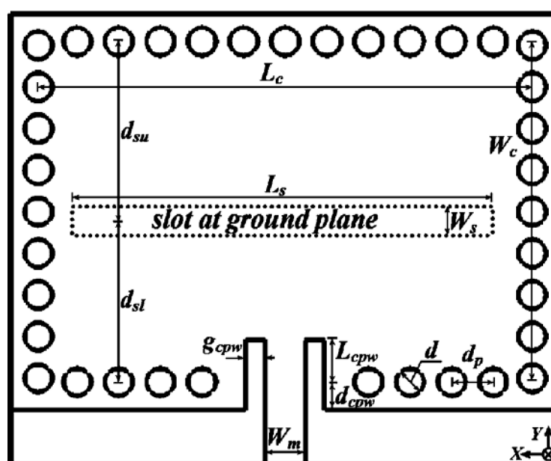
به منظور استفاده از آنتن در رادار خودرو در باند ۷۷ گیگاهرتز، یک آنتن SIW شکافدار پشت محفظه‌ای مشابه ایده مطرح در مرجع [۱۹] طراحی شده است. شکل ۳ شماتیک آنتن طراحی شده و پارامترهای اصلی آن نمایش داده شده است. آنتن از یک پیچ مستطیلی تشکیل شده که از طریق یک اتصال تغذیه‌ی ریزنواری به موجبر مجتمع در زیرلایه تغذیه می‌شود. در صفحه‌ی زمین آنتن، دو شکاف L شکل وجود دارد. محفظه‌ی SIW از ردیف‌هایی از سوراخ‌های متالیزه استوانه‌ای که درون زیرلایه‌ی تخت قرار دارند و پیچ را از سه طرف می‌پوشانند، تشکیل شده است. دو استوانه اضافی نیز درست در زیر شکاف‌های L شکل قرار دارند که به‌عنوان پین‌های اتصال کوتاه عمل می‌کنند. آنتن طراحی شده بر روی زیرلایه‌ی دی‌الکتریک RT/Duroid-5880 ساخته شده است که دارای ضریب دی‌الکتریک $\epsilon_r = 2.2$ و تانژانت تلفات 0.0009 است. ضخامت زیرلایه 0.787 میلی‌متر است.

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، قسمت فلزی آنتن، شامل پیچ و صفحه‌ی زمین، به رنگ قهوه‌ای است، زیرلایه‌ی RT/Duroid به رنگ خاکستری و سوراخ‌های متالیزه اتصال کوتاه به رنگ آبی نشان داده شده‌اند. استوانه‌های مسی که از زیرلایه عبور کرده و صفحه‌ی زمین فلزی و پیچ را به هم متصل می‌کنند، به رنگ قرمز نمایش داده شده‌اند.

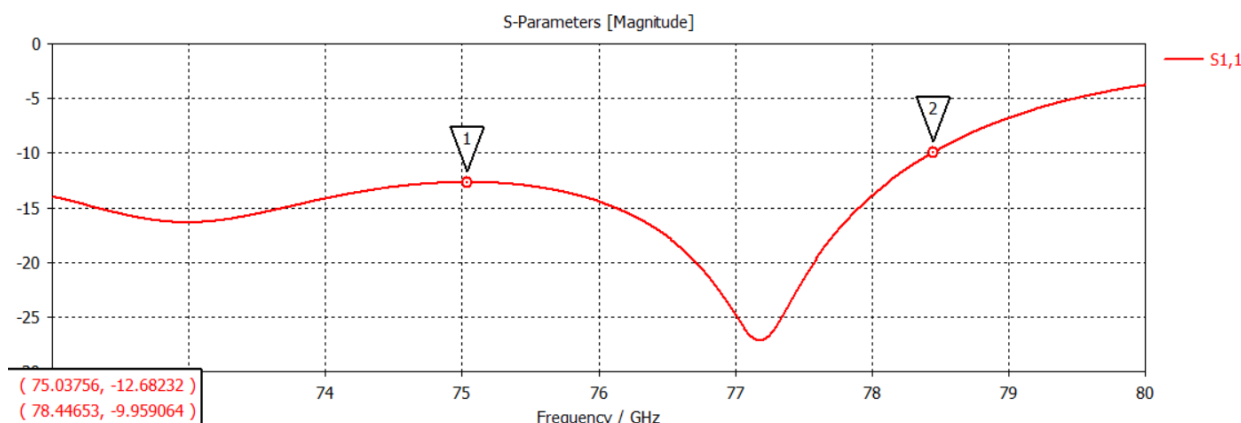
طراحی انجام شده با توجه به فرکانس مرکزی ۷۷ گیگاهرتز محاسبه شده و در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شده است. نمودار پارامتر پراکندگی S_{11} ، الگوی

نتیجه، اندازه کلی کاهش یابد. در شکل ۱ (الف)، گذار پیشنهادی از خط ریزنواری به موجبر مستطیلی در همان زیرلایه دی‌الکتریک نشان داده شده است. همچنین، در شکل ۱ (ب) استفاده از گذار برای تبدیل حالت شبه TEM خط ریزنواری به حالت TE در موجبر مشخص شده است. در این حالت، دیواره‌های جانبی موجبر مستطیلی می‌تواند در زیرلایه با استفاده از تکنیک سوراخ‌های متالیزه یا تکنیک شیار متالیزه ساخته شوند که هر دو در شکل ۱ (ج) نشان داده شده‌اند و این چیدمان ساختار موجبر را کامل می‌کند.

با توجه به اینکه ثابت انتشار حالت TE تنها به عرض موجبر بستگی دارد، می‌توان ارتفاع یا ضخامت موجبر را بدون تأثیر زیاد بر روی انتشار این حالت کاهش داد. این کاهش ضخامت، امکان یکپارچه‌سازی موجبر در یک زیرلایه نازک را فراهم می‌آورد که به کاهش تلفات تابشی در خط ریزنواری کمک می‌کند. البته، کاهش ضخامت منجر به افزایش تلفات هدایتی در هر دو خط ریزنواری و موجبر مستطیلی می‌شود، هرچند که این تلفات در سطح نسبتاً پایینی قرار دارند. [۱۳]. آنتن شکافدار پشت محفظه‌ای مبتنی بر SIW که ساختار آن در شکل ۲ نشان داده شده است، شباهت زیادی به آنتن معرفی شده در [۱۷] دارد. با این حال، برخی از ابعاد آن دستخوش تغییراتی شده‌اند، از جمله اندازه محفظه، اندازه شکاف‌ها و طول خط تغذیه لازم به ذکر است که محفظه‌ی معرفی شده در [۱۷] مربعی شکل بوده، در حالی که در اینجا حفره به شکل مستطیلی است [۱۸].



شکل ۲: ساختار آنتن شکافدار محفظه پستی کوچک شده برای کاربرد با پهنای باند بالا [۱۸]



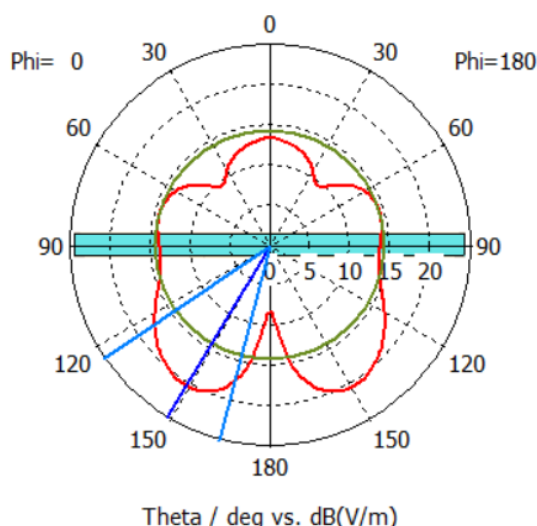
۴- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله یک آنتن موج نشستی نسبتاً پهن باند برای کاربرد رادار خودرو طراحی شد. همانگونه که در شکل‌ها قابل مشاهده است، آنتن دارای دو بیم است و پهنای باند حدود ۹ درصد دارد. در ادامه پژوهش اگر بتوان آنتنی طراحی نمود که کل پهنای ۷۷ تا ۸۱ را بپوشاند و یا همزمان در باند ۶۰ گیگاهرتز نیز قابلیت تشعشع داشته باشد، بسیار کاربردی خواهد بود. همچنین آرایه کردن این آنتن نیز می‌تواند به طرح جالبی مبدل شود.

مراجع

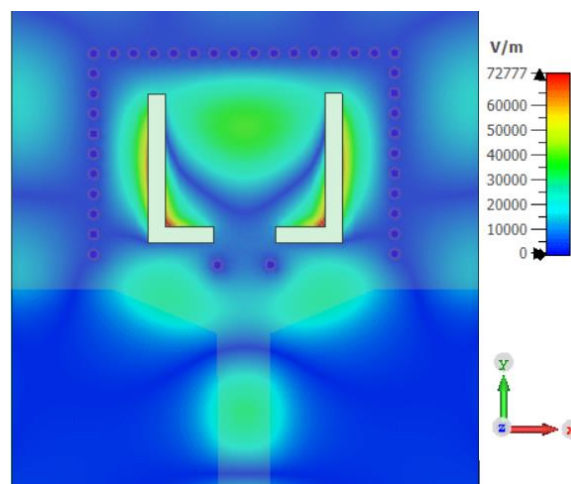
- [1] M. Skolnik, "Radar Handbook, 3rd ed.," McGraw-Hill, 2008.
- [2] WHO, "Global Status Report on Road Safety," 2023.
- [3] NHTSA, "The Impact of ADAS on Crash Prevention," U.S. Dept. Transp., 2022.
- [4] A. Steinhauser et al., "Automotive radar for autonomous vehicles: A review of signal processing techniques," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 36, no. 5, pp. 111–125, 2019.
- [5] R. Feger et al., "A 77-GHz radar for long-range automotive applications," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 63, no. 4, pp. 1375–1383, 2015.
- [6] S. Sun et al., "Short-range automotive radar with high resolution," *IEEE Sensors J.*, vol. 18, no. 12, pp. 5075–5084, 2018.
- [7] J. Hasch et al., "Millimeter-wave technology for automotive radar sensors," *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 11, pp. 2372–2389, 2012.
- [8] J. Ghalibafan, S. M. Hashemi, "Leaky-Wave Centerline Longitudinal Slot Antenna Fed by Transversely Magnetized Ferrite," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 52, no. 1, pp. 1–4, 2016.

Farfield E-Field($r=1m$) Abs ($\Phi=0$)



شکل ۵: الگوی تشعشعی آنتن طراحی شده

تشعشعی آنتن و میدان الکتریکی ایجاد شده روی آن، در شکل ۴، ۵ و ۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۶: توزیع میدان الکتریکی روی آنتن

- [9] A. R. Mallahzadeh, M. H. Amini, and S. Mohammad-ali-nezhad, "Leaky-wave long slot antenna design using ridged waveguide," *6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Prague, pp. 1–3, Mar. 2012.
- [10] Tornero, J.L. Gómez. "Computation of modal coupling effects in meandered long-slot leaky-wave antennas," *2016 IEEE/ACES International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics (ACES)*, pp. 1-2. IEEE, 2016.
- [11] L. Chang, Z. Zhang, Y. Li, S. Wang, and Z. Feng, "Air-filled long slot leaky-wave antenna based on folded half-mode waveguide using silicon bulk micromachining technology for the millimeter-wave band," *IEEE Trans. Antennas Propagation.*, vol. 65, no. 7, pp. 3409– 3418, Jul. 2017.
- [12] A. Kiani, F. Geran, S.M. Hashemi, et al. "Mathematical Analysis of a Modified Closed-Form Formula for Design a Uniform Leaky-Wave Antenna with Ultra-Low SLL," *Sci. Rep.* 9, 9372, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44967-w>
- [13] K. Wu, "Integration and interconnect techniques of planar and nonplanar structures for microwave and millimeter-wave circuits current status and future trend," *Microwave Conference (APMC 2001)*, pp. 411-416, 2001.
- [14] Y. J. Cheng, W. Hong, K. Wu, and Y. Fan, "Millimeter-wave substrate integrated waveguide long slot leaky-wave antennas and twodimensional multibeam applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.59, no. 1, pp. 40–47, Jan. 2011.
- [15] D. Zheng, Y. Lyu and K. Wu, "Longitudinally Slotted SIW Leaky Wave Antenna for Low Cross- Polarization Millimeter-Wave Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019. Available: 10.1109/tap.2019.2940469 [Accessed 15 November 2019].
- [16] X. Ding, Y. Wu, F. Jin, Z. Wang, and B. Wang, "A SIW Leaky-Wave Beam Scanning Array", *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, 2019.
- [17] Luo, G.Q., et al., "Planar slot antenna backed by substrate integrated waveguide cavity," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 7: p. 236-239, 2008.
- [18] Luo, G.Q., et al., "Bandwidth-enhanced low-profile cavity-backed slot antenna by using hybrid SIW cavity modes," *IEEE transactions on Antennas and Propagation* 60(4): p. 1698-1704, 2012.
- [19] Kumar, L., V. Nath, and B. Reddy, "A wideband substrate integrated waveguide (SIW) antenna using shorted vias for 5G communications," *AEU-International Journal of Electronics and Communications* 171: p. 154879, 2023.