

یازدهمین کنگره ملی سراسری  
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران  
11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

## رادارهای خودرو، فرصت‌ها و چالش‌ها

جمال کزازی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری مهندسی برق مخابرات، دانشگاه تهران، jamal.kazazi@ut.ac.ir

### چکیده

با توجه به افزایش تلفات جاده‌ای و همچنین ظهور فناوری‌های نوظهور در خودرو مانند خودروهای خودران، در این مقاله رادارهای خودرو به عنوان یکی از مهمترین فناوری‌های جدید قابل استفاده در خودروهای جدید، معرفی می‌شود. دلایل استفاده از سامانه‌های کمک‌یار راننده و انواع مختلف سامانه‌های در دسترس تشریح شده و در ادامه رادار خودرو به صورت خاص ارائه خواهد شد. همچنین استانداردها، نمونه‌های تجاری، چالش‌های ساخت و اندازه‌گیری این تجهیزات در ادامه مقاله بررسی و به صورت مقدماتی نحوه‌ی عملکرد رادار FMCW تشریح می‌شود. در نهایت فرصت‌های کار تحقیقاتی و سرمایه‌گذاری در ایران با توجه به امکانات فعلی در حوزه‌ی تولید مدار و بخش پردازش رادار ارزیابی خواهد شد.

### واژه‌های کلیدی

رادار خودرو، رادار FMCW، کمک‌یار رانندگی، سامانه اجتناب از تصادف، باند ۷۷ تا ۸۱ گیگاهرتز.

# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

## ۱. مقدمه

یکی از مسائل مهم در صنعت حمل و نقل، از جاده سازی و امور عمرانی تا ساخت خودرو و وسایل نقلیه، توجه به ایمنی سفرهاست. در سالهای اخیر شرکت های خودروسازی با نیت کاهش تلفات و جراحات ناشی از تصادفات، فناوری های متعددی را در خودروهای جدید به کار برده اند. کمک یار پارک کردن، آشکارساز نقاط کور<sup>۱</sup>، دوربین های دید اطراف، کروز کنترل و انواع حسگرهای راداری، لیزری<sup>۲</sup> و مادون قرمز که به کمک پردازش سیگنال سعی در تصمیم سازی برای راننده و بعضاً تصمیم گیری بجای او را دارند، نمونه هایی از این فناوری های نوظهور هستند. بررسی گزارش های سازمان جهانی بهداشت و آمارهای رسمی نشان می دهد که هر ساله در ایالات متحده آمریکا چهل هزار نفر در اثر تصادفات فوت می کنند. گرچه آمار نسبی تصادفات نسبت به سنوات گذشته کاهش داشته است، اما با افزایش جمعیت و تعداد خودروها، تعداد خام تصادفات و مجروحین در حال افزایش است. گزارش ها حاکی از آن است که در هر سال حدود ۱/۲ میلیون نفر جان خود را در این تصادفات از دست می دهند و حدود ۵۰ میلیون نفر نیز مجروح می شوند. سازمان جهانی بهداشت به صورت عددی برای نواحی مختلف دنیا وضعیت دنیا در تعداد تصادفات جاده ای و فوتی ناشی از آن در سالهای قبل و پیش بینی آن برای سال جاری را ارائه داده است [1].

در ایران نیز در سال ۱۳۹۸، ۱۶ هزار و ۹۴۷ نفر در حوادث رانندگی ترافیکی کشته شده اند که این تعداد نسبت به سال قبل از آن، ۱/۴ درصد کاهش یافته است که البته ممکن است به علت افزایش شیوع کرونا و کاهش محسوس سفرهای انتهایی سال نیز باشد. این در حالی است که بیشترین تلفات مربوط به مسیره های برون شهری است، به طوری که «۶۶ درصد کشته های تصادفات مربوط به جاده های برون شهری، ۲۴/۷ درصد در راه های درون شهری، ۷/۳ درصد در جاده های روستایی و محل تصادف نیم درصد در راه های اختصاصی و ۱/۴ درصد در سایر راهها بوده است» [2].

در سال های جدید حجم زیادی از پژوهش های دانشگاهی و صنعتی معطوف فناوری های ایمنی خودرو شده است. به طوری که قوانین و استانداردهای جدید ساخت خودرو، خودرو سازان را ملزم به استفاده از سیستم اجتناب از برخورد در خودروها تا سال ۲۰۲۵ می کند. این سیستم ها شامل رادار<sup>۳</sup>، دوربین مادون قرمز، دوربین تصویربرداری، لایدار و فراصوت<sup>۴</sup> است. هنز آدلکوفر، قائم مقام شرکت اینفونون در فناوری های کنترلی و حسگری عقیده دارد که «در سیستم های اجتناب از برخورد، رادارها، جایگاه کلیدی در نوآوری های بعدی به جهت جلوگیری از تصادفات دارند». کارکرد فناوری های گوناگون در این حوزه بیشتر در حد هشدار است اما آنچه برای رادارها در این حوزه برنامه ریزی شده است، در حد تصمیم گیری و جلوگیری از تصادف است. در جدول ۱ تفاوت کلیدی فناوری های گوناگون در این حوزه را مشاهده می کنید.

در بین این حسگرها، رادار طرفدار بیشتری دارد، چرا که هم نسبت به لایدار بسیار ارزان تر است و همچنین نسبت به دوربین تصویربرداری در شرایط مه و کم بودن نور محیط عملکرد بهتری دارد. گرچه در ابتدای امر به نظر می رسید که این فناوری ها برای خودروهای گران قیمت مناسب است، با حضور صنایع و انجام پژوهش های متنوع در این حوزه رقابتی مثبت به جهت کمتر کردن هزینه ها اتفاق افتاده است. این رقابت موجب شد که این فناوری ها برای خودروهای معمولی تر نیز مورد استفاده قرار گیرد. پیش بینی های اولیه نمایانگر کاهش هفده هزار فوتی در سال در تصادفات رانندگی به خاطر استفاده از این فناوری هاست [1].

- 1 Technology
- 2 Blind Spot Detector
- 3 Lidar
- 4 Automotive Radar
- 5 Ultrasound

# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

جدول ۱. ++ : ایده آل و مناسب است | + : عملکرد خوب | \* : امکان پذیر است، اما اشکالاتی انتظار می رود | - : تنها با تلاش زیاد امکان پذیر است | -- : غیر ممکن

رادارهای برد کوتاه	رادارهای برد بلند	لایدار	اولتراسونیک	دوربین فیلمبرداری	دوربین سه بعدی	دوربین مادون قرمز	
*	*	*	++	-	++	-	اندازه گیری دامنه کمتر از ۲ متر
+	++	++	-	-	*	-	اندازه گیری دامنه ۲ تا ۳۰ متر
-	++	+	--	-	-	-	اندازه گیری دامنه ۳۰ تا ۱۵۰ متر
+	+	++	-	++	+	++	اندازه گیری زاویه کمتر از ۱۰ درجه
*	-	++	*	++	+	++	اندازه گیری زاویه بیشتر از ۳۰ درجه
*	*	++	-	++	+	++	وضوح زاویه ای
++	++	--	*	--	--	--	اطلاعات سرعت مستقیم
++	+	*	*	*	*	*	عملیات زیر باران
++	++	-	+	-	-	*	عملیات در مه یا برف
++	++	*	++	--	--	--	عملیات با وجود آلودگی روی حسگر
-	-	-	-	-	*	++	دید در شب

## ۱.۱. تاریخچه رادار

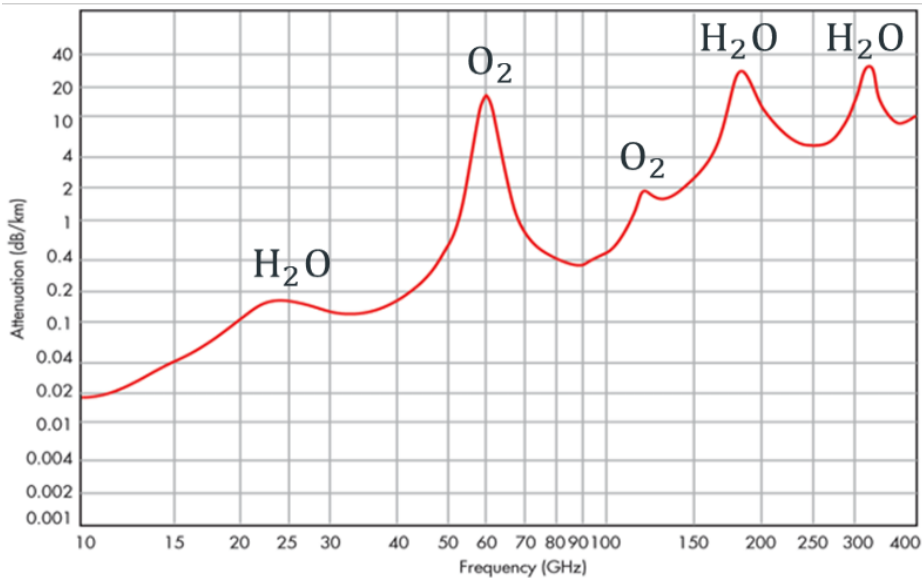
اولین اختراع در حوزه رادار خودرو در سال ۱۹۰۴ میلادی در آلمان ثبت شده است. مساله‌ی اصلی در رادارهای خودرو تشخیص هر هدفی با احتمال و دقت بالا و تعداد کم هشدارهای اشتباه است. این رادارها در ابتدا در باند ISM حول فرکانس مرکزی ۲۴ گیگاهرتز طراحی می شدند که بعداً با توجه به ضرورت افزایش پهنای باند، بهبود عملکرد و کوچکتر شدن سایز مدارها، طراحی‌ها در باند ۷۶ تا ۸۱ گیگاهرتز صورت می گیرد. دلیل این انتخاب نیز کم تر بودن تلفات محیط در این باند است. \* تلفات هوا در فرکانس‌های مختلف را نمایش می دهد.

# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

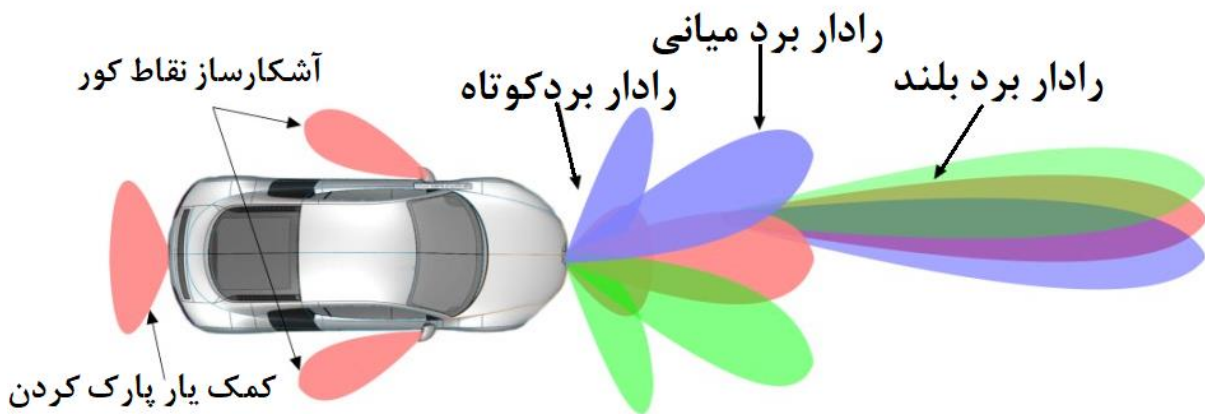
11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

البته در تمامی کشورها کل این باند در دسترس خودروسازها نیست. این رادارها توانایی اندازه‌گیری فاصله، زاویه‌ی افقی و سرعت متحرک‌ها را در زمان کوتاهی به صورت هم‌زمان دارند. این رادارها در چند حالت برد کوتاه (SRR) <sup>۲</sup> برد میانی (MRR) <sup>۸</sup> و برد بلند (LRR) <sup>۹</sup> آشکارساز نقاط کور مورد استفاده قرار می‌گیرند که در شکل ۲ جایگاه هر یک نمایش داده شده است. در وضعیت باندهای فرکانسی در کشورهای مختلف آمده است. تصویر نیز محدوده فرکانسی تعیین شده در استانداردها را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. ضریب تلفات هوا در فرکانس‌های مختلف



شکل ۲. محدوده پوشش فناوری‌های مختلف قابل استفاده در خودروها

- 6 Azimuth
- 7 Short Range Radar
- 8 Midium Range Radar
- 9 Long Range Radar

# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

جدول ۲. وضعیت تخصیص باندهای مختلف فرکانسی مرتبط با رادار خودرو در مناطق مختلف

کشور/ قاره	79 ~ 81 GHz	76 ~ 77 GHz
اروپا	در دسترس	در دسترس
ایالات متحده، کانادا	در حال بررسی	در دسترس
روسیه	در دسترس	در دسترس
ژاپن	در حال بررسی	محدود به ۰/۵ گیگاهرتز
چین	-	در دسترس
کره جنوبی	-	در دسترس
ایران	در آخرین کتاب تخصیص موجود نیست. بخشی از باند برای کارهای آماتور تعبیه شده است.	
		محدود به ۰/۵ گیگاهرتز از ۷۶/۵ تا ۷۷

رادار برد بلند دارای پهنای پرتو بسیار کمی است و به هدف پیدا کردن فاصله از موانع تا حدود ۲۵۰ متر استفاده می‌شود، در عوض پهنای باند کمتری دارد و در نتیجه وضوح تصویری کمتری نسبت به رادار برد کوتاه دارد. در ابتدا سازندگان خودرو از رادارهای پالسی<sup>۱</sup> برای این کاربرد استفاده می‌کردند که پیک توان بسیار بالا و نرخ هشدار کاذب<sup>۲</sup> زیاد در این رادارها مشکل اصلی بود. با طرح اولیه ارائه شده از مقامات آلمان [3] به اسم KOKON که به منظور طراحی رادار برد کوتاه (SRR) ارائه شده بود، از یک رادار موج پیوسته مدوله شده فرکانس<sup>۳</sup> (FMCW) مبتنی بر آرایه‌های فازی<sup>۴</sup> استفاده شده بود. این مساله موجب شد تا استفاده از رادار FMCW با قابلیت شکل دهی پرتو<sup>۵</sup> و چرخش پرتو<sup>۵</sup> به یک انتخاب اصلی برای کاربردهای موقعیت یابی تبدیل شود. تفاوت این رادارها با رادارهای مرسوم دیگر در مشاهده می‌شود. با توجه به تجاری بودن رادار و ابعاد و توان، انتخاب FMCW منطقی تر به نظر می‌رسد که در ادامه به ساختار آن پرداخته خواهد شد.

جدول ۳. تفاوت عملکرد رادارهای مختلف با کاربرد سیستم کمک یار رانندگی

نوع رادار	FMCW	رادار پالسی	مونوپالسی
بیشترین محدوده	200 m		
فرضیات	Ant Gain = 20 dBi , RX NF = 0 , RCS = 10 m <sup>2</sup> , محدوده وضوح = 0.5 m , SNR = 16 dB		
پهنای باند	300 MHz		
کل انرژی لازم	توان مصرفی زیر ۱/۵ وات		
توان فرستنده	10 dBm	10 dBm	(230 W) 53.37 dBm
زمان اندازه گیری	153 ns	30 ms	3.33 ns
مزایا	اندازه گیری سریع	بدون مشکل نشت	اندازه گیری فوق سریع

- 1 Pulse Radar 0
- 1 False Alarm Rate 1
- 1 Frequency modulated Continuous wave 3
- 1 Phased Array Antenna 3
- 1 Beamforming 4
- 1 Beamsteering 5

# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

مغایب	نشت سیگنال فرستنده در گیرنده، هم‌زمانی	کند	اندازه پیک توان بسیار بالا
-------	---	-----	----------------------------

در بخش بعدی کلیات رادارهای FMCW قابل استفاده در خودرو، مطالب پایه تئوری، چالش‌های پیاده‌سازی سخت‌افزاری و زنجیره‌ی پردازشی آن بررسی می‌گردد.

## ۲. رادارهای FMCW

اولین بار در اواخر قرن ۱۹ میلادی، هنریک هرتز<sup>۱</sup> نشان داد که امواج الکترومغناطیس در برخورد با فلزات بازتاب می‌شوند. این مساله پایه سیستم‌های راداری است. جیمز کلرک ماکسول<sup>۲</sup> با اثبات امکان پیاده‌سازی سیستم‌هایی که بر مبنای این پدیده توانایی تشخیص اجسام فلزی را دارند، نقش مهمی در توسعه سیستم‌های راداری ایفا کرد. با این وجود، در اوایل قرن ۲۰ میلادی، سیستم‌های راداری به صورت گسترده برای تشخیص اهداف و محاسبه فاصله مورد استفاده قرار گرفت. برای اولین بار در سال ۱۹۰۴ کریستین هولز میز<sup>۳</sup> دستگاهی ساخت که به کمک آن از برخورد کشتی‌ها در آب و هوای مه‌آلود جلوگیری می‌شد. برد این رادار حدود ۳ کیلومتر بود و تنها به هنگام تشخیص هدف صدای هشدار تولید می‌کرد. اما این دستگاه مورد اقبال دریانوردان قرار نگرفت و نهایتاً به شکل انبوه تولید نشد. عمده استفاده از رادار از سال ۱۹۳۴ و در خلال جنگ جهانی دوم، به صورت کاربرد‌های نظامی صورت پذیرفت به طوری که در سال‌های ۱۹۳۹ تا ۱۹۳۹ هشت کشور شامل ایالات متحده آمریکا، انگلستان، آلمان، اتحاد جماهیر شوروی، ژاپن، هلند، فرانسه و ایتالیا به طور مستقل و گسترده از سیستم‌های راداری برای کاربردهای نظامی استفاده کرده‌اند. پس از پایان جنگ جهانی دوم، در حالی که سیستم‌های راداری نقش مهمی در پیروزی متفقین داشت، رادارها در حوزه‌های مختلفی از جمله صنایع هوایی (غیر نظامی)، ناوبری دریایی، کنترل حمل و نقل، مطالعات جوی، سلامت و پزشکی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت.

اولین بار ایده استفاده از رادار موج پیوسته با مدولاسیون فرکانسی<sup>۴</sup> (FMCW Radar) برای بررسی لایه یونوسفر به دهه ۱۹۲۰ باز می‌گردد، اما کاربرد عملیاتی آن مربوط به زمانی است که فردی به نام بنتلی<sup>۵</sup> در سال ۱۹۲۸ اختراع ارتفاع سنج هواپیما را بر مبنای این فناوری به نام خود ثبت کرد. رادار FMCW در سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۶۰ بسیار مورد توجه قرار گرفت.

### ۱.۲. عملکرد رادار FMCW

در رادار FMCW، فاصله تا هدف و سرعت نسبی آن، از اختلاف فرکانس موج ارسال شده به سمت هدف با موج برگشتی از آن محاسبه می‌شود. موج ارسالی پس از طی مسیری به اندازه  $2d$  پس از برخورد با هدف و بازتاب به گیرنده وارد می‌شود. به واسطه طی این مسیر تاخیر  $\Delta t$  در سیگنال برگشتی ایجاد می‌شود. از آن جایی که سرعت انتشار موج در خلا مقداری ثابت است، با اندازه‌گیری تاخیر  $\Delta t$  می‌توان فاصله را محاسبه نمود:

$$C = \frac{2d}{\Delta t} \quad (1)$$

با توجه به اینکه سرعت نسبی جسم تا هدف به علت اثر داپلر باعث تغییر فرکانس موج برگشتی به اندازه  $f_d$  می‌شود، با اندازه‌گیری میزان تغییر فرکانس، بر اساس فرمول فرکانس داپلر (۲) مقدار سرعت نسبی جسم و هدف نیز محاسبه می‌شود.

$$f_d = \frac{2V_{max}}{C} \times f_c \quad (2)$$

پس هدف از طراحی رادار FMCW اندازه‌گیری سرعت نسبی و فاصله اهداف بر اساس تاخیر موج ورودی و فرکانس داپلر ایجاد شده است. قسمت‌های مختلف سیستم رادار FMCW در ۰ مشاهده می‌شود. ابتدا یک سیگنال به نوسان‌ساز کنترل‌شونده با ولتاژ<sup>۶</sup> (VCO) داده می‌شود که دامنه آن به صورت متناوب و خطی نسبت به زمان تغییر می‌کند. بر همین اساس VCO سیگنالی سینوسی تولید می‌کند که

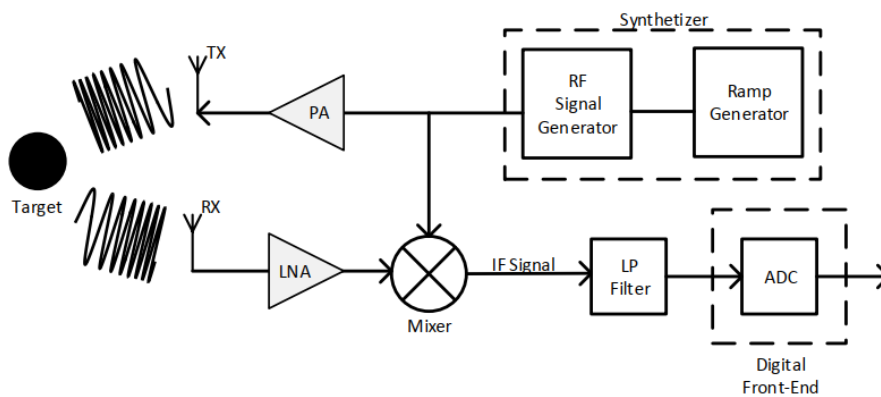
<sup>1</sup> Heinrich Hertz 6  
<sup>1</sup> James Clerk Maxwell 7  
<sup>1</sup> Christian Huelsmeyer 8  
<sup>1</sup> Frequency Modulated Continuous Wave Radar 9  
<sup>2</sup> J.O.Bentley 0  
<sup>2</sup> Voltage Controlled Oscillator 1

# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

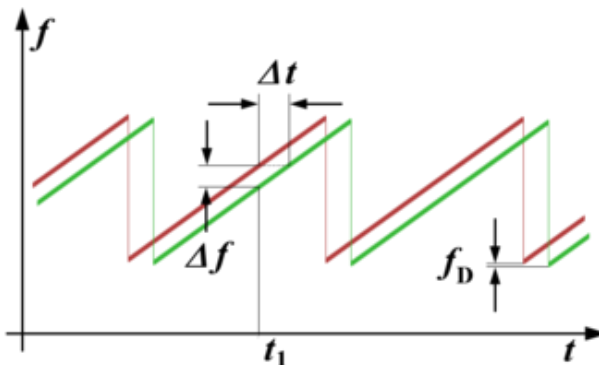
11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

فرکانس آن به صورت متناوب و خطی نسبت به زمان تغییر می کند. نمودار تغییرات فرکانس سیگنال خروجی نوسان ساز و سیگنال دریافتی در شکل ۲-۲ دیده می شود. تزویج گر نمونه ای از این سیگنال را به گیرنده می فرستد تا در مخلوط کننده ی فرکانسی موجود در گیرنده، برای محاسبه اختلاف فرکانس موج رفت و برگشت به کار رود. سیگنال خروجی مستقیم تزویج گر توسط تقویت کننده ی توان، تقویت می شود تا به سطح توان مناسب برای ارسال برسد. سپس این سیگنال توسط آنتن فرستنده به سمت هدف ارسال می شود. سیگنال بازتاب شده از سطح هدف، توسط آنتن گیرنده دریافت شده و توسط تقویت کننده ی کم نویز تقویت می شود. مخلوط کننده ی فرکانسی با ضرب سیگنال خروجی تقویت کننده ی کم نویز در نمونه ی دریافتی از تزویج گر، سیگنالی سینوسی ایجاد می کند که فرکانس آن برابر اختلاف فرکانس موج برگشتی و فرکانس نوسان ساز در همان لحظه است. با پردازش سیگنال خروجی مخلوط کننده می توان مقدار تاخیر موج ارسالی ناشی از طی فاصله بین جسم و هدف و هم چنین سرعت نسبی هدف را محاسبه نمود [4].



شکل ۳. شمای کلی رادار FMCW [4]



شکل ۴. نمودار تغییرات فرکانس سیگنال خروجی VCO و سیگنال دریافتی

معادله رادار (۳) نشان می دهد که برد رادار در حالت کلی با افزایش توان ارسالی و یا با افزایش بهره ی آنتن های فرستنده و گیرنده افزایش می یابد. از آن جایی که افزایش توان ارسالی با موانعی هم چون محدود بودن توان ورودی سیستم، به اشباع رفتن تقویت کننده های توان و بالا بودن قیمت ادوات توان بالا مواجه می شود، برای افزایش برد رادار باید تا حد ممکن از آنتن هایی با بهره بالا استفاده نمود.

$$R^4 = \frac{P_T G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_0 B_n F_n \left(\frac{\sigma}{n}\right) L_T L_R} \quad (3)$$

<sup>2</sup> Linear Frequency Modulated (LFM)<sup>2</sup>  
<sup>2</sup> Coupler<sup>3</sup>  
<sup>2</sup> Frequency Mixer<sup>4</sup>  
<sup>2</sup> Low Noise Amplifier<sup>5</sup>  
<sup>2</sup> Frequency Mixer<sup>6</sup>

# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

همچنین از آن جایی که فرکانس موج ارسالی در یک بازه مشخص به صورت خطی با زمان تغییر می کند، لازم است عناصر موجود در مدار در محدوده‌ی فرکانسی کار، عملکرد مناسبی داشته باشند. بدین منظور لازم است از تقویت کننده، تزویج گر، آرایه‌ی آنتنی و سایر ادوات پهن باند استفاده نمود. در جدول ۴ تاثیر موارد مختلف در پیاده سازی سخت افزاری را بر عملکرد رادار FMCW ملاحظه می کنید [5]:

جدول ۴. تاثیر عوامل مختلف بر عملکرد رادار

سناریو	تاثیر آن بر روی عملکرد
افزایش توان ارسالی	افزایش نسبت سیگنال به نویز <sup>۲</sup> گیرنده
افزایش پهنای باند ارسالی	افزایش تفکیک پذیری در فاصله
افزایش خطینگی سیگنال ارسالی	افزایش دقت تخمین فاصله
کاهش عدد نویز گیرنده	بهبود حساسیت
افزایش پهنای باند پردازشی	افزایش حداکثر برد قابل شناسایی
کاهش نشتی ها در گیرنده	بهبود حساسیت گیرنده

## ۲.۲. بوردها و محصولات تجاری

باتوجه به باند جدید انتخابی که باند موج میلیمتری در فرکانس ۷۷ تا ۸۱ گیگاهرتز است، طراحی و ساخت ادوات فعال و منابع سیگنال در این باند با چالش جدی روبرو است. لذا به جهت اینکه مسائل مطرح شده در این رساله دارای پارامتر نامعلوم زیادی نباشد، هدف از این رساله طراحی فرستگیرنده و مدارهای مورد نیاز داخلی آن نیست و به جهت تکمیل کار در صورت دسترسی قرار است از رادارهای آماده استفاده شود. شرکت های بسیار زیادی در سال های اخیر به صورت تجاری به تولید برد و مدار مجتمع رادیویی رادار خودرو، اقدام کرده اند. در حوزه طراحی مدار مجتمع جدا، شرکت TI، شرکت NXP و شرکت کلتره<sup>۲</sup> مدار مجتمع فرستگیر را تولید نموده اند.

شرکت TI تنوع محصول بسیار بیشتر با پیشوند AWR برای بوردهای آموزشی و IWR برای بردهای صنعتی ارائه داده است. به طور مثال برد ارزیابی AWR1243 یک رادار خودرو با ۳ فرستنده و ۴ گیرنده و پردازنده مرکزی است [6]. در مدل AWR1843 نیز هر گیرنده یا فرستنده ۶ بیت شیفت دهنده فاز<sup>۳</sup> دارد. شایان ذکر است که در این بوردها همزمان دو فرستنده از سه فرستنده توانایی ارسال داده دارند و بین آنها از می توان از تسهیم زمانی<sup>۴</sup> استفاده کرد. همچنین امکان استفاده از کدهای فضا زمان<sup>۵</sup> و شکل دهی پالس<sup>۶</sup> برای ارسال نیز وجود دارد [10]، [10]–[7]. به هریک از این فرستنده ها یا گیرنده ها یک آنتن آرایه ای با تغذیه سری<sup>۳</sup> متصل است. به همراه برد ارزیابی، نرم افزار ساده ای جهت تشخیص اهداف از روی سیگنال های رسیده موجود است که کار اولیه برای راه اندازی و تست را در اختیار شرکت ها و آزمایشگاه ها قرار می دهد. در جدول ۵ زیر سه مدار مجتمع فرستگیر مقایسه شده اند. قیمت حدودی این مدارهای مجتمع حدود ۴۰ دلار است.

جدول ۵. مقایسه بین سه مدار مجتمع رادیویی موجود

	AWR1xxx	TEF810X	77A4T8R
Company	TI	NXP	CALTERAH
TX Output	12dbm	12dbm	~12dbm

<sup>2</sup> Signal to Noise Ratio (SNR) 7  
<sup>2</sup> CALTERAH 8  
<sup>2</sup> Phase Shifter 9  
<sup>3</sup> Time Division Multiplexing 0  
<sup>3</sup> Space-Time Coding 1  
<sup>3</sup> Pulse Shaping 2  
<sup>3</sup> Series Feed Array Antenna 3



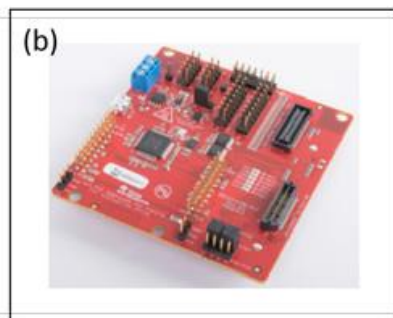
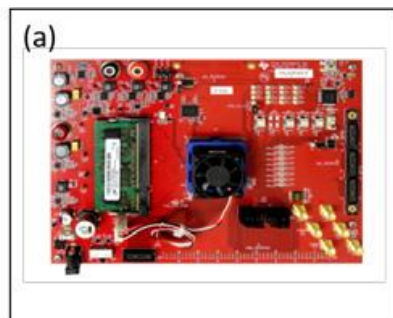
# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

Size of Chip	10.5*10.5 mm <sup>2</sup>	7.6*7.6 mm <sup>2</sup>	9*6 mm <sup>2</sup>
Interface	CAN-SPI	LVDS	SPI
Power Cons. 2tx	1.3w-2.14	1.2w<2.5w	0.1per channel + each part

در شکل (د) به عنوان نمونه مشخصات برد ارزیابی AWR1443 آمده است [11]. تکنولوژی مدار مجتمع استفاده شده برای اتصال بر روی برد مدار چاپی BGA است که در ایران برخی از شرکت توانایی مونتاژ آن را دارند.



(c)	40 m	150 m medium range	250 m long range
Max unambiguous range			
Range resolution	4.5cm	33cm	55cm
Sweep bandwidth	3.3GHz	460MHz	275MHz
Azimuth angular resolution	1°		1°
Cross-range resolution	70 cm		4,4 m
Elevation angular resolution	14°		14°
Ramp slope	54 MHz (μs) <sup>-1</sup>	15 MHz (μs) <sup>-1</sup>	9 MHz (μs) <sup>-1</sup>
Chirp duration	61.3 μs	30.7 μs	30.7 μs
Number of chirps	16	256	256
Max beat frequency	15 MHz	15 MHz	15 MHz
Frame time	16 × 74.3 μs	256 × 37.7 μs	256 × 37.7 μs
Radar data memory	1 MB	2 MB	8 MB

شکل ۵. مشخصات برد ارزیابی AWR1443

به غیر از مدارهای مجتمع، همانگونه که مطرح شد، شرکت های زیادی اقدام به تولید رادارهای تجاری در این حوزه در حدود قیمت ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ دلار داشته اند [12], [13], [22]–[30], [14]–[21]. در شکل (۶) تعدادی از محصولات ارائه شده در این حوزه، نسبت قیمتی و زمان ارائه شده آن مشاهده می شود. همانگونه که ملاحظه می شود، با گذشت زمان، قیمت محصولات کمتر و تکنولوژی استفاده شده در آن ها روزآمد تر شده است.

## ۳.۲. اندازه گیری مشخصات در ایران

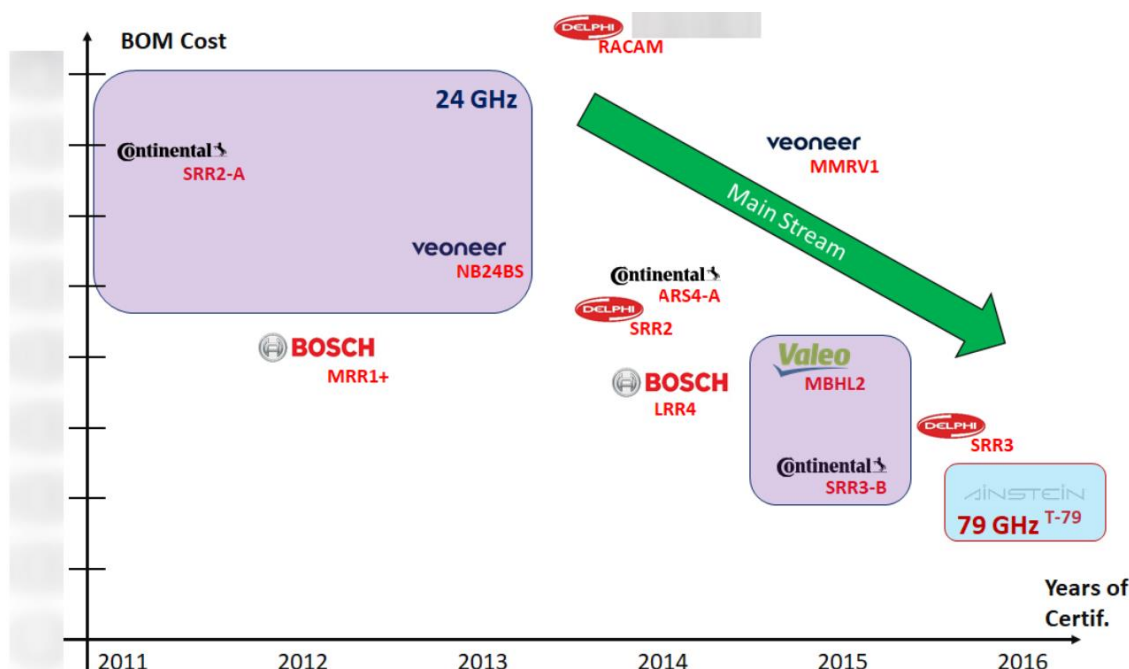
یکی از چالش های کار در این حوزه، طرق اندازه گیری در باند ۷۷ تا ۸۱ گیگاهرتز است. متاسفانه اتاق آنتن دانشگاه تهران دارای تحلیل گر شبکه و طیف تا فرکانس ۶۷ گیگاهرتز است. ارائه الگوریتم های پردازشی در صورت موجود بودن برد ارزیابی یکی از مدارهای مجتمع، به راحتی قابل انجام است. اما ساخت و طراحی برد، آنتن و دیگر موارد مداری و در ادامه اندازه گیری و تست آن در دانشگاه محدودیت جدی دارد. در آزمایشگاه آنتن دانشگاه تهران با استفاده از یک میکسر باند E و سیستم موجود در آزمایشگاه توانسته اند که الگوی تشعشعی آنتن را اندازه گیری نمایند. آزمایشگاه موج میلی متری در دانشگاه امیرکبیر نیز اخیرا موجرها و میکسرهای باند E را راه اندازی کرده اند که با استفاده از پایین آورنده و بالا برنده فرکانسی می توان دیگر قطعات فعال و غیر فعال این باند را تا حدودی اندازه گیری کرد اما مساله اصلی کالیبراسیون است [31]. در آزمایشگاه ترارتر دانشگاه تهران نیز اخیرا یک سیستم برای کار در باند E راه اندازی

# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

شده است که تحلیلگر اسکالر شبکه است [32]. همچنین اخیراً مرکز تحقیقات مخابرات نیز یک مخلوط کننده ی ۹۰ گیگاهرتز تهیه نموده است.



شکل ۶. برخی از رادارهای تجاری شده در باند ۲۴ و ۷۷ مرجع [23]

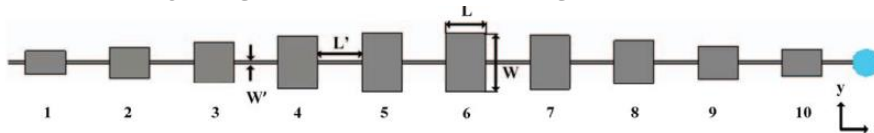
در صورت عدم پیشرفت صنایع اندازه گیری، ساخت و توسعه آنتن ها و مدارها در این حوزه، در داخل کشور با مشکل روبرو می شود. البته این موضوع خود می تواند به عنوان نوآوری مورد تحقیق قرار گیرد و با ارائه راهکاری نوآورانه با وسایل و بوردهای موجود، چالش ایجاد شده در راه پژوهش های مشابه را حل نمود.

### ۳. فرصت های کار پژوهشی

در این حوزه مباحث متعددی در دست بررسی پژوهشگران است. چالش های تحقق عملی این رادارها موجب شده است تا حجم زیادی از پژوهش ها معطوف این حوزه شود. مسائل موجود در این حوزه در سه بخش کلی آنتن ها، طراحی مدار و پردازش تقسیم بندی می شوند.

#### ۱.۳. آنتن ها

از حوالی سال ۲۰۰۷ پژوهش های بسیاری در حوزه طراحی آنتن برای رادار خودرو در باند ۷۷ تا ۸۱ گیگاهرتز انجام شده است. با توجه به اینکه توان خروجی مورد استفاده در فرستنده های این باند معمولاً کمتر از ۱ وات است، از آنتن های آرایه ای و کم تلف استفاده می شود. از طرفی لزوم استفاده از آنتن های با بهره بالا موجب استفاده از ترکیب های آرایه ای در اکثر طرح ها شده است. آنتن های مورد بررسی [33], [34], [43]–[52], [35], [53]–[62], [36], [63]–[72], [37], [73]–[82], [38], [83]–[92], [39], [93]–[98], [40]–[42] از حیث ساختار طراحی به طور معمول در چند دسته جای می گیرند. اکثر طراحی ها مخصوصاً طرح های ارائه شده توسط شرکت های تجاری به شیوه آرایه خطی با تغذیه سری بوده اند. ساختار کلی این نوع آنتن را شکل ۷ ملاحظه می کنید.



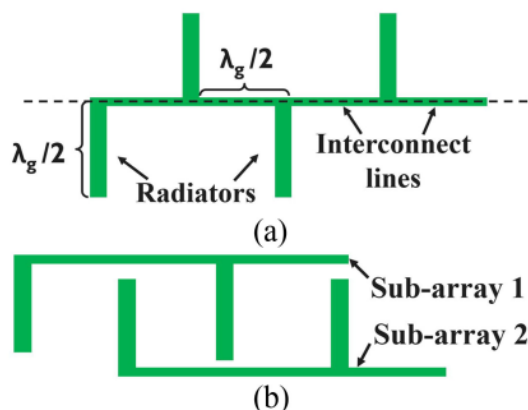
شکل ۷. یک آنتن آرایه ای خطی با تغذیه سری، دارای چهار درجه آزادی

# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

ایده های بسیاری برای پیاده سازی این نوع آنتن، بهبود پهنای باند، بهره و سنتز پترن این نوع آنتن ها ارائه شده است. از مزایای این طراحی، سادگی در طرح، ساخت و ثابت بودن تقریبی پهنای باند به تغییر فرکانس می توان اشاره کرد. دسته دوم آنتن ها، آنتن های خطی شانه ای<sup>۴</sup> هستند. این نوع آنتن ها از یک خط انتقال و تعدادی خط فرعی مدار باز<sup>۳</sup> تشکیل شده و می تواند به صورت خطی یا صفحه ای آرایه شود. این دسته از آنتن ها از حیث درجه آزادی در شکل و تنوع بسیار مورد علاقه پژوهشگران بوده است. شکل (۸) طرح کلی این دسته را نمایش می دهد.



شکل ۸. طرح کلی آنتن های خطی شانه ای (الف - ساختار و ب- شیوه آرایه سازی)

مشکل کلی این نوع آنتن ها، فرکانس گزین بودن و وابستگی بالای باند به تغییر فرکانس است. این مساله موجب می شود تا کار برای کاربردهای راه نزدیک با پهنای باند ۴ گیگاهرتزی پیچیده تر از قبل شود [53].

گروه دیگری از پژوهشگران بر روی آنتن های موج نشستی<sup>۶</sup> بر بستر موجبر ادغام شده در زیرلایه<sup>۷</sup> (SIW) یا ساختارهای چندلایه، طراحی های متنوعی ارائه داده اند. امکان ساخت برد چندلایه [96], [87], [59]، تلفات کم، پهنای باند گسترش یافته به کمک ایجاد محفظه تشدید<sup>۸</sup> در زیر بخش تشعشعی [72] و راحتی اتصال آنتن ها به بخش تغذیه از مزایای این بخش است. در نهایت برخی از کارهای نیز در حوزه موجبرهای گپ یا ایجاد شکاف با طراحی چندلایه ارائه شده است که با توجه به ماشین کاری و فرآیند پیچیده ساخت و تغذیه آن، مورد استقبال قرار نگرفته است [82], [54].

در این بخش طراحی آنتن هایی با قابلیت بهره بالا و SLL پایین، پهن باند کردن، حل مشکلات اندازه گیری و تغذیه ی آنتن ها از جمله چالش هایی است که بر روی آن پژوهش های بسیاری انجام می شود.

## ۲.۳. مدار فرستنده و گیرنده

به طور کلی محققان بسیاری بر روی این قسمت فعالیت می کنند که متأسفانه به علت در دسترس نبودن فناوری GaAs یا SiGe در ایران، فرصت های تحقیقاتی اندکی در ایران در این قسمت موجود است.

## ۳.۳. پردازش

در بخش پردازش مسائل زیادی موجود است که می توان به کمک بوردهای آماده و ایده های جدید قابل پیاده سازی بر آن، فناوری ها و تغییرات جدیدی در محصولات این حوزه را ایجاد نمود. یکی از اصلی ترین چالش ها در این حوزه، تداخل در سیگنال های رادار دو خودروی

<sup>3</sup> Comb-Line  
<sup>3</sup> stub  
<sup>3</sup> Leaky-Wave Antenna  
<sup>3</sup> Substrate Integrated Waveguide  
<sup>3</sup> Cavity Resonator

4  
5  
6  
7  
8

# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

کنار هم است. در این حالت چون مشابه شبکه‌ی سلولی، کانال کاری به هر کاربر داده نمی‌شود. حضور همزمان در جاده منجر به ایجاد تداخل روی هم و از دست رفتن قابلیت‌های آن می‌شود. ایجاد طراحی‌هایی به منظور کاهش تداخل چه در بخش مداری، چه در بخش طراحی شکل پالس و چه در بخش پردازش سیگنال دریافتی از مسائلی است که در این حوزه بسیار پر استقبال است. [9], [99], [108], [101]–[107], [117], [100], [116]–[108].

مساله‌ی شناسایی اهداف نیز خود بحث مفصلی است. از بحث‌های طراحی آرایه، تا شناسایی اهداف و کم کردن اهداف کاذب و همچنین بهبود شناسایی اهداف مختلف از حیث نوع آن‌ها به کمک میکروداپلر مسائل متعدد و جالب این حوزه است. ورودی هوش مصنوعی و الگوریتم‌های پردازش تصویر به این حوزه و یا ترکیب اطلاعات رادار با دوربین به کار رفته در خودروها فرصت‌های بیشماری را برای محققان این حوزه پدید آورده است که تفصیل هر یک در این مقاله از حوصله بحث خارج است.

#### ۴. جمع بندی

در این مقاله، رادارهای خودرو به عنوان یک فناوری نوظهور در آتیه حوزه خودرو، معرفی شده است. مسائل طراحی، نمونه‌های تجاری، فرصت‌های کار تحقیقاتی و سرمایه‌گذاری در این حوزه تشریح شده است و امید است که به زودی مورد استقبال بخش‌های صنعتی و دانشگاهی جهت کار تحقیقاتی و توسعه فناوری در داخل کشور قرار گیرد.

#### منابع

- [1] S. Chatterjee, "A 77 GHz BCB Based High Performance Antenna Array for Autonomous Vehicle Radars," University of Windsor, 2018.
- [2] A. news Agency, "Iran Traffic casualties were announced in 1398 (Hijri) [In Persian]," 2020. <https://www.alef.ir/news/3990220070.html> (accessed Jun. 01, 2020).
- [3] "KOKON Website [Online]." <http://www.kokonproject.com/>.
- [4] S. Machado and S. Mancheno, "Automotive FMCW Radar Development and Verification Methods," 2018, [Online]. Available: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/255195/255195.pdf>.
- [5] M. Mokhtari, "Design and Implementation of an E-band (71-86 GHz) FMCW Radar for Detection of Small Objects [In Persian]," University of Tehran, 2020.
- [6] K. Ramasubramanian and B. Ginsburg, "AWR1243 sensor: Highly integrated 76--81-GHz radar front-end for emerging ADAS applications," *Tech. Rep.*, pp. 1–11, 2017.
- [7] E. H. Kim and K. H. Kim, "Random phase code for automotive MIMO radars using combined frequency shift keying-linear FMCW waveform," *IET Radar, Sonar Navig.*, vol. 12, no. 10, pp. 1090–1095, 2018, doi: 10.1049/iet-rsn.2018.5075.
- [8] A. Santra, A. R. Ganis, J. Mietzner, and V. Ziegler, "Ambiguity function and imaging performance of coded FMCW waveforms with fast 4D receiver processing in MIMO radar," *Digit. Signal Process. A Rev. J.*, vol. 97, p. 102618, 2020, doi: 10.1016/j.dsp.2019.102618.
- [9] F. Uysal, "Phase-Coded FMCW automotive radar: System design and interference mitigation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 1, pp. 270–281, 2020, doi: 10.1109/TVT.2019.2953305.
- [10] F. Lampel *et al.*, "System Level Synchronization of Phase-Coded FMCW Automotive Radars for RadCom," *14th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2020*, 2020, doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135417.
- [11] "User 's Guide AWR1443 BOOST," 2017. [Online]. Available: <https://www.ti.com/tool/AWR1443BOOST>.
- [12] "AWR1443 Single-Chip 77- and 79-GHz FMCW Radar Sensor," *Texas Instruments*, no. April, 2020, [Online]. Available: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/awr1642.pdf?ts=1607596165665&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FAWR1642](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/awr1642.pdf?ts=1607596165665&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FAWR1642).
- [13] "Radar-based driver assistance systems," *Bosch*, 2017.
- [14] "Bosch LRR4 77GHz Long Range Radar Sensor," *Syst. Consult.*, pp. 1–5, 2017.

# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

- [15] "77GHz Radar Transceiver Device Datasheet," *Calterah Semicond.*, 2019.
- [16] T. Challenges, "Automotive radar testing," *Keysight Technol.*, pp. 1–4, 2019.
- [17] S. Narnakaje, "TI 's smart sensors ideal for automated driving applications," *Texas Instruments*, pp. 1–7, 2017.
- [18] "(MR3003 – RD) radar transceiver with integrated signal processing Features," *RFbeam Microw. GmbH* /, pp. 1–21, 2018.
- [19] "Delphi Electronically Scanning Radar," *Delphi*, pp. 1–2, 2009, [Online]. Available: [www.autonomoustuff.com](http://www.autonomoustuff.com).
- [20] "Data Sheet / Datenblatt ARS4-B," *Continental*, pp. 1–2, 2014, [Online]. Available: [www.continental-corporation.com](http://www.continental-corporation.com).
- [21] "XENSIV™ – sensing the world Infineon XENSIV™ solutions from application to sensor Find your sensor," *Infineon*, pp. 1–20, 2020.
- [22] T. Ars, "Continental ARS4-A 77GHz Radar," *Continental*, pp. 1–5, 2017.
- [23] S. Elisabeth and N. Radufe, "Automotive Radar Overview 2018 Teardown and RF analysis of large panel of Radar RF," *Syst. Consult.*, 2018, [Online]. Available: [www.systemplus.fr](http://www.systemplus.fr).
- [24] "Continental ARS4-A," *Continental*, no. March, 2017.
- [25] "TEF810X 76 GHz to 81 GHz car RADAR transceiver 1 General description," *NXP Semicond.*, no. May, pp. 1–13, 2019.
- [26] "AWRx Cascaded Radar RF Evaluation Module (MMWCAS-RF-EVM) SWRU553A–September," *Texas Instruments*, no. September 2019, pp. 1–44, 2020, [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ug/swru553a/swru553a.pdf>.
- [27] "VEHICLE PRODUCTS," *Einstein*, 2017.
- [28] "AWR1243 Single-Chip 77- and 79-GHz FMCW Transceiver 1," *Texas Instruments*, no. April, pp. 1–59, 2020, [Online]. Available: [www.ti.com](http://www.ti.com).
- [29] "Einstein K-77 Long Range Radar featuring Calterah CAL77A2T4R FOWLP Transceiver," *Syst. Consult.*, no. January, 2019.
- [30] T. R. Manual, "77GHz Radar Transceiver Device," *Calterah Semicond.*, pp. 1–46, 2019.
- [31] M. Golcheshmeh, "Design and Implementation of an E-band Radar Front-end (76 ~ 81 GHz) [in Persian]," University of Tehran, 2020.
- [32] B. Aghazadeh, M. Gholami, and M. Neshat, "Toward a low-cost mm-wave scalar network analyzer instrumentation," *2020 28th Iran. Conf. Electr. Eng. ICEE 2020*, pp. 5–8, 2020, doi: 10.1109/ICEE50131.2020.9260917.
- [33] G. Oliveri, G. Gottardi, and A. Massa, "A New Meta-Paradigm for the Synthesis of Antenna Arrays for Future Wireless Communications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 6, pp. 3774–3788, 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2906433.
- [34] J. G. Webster and Y. J. Cheng, "Substrate Integrated Multibeam Antennas," *Wiley Encycl. Electr. Electron. Eng.*, pp. 1–17, 2016, doi: 10.1002/047134608x.w8331.
- [35] S. B. Yeap, X. Qing, and Z. N. Chen, "77-GHz dual-layer transmit-array for automotive radar applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 6, pp. 2833–2837, 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2419691.
- [36] D. Wu, Z. Tong, R. Reuter, H. Gulan, and J. Yang, "A 76.5 GHz microstrip comb-line antenna array for automotive radar system," *2015 9th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2015*, pp. 76–79, 2015.
- [37] A. Vorobyov *et al.*, "Iris-based 2-bit waveguide phase shifters and transmit-array for automotive radar applications," *Proc. 6th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2012*, pp. 3711–3715, 2012, doi: 10.1109/EuCAP.2012.6206079.
- [38] S. B. Yeap, X. Qing, and Z. N. Chen, "77-GHz Dual-Layer Transmit-Array for Automotive," vol. 63, no. 6, pp. 2833–2837, 2015.

# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

- [39] J. G. Webster, P. Feng, S. Qu, and L. Xiao, "Advances in Transmitarray Antennas," *Wiley Encycl. Electr. Electron. Eng.*, pp. 1–30, 2020, doi: 10.1002/047134608x.w8407.
- [40] M. K. T. Al-Nuaimi, W. Hong, and A. Mahmoud, "Design of high gain reflectarray antenna for 77GHz applications," *2017 IEEE 6th Asia-Pacific Conf. Antennas Propagation, APCAP 2017 - Proceeding*, pp. 1–3, 2018, doi: 10.1109/APCAP.2017.8420412.
- [41] K. T. Pham, A. Clemente, E. Fourn, F. Diaby, L. Dussopt, and R. Sauleau, "Low-Cost Metal-Only Transmitarray Antennas at Ka-Band," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 18, no. 6, pp. 1243–1247, 2019, doi: 10.1109/LAWP.2019.2913571.
- [42] A. Jaiswal, S. Dey, M. P. Abegaonkar, and S. K. Koul, "A 77-GHz polarization-agile microelectromechanical system antenna," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 62, no. 6, pp. 2300–2306, 2020, doi: 10.1002/mop.32292.
- [43] E. Erfani, S. Safavi-Naeini, and S. Tatu, "Design and analysis of a millimetre-wave high gain antenna," *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 13, no. 10, pp. 1586–1592, 2019, doi: 10.1049/iet-map.2018.5768.
- [44] Z. N. Chen and X. Qing, "Planar transmit-array antenna and plano-convex lens antenna for 77-GHz automotive radar," *2017 IEEE-APS Top. Conf. Antennas Propag. Wirel. Commun. APWC 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 225–227, 2017, doi: 10.1109/APWC.2017.8062286.
- [45] O. Yurduseven, T. Fromenteze, C. Decroze, and V. F. Fusco, "Frequency-Diverse Computational Automotive Radar Technique for Debris Detection," *IEEE Sens. J.*, vol. 20, no. 22, pp. 13167–13177, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.3004065.
- [46] H. C. Chen, T. Chiu, and C. L. Hsu, "Design of series-fed bandwidth-enhanced microstrip antenna array for millimetre-wave beamforming applications," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/3857964.
- [47] D. Polarized, M. Wave, A. Antennas, and A. W. Communications, "Kent Academic Repository Design and Synthesis of Dual Polarized," 2020.
- [48] D. Thesis and T. Wissenschaften, "Differential feed antenna in millimeter wave Radar applications," 2020.
- [49] A. G. Derneryd, "Linearly Polarized Microstrip Antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 24, no. 6, pp. 846–851, 1976, doi: 10.1109/TAP.1976.1141445.
- [50] F. Zardi, P. Nayeri, P. Rocca, and R. Haupt, "Artificial Intelligence for Adaptive and Reconfigurable Antenna Arrays: A Review," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 63, no. 3, pp. 28–38, 2021, doi: 10.1109/MAP.2020.3036097.
- [51] Z. Tong, A. Stelzer, C. Wagner, R. Feger, and E. Kolmhofer, "A Novel Differential Microstrip Patch Antenna and Array at 79 GHz," *Int. Symp. Antennas Propag.*, pp. 3–7, 2008.
- [52] A. E. Gera, "The Radiation Resistance of a Microstrip Element," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 38, no. 4, pp. 568–570, 1990, doi: 10.1109/8.52277.
- [53] W. A. Ahmad, M. Kucharski, and A. Ergintav, "Wide Fan-Beam Antenna Array Architecture," no. March, pp. 21–32, 2020.
- [54] G. R. Su, E. S. Li, T. W. Kuo, H. Jin, Y. C. Chiang, and K. S. Chin, "79-GHz Wide-Beam Microstrip Patch Antenna and Antenna Array for Millimeter-Wave Applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 200823–200833, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3035750.
- [55] W. A. Ahmad, J. H. Lu, Di. Kissinger, and H. Jalli Ng, "Beam squinting in wideband 60 GHz on-board series-fed differential patch arrays," *Asia-Pacific Microw. Conf. Proceedings, APMC*, pp. 13–16, 2017, doi: 10.1109/APMC.2017.8251365.
- [56] U. Beaskoetxea *et al.*, "77-GHz high-gain Bull's-eye antenna with sinusoidal profile," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 205–208, 2015, doi: 10.1109/LAWP.2014.2360215.
- [57] D. Yang, H. Zhai, C. Guo, and H. Li, "A Compact Single-Layer Wideband Microstrip Antenna with Filtering Performance," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 19, no. 5, pp. 801–805, 2020, doi: 10.1109/LAWP.2020.2980631.
- [58] A. Mazzinghi, A. Freni, A. Agostini, L. Bossio, and M. Albani, "Industrial Antenna Development for 77-GHz

# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

- Level-Crossing Monitoring Radar [Antenna Applications Corner],” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 60, no. 5, pp. 95–106, 2018, doi: 10.1109/MAP.2018.2859160.
- [59] M. Mosalanejad, I. Ocket, C. Soens, and G. A. E. Vandenbosch, “Multi-Layer PCB Bow-Tie Antenna Array for (77-81) GHz Radar Applications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 2379–2386, 2020, doi: 10.1109/TAP.2019.2949723.
- [60] G. F. Hamberger, S. Spath, U. Siart, and T. F. Eibert, “A mixed circular/linear dual-polarized phased array concept for automotive radar - Planar antenna designs and system evaluation at 78 GHz,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 3, pp. 1562–1572, 2019, doi: 10.1109/TAP.2018.2883640.
- [61] L. Qin, Y. Lu, Q. You, Y. Wang, J. Huang, and P. Gardner, “Millimeter-wave slotted waveguide array with unequal beamwidths and low sidelobe levels for vehicle radars and communications,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 11, pp. 10574–10582, 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2866245.
- [62] J. Xu, W. Hong, Z. H. Jiang, and H. Zhang, “Low-profile circular patch array fed by slotted substrate integrated waveguide,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 2, pp. 960–970, 2019, doi: 10.1109/TAP.2018.2882618.
- [63] J. Xu, W. Hong, H. Zhang, and Y. Yu, “Design and measurement of array antennas for 77GHz automotive radar application,” *2017 10th UK-Europe-China Work. Millimetre Waves Terahertz Technol. UCMMT 2017*, 2017, doi: 10.1109/UCMMT.2017.8068356.
- [64] C. G. Salzburg, T. Vaupel, T. Bertuch, M. Wilhelm, T. Wichmann, and S. T. Alfageme, “Feasibility of an automotive radar antenna at 77 GHz on LTCC substrate,” *IET Radar, Sonar Navig.*, vol. 12, no. 10, pp. 1172–1178, 2018, doi: 10.1049/iet-rsn.2018.5018.
- [65] N. Sönmez, F. Tokan, and N. T. Tokan, “Double lens antennas in millimeter-wave automotive radar sensors,” *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, vol. 32, no. 10, pp. 901–907, 2017.
- [66] T. Binzer, M. Klar, and V. Groß, “Development of 77 GHz radar lens antennas for automotive applications based on given requirements,” *INICA 2007 Int. Conf. Antennas - Proc.*, no. 1, pp. 205–209, 2007, doi: 10.1109/INICA.2007.4353963.
- [67] Z. Chen and Z. Y. Ping, “24-GHz microstrip grid array antenna for automotive radars application,” *Proc. 2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conf. Synth. Aperture Radar, APSAR 2015*, pp. 125–127, 2015, doi: 10.1109/APSAR.2015.7306170.
- [68] C. Metz, E. Lissel, and A. F. Jacob, “Planar multiresolutional antenna for automotive radar,” *2001 31st Eur. Microw. Conf. EuMC 2001*, pp. 1–4, 2001, doi: 10.1109/EUMA.2001.338931.
- [69] Z. Mekkioui, “Synthesis of shaped patterns with series & corporate fed microstrip patch arrays,” *Model. Meas. Control A*, vol. 65, no. 2, pp. 43–48, 1995.
- [70] J. Zhao, L. Zou, R. Jiang, X. Wang, and H. Gao, “Hybrid antenna arrays with high angular resolution for 77 GHz automotive radars,” *IEICE Electron. Express*, vol. 17, no. 2, pp. 1–6, 2020, doi: 10.1587/elex.16.20190687.
- [71] H. A. Helaly, M. Serry, and E. A. Soliman, “Novel Integrated Antenna Array for Automotive Radars Operating at 77 GHz,” *13th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2019*, no. EuCAP, pp. 1–5, 2019.
- [72] C. P. Chao *et al.*, “A series-fed cavity-back patch array antenna for a miniaturized 77GHz radar module,” *2019 IEEE Int. Symp. Antennas Propag. Usn. Radio Sci. Meet. APSURSI 2019 - Proc.*, pp. 657–658, 2019, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888699.
- [73] S. Yang, L. Zhang, J. Fu, Z. Zheng, X. Zhang, and A. Liao, “Design and optimization for 77 GHz series-fed patch array antenna based on genetic algorithm,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 11, pp. 1–10, 2020, doi: 10.3390/s20113066.
- [74] S. Yasini, K. Mohammadpour-Aghdam, and M. Mohammad-Taheri, “Low-cost comb-line-fed microstrip antenna arrays with low sidelobe level for 77 ghz automotive radar applications,” *Prog. Electromagn. Res. M*, vol. 94, no. November 2019, pp. 189–199, 2020, doi: 10.2528/PIERM20042303.
- [75] A. Och, C. Pfeffer, J. Schrattecker, S. Schuster, and R. Weigel, “A scalable 77 GHz massive MIMO FMCW radar by cascading fully-integrated transceivers,” *Asia-Pacific Microw. Conf. Proceedings, APMC*, vol. 2018-Novem, pp. 1235–1237, 2019, doi: 10.23919/APMC.2018.8617548.

# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

- [76] D. H. Shin, K. B. Kim, J. G. Kim, and S. O. Park, "Design of low side lobe level millimeter-wave microstrip array antenna for automotive radar," *ISAP 2013 - Proc. 2013 Int. Symp. Antennas Propag.*, vol. 2, pp. 677–680, 2013.
- [77] Q. Zhang and L. Wang, "Millimeter-Wave Microstrip Comb-Line Antenna Array for Automotive Radar," *2018 12th Int. Symp. Antennas, Propag. EM Theory*, no. 2, pp. 1–3, 2018.
- [78] T. Yuan, J. Y. Li, L. W. Li, L. Zhang, and M. S. Leong, "A novel series-fed taper antenna array design and analysis," *Asia-Pacific Microw. Conf. Proceedings, APMC*, vol. 4, pp. 5–7, 2005, doi: 10.1109/APMC.2005.1606890.
- [79] E. G. Turitsyna and S. Webb, "Simple design of FBG-based VSB filters for ultra-dense WDM transmission ELECTRONICS LETTERS 20th January 2005," *Electron. Lett.*, vol. 41, no. 2, pp. 40–41, 2005, doi: 10.1049/el.
- [80] J. Freese, R. Jakoby, H. L. Blocher, and J. Wenger, "Synthesis of microstrip series-fed patch arrays for 77 GHz-sensor applications," *Asia-Pacific Microw. Conf. Proceedings, APMC*, p. 3, 2000, doi: 10.1109/apmc.2000.925711.
- [81] B. H. Ku *et al.*, "A 77-81-GHz 16-element phased-array receiver with  $\pm 50^\circ$  beam scanning for advanced automotive radars," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 62, no. 11, pp. 2823–2832, 2014, doi: 10.1109/TMTT.2014.2354134.
- [82] A. Haddadi, C. Bencivenni, and T. Emanuelsson, "Gap Waveguide Slot Array Antenna for Automotive Applications at E-Band," *13th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2019*, no. EuCAP, pp. 1–4, 2019.
- [83] J. Chandrakala and P. Shanthi, "Design and Simulation of Microstrip Comb-Line Array Antenna at 78.5GHz for Automotive Radar Applications," *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 696–699, 2020, doi: 10.35940/ijeat.e9826.069520.
- [84] B. Jian, J. Yuan, and Q. Liu, "Procedure to Design a Series-fed Microstrip Patch Antenna Array for 77 GHz Automotive Radar," *2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Sci. Wirel. Technol. Conf. CSQRWC 2019 - Proc.*, vol. 1, no. 4, pp. 1–2, 2019, doi: 10.1109/CSQRWC.2019.8799356.
- [85] Z. Chen and S. Otto, "A taper optimization for pattern synthesis of microstrip series-fed patch array antennas," *Eur. Microw. Week 2009 Sci. Prog. Qual. Radiofreq. Conf. Proc. - 2nd Eur. Wirel. Technol. Conf. EuWIT 2009*, no. September, pp. 160–163, 2009.
- [86] M. Shirazi and R. Safian, "Wide-band series-fed patch antenna array with low side lobes," *2019 IEEE Int. Symp. Antennas Propag. Usn. Radio Sci. Meet. APSURSI 2019 - Proc.*, pp. 1507–1508, 2019, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888578.
- [87] M. Mosalanejad, I. Ocket, C. Soens, and G. A. E. Vandenbosch, "Wideband Compact Comb-Line Antenna Array for 79 GHz Automotive Radar Applications," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 17, no. 9, pp. 1580–1583, 2018, doi: 10.1109/LAWP.2018.2853804.
- [88] A. Omar, S. Al-Saif, M. A. Ashraf, and S. Alshebeili, "Design and analysis of millimeter wave series fed microstrip patch array for next generation wireless communication systems," *2016 17th Int. Symp. Antenna Technol. Appl. Electromagn. ANTEM 2016*, pp. 15–16, 2016, doi: 10.1109/ANTEM.2016.7550139.
- [89] K. Baur, M. Mayer, S. Lutz, and T. Walter, "77 GHz automotive radar sensors: Antenna concept for angular measurements in azimuth and elevation," *IEEE Radio Wirel. Symp. RWS*, pp. 100–102, 2013, doi: 10.1109/RWS.2013.6486654.
- [90] W. Yang, Y. Yang, W. Che, L. Gu, and X. Li, "A novel 24-GHz series-fed patch antenna array for radar system," *2016 IEEE Int. Work. Electromagn. iWEM 2016 - Proceeding*, pp. 8–10, 2016, doi: 10.1109/iWEM.2016.7505065.
- [91] A. Rida, M. Tentzeris, and S. Nikolaou, "Design of low cost microstrip antenna arrays for mm-Wave applications," *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, pp. 2071–2073, 2011, doi: 10.1109/APS.2011.5996916.
- [92] C. Yi and W. Dou, "Microstrip series fed antenna array for millimeter wave automotive radar applications," *IEEE MTT-S Int. Microw. Work. Ser. Millim. Wave Wirel. Technol. Appl. IMWS 2012 - Proceeding*, no. September 2012, pp. 183–185, 2012, doi: 10.1109/IMWS2.2012.6338245.
- [93] J. Xu, W. Hong, H. Zhang, G. Wang, Y. Yu, and Z. H. Jiang, "An Array Antenna for Both Long- and Radar Applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 12, pp. 7207–7216, 2017.
- [94] X. Shang, F. S. Zhang, R. He, and H. J. Zhang, "A 77GHz Miniaturized Microstrip Antenna Array for Automotive



# یازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

- Radar,” *2019 Int. Conf. Microw. Millim. Wave Technol. ICMMT 2019 - Proc.*, pp. 2019–2021, 2019, doi: 10.1109/ICMMT45702.2019.8992300.
- [95] J. Yan, H. Wang, J. Yin, C. Yu, and W. Hong, “Planar series-fed antenna array for 77 GHz automotive radar,” *2017 IEEE 6th Asia-Pacific Conf. Antennas Propagation, APCAP 2017 - Proceeding*, pp. 1–3, 2018, doi: 10.1109/APCAP.2017.8420639.
- [96] M. Mosalanejad, I. Ocket, C. Soens, and G. A. E. Vandenbosch, “Low-cost multi-layer parasitic patch antenna array for 79 GHz automotive radar applications,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 61, no. 1, pp. 56–62, 2019, doi: 10.1002/mop.31526.
- [97] L. Shi, C. Bencivenni, R. Maaskant, J. Wettergren, J. Pragt, and M. Ivashina, “High-Efficiency and Wideband Aperiodic Array of Uniformly Excited Slotted Waveguide Antennas Designed Through Compressive Sensing,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 5, pp. 2992–2999, 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2891647.
- [98] R. Q. Lee and K. F. Lee, “Experimental Study of the Two-Layer Electromagnetically Coupled Rectangular Patch Antenna,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 38, no. 8, pp. 1298–1302, 1990, doi: 10.1109/8.56971.
- [99] S. Sanka, “Radar to radar interference for 77GHz automotive radar,” Delft University of Technology, 2017.
- [100] J. Bechter, C. Sippel, and C. Waldschmidt, “Bats-inspired frequency hopping for mitigation of interference between automotive radars,” *2016 IEEE MTT-S Int. Conf. Microwaves Intell. Mobility, ICMIM 2016*, 2016, doi: 10.1109/ICMIM.2016.7533928.
- [101] C. Aydogdu *et al.*, “Radar interference mitigation for automated driving,” *arXiv*, no. July, 2019.
- [102] S. Skaria, A. Al-Hourani, R. J. Evans, K. Sithamparamanathan, and U. Parampalli, “Interference mitigation in automotive radars using pseudo-random cyclic orthogonal sequences,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 20, pp. 1–21, 2019, doi: 10.3390/s19204459.
- [103] A. Correas-Serrano and M. A. Gonzalez-Huici, “Sparse reconstruction of chirplets for automotive FMCW radar interference mitigation,” *2019 IEEE MTT-S Int. Conf. Microwaves Intell. Mobility, ICMIM 2019*, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/ICMIM.2019.8726758.
- [104] F. Uysal, “Phase-Coded FMCW automotive radar: System design and interference mitigation,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 1, pp. 270–281, 2020, doi: 10.1109/TVT.2019.2953305.
- [105] T. Moon, J. Park, and S. Kim, “BlueFMCW: Random frequency hopping radar for mitigation of interference and spoofing,” *arXiv*, pp. 1–8, 2020.
- [106] C. Knill, J. Bechter, and C. Waldschmidt, “Interference of chirp sequence radars by OFDM radars at 77 GHz,” *2017 IEEE MTT-S Int. Conf. Microwaves Intell. Mobility, ICMIM 2017*, pp. 147–150, 2017, doi: 10.1109/ICMIM.2017.7918878.
- [107] J. Rock, M. Toth, E. Messner, P. Meissner, and F. Pernkopf, “Complex signal denoising and interference mitigation for automotive radar using convolutional neural networks,” *arXiv*, 2019.
- [108] S. Neemat, O. Krasnov, and A. Yarovoy, “An interference mitigation technique for FMCW radar using beat-frequencies interpolation in the STFT domain,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 67, no. 3, pp. 1207–1220, 2019, doi: 10.1109/TMTT.2018.2881154.
- [109] F. Jin and S. Cao, “Automotive Radar Interference Mitigation Using Adaptive Noise Canceller,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 4, pp. 3747–3754, 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2901493.
- [110] N. C. Ristea, A. Anghel, and R. T. Ionescu, “Fully Convolutional Neural Networks for Automotive Radar Interference Mitigation,” *arXiv*, no. 3, 2020, doi: 10.36227/techrxiv.11919102.
- [111] C. Aydogdu, M. F. Keskin, N. Garcia, H. Wymeersch, and D. W. Bliss, “RadChat: Spectrum Sharing for Automotive Radar Interference Mitigation,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 416–429, 2021, doi: 10.1109/TITS.2019.2959881.
- [112] Y. S. Son, H. K. Sung, and S. W. Heo, “Automotive frequency modulated continuous wave radar interference reduction using per-vehicle chirp sequences,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 9, 2018, doi: 10.3390/s18092831.
- [113] G. Hakobyan, K. Armanious, and B. Yang, “Interference-aware cognitive radar: A remedy to the automotive interference problem,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 56, no. 3, pp. 2326–2339, 2020, doi:

یازدهمین کنگره ملی سراسری  
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران  
11<sup>th</sup> National Congress of  
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

- 10.1109/TAES.2019.2947973.
- [114] J. Overvest, F. Jansen, F. Laghezza, F. Uysal, and A. Yarovoy, "Uncorrelated interference in 79 GHz FMCW and PMCW automotive radar," *Proc. Int. Radar Symp.*, vol. 2019-June, pp. 1–8, 2019, doi: 10.23919/IRS.2019.8768181.
- [115] M. Rameez, *Interference Mitigation Techniques in FMCW Automotive Radars*. 2020.
- [116] J. Mun, S. Ha, and J. Lee, "Automotive Radar Signal Interference Mitigation Using RNN with Self Attention," *ICASSP, IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. - Proc.*, vol. 2020-May, pp. 3802–3806, 2020, doi: 10.1109/ICASSP40776.2020.9053013.
- [117] S. Alland, W. Stark, M. Ali, and M. Hegde, "Interference in Automotive Radar Systems: Characteristics, mitigation techniques, and current and future research," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 36, no. 5, pp. 45–59, 2019, doi: 10.1109/MSP.2019.2908214.