

Design and Fabrication of E-field Probe for Measuring and Continuous Monitoring at the First 5G Pilot

Reza Bahri*, Mehdi Fasnaghari**, Ahmad Reza Eskandari ***, Vahid Yazdani**

*Academic staff member, Research Institute of Communication and Information Technology, Tehran, Iran x

**Assistant Professor, ICT Research Institute (ITRC), Tehran, Iran

***Ph.D., Islamic Azad University, Tehran East Branch, Department of Electrical Engineering

Abstract:

In this paper, a device for measuring the electric fields intensity in the environment is designed and presented in the 5G frequency band, including the frequency range of 3400 ~ 3600 MHz. This device, called the 5G electric probe, is realized by three orthogonal antennas, in connection to filter circuits and power detectors. The proposed antenna is a strip monopole antenna, and these orthogonal antennas can receive the electric fields in all directions uniformly and isotropically. The proposed filter is a coupled-line microstrip filter that has the ability to remove out-of-band signals. The proposed power detector is able to operate linearly over a wide dynamic range and convert the fields received from the antenna and filter sections to suitable DC voltages for digital processing. Finally, the designed 5G electric probe is fabricated and tested. The measurements confirm the proper operation of the probe in terms of dynamic range, accuracy, sensitivity, and the linearity and isotropicity of the received electric fields.

Keywords: Electric probe, 5G, power detector, dynamic range.

طراحی و ساخت پرآب اندازه‌گیری و پایش پیوسته شدت تشعشعات میدان‌های الکتریکی در اولین پایلوت نسل پنجم شبکه‌های ارتباطی ایران

رضا بحری*، مهدی فسنگری** احمدرضا اسکندری***، وحید یزدانیان**

* عضو هیات علمی، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

** استادیار، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

***دکتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، گروه مهندسی برق

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۹

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در این مقاله ابزاری برای اندازه‌گیری شدت میدان‌های الکتریکی موجود در محیط، در باند فرکانسی 5G شامل بازه فرکانسی ۳۴۰۰ تا ۳۶۰۰ مگاهرتز، طراحی و ارائه می‌گردد. این وسیله که همان پرآب الکتریکی 5G نامیده می‌شود، با استفاده از سه آنتن عمود برهم، به همراه مدارات فیلتر و آشکار ساز توان، پیاده سازی می‌گردد. آنتن پیشنهادی یک آنتن تک-قطبی نواری بوده که این آنتن‌ها در سه جهت عمود بر هم، قادر هستند میدان‌های الکتریکی را در همه جهات بصورت یکنواخت و همسانگرد دریافت کنند. فیلتر پیشنهادی از نوع فیلتر دو خط کوپل-شده میکرواستریپ می‌باشد که توانایی حذف سیگنال‌های خارج از باند را دارا می‌باشد. آشکار ساز توان پیشنهادی، قادر است در رنج دینامیکی وسیعی، بصورت خطی عمل کرده و میدان‌های دریافتی از بخش آنتن و فیلتر را به ولتاژهای مناسب جهت پردازش تبدیل کند. در نهایت، پرآب طراحی شده ساخته می‌شود. اندازه‌گیری‌ها، عملکرد مناسب پرآب را از نظر رنج دینامیکی، دقت، حساسیت و میزان خطی بودن و ایزوتروپیک بودن میدان‌های الکتریکی دریافتی، تأیید می‌نماید.

واژگان کلیدی: پرآب الکتریکی، 5G، آشکار ساز توان، رنج دینامیکی، پایلوت نسل پنجم شبکه‌های ارتباطی

رگولاتوری بوده و بر همین اساس کمیسیون بین المللی حفاظت در برابر پرتوهای غیر یونساز (ICNIRP) و همچنین استاندارد ملی ایران به شماره ۸۵۶۷ به منظور پایش تشعشعات تجهیزات رادیویی مطابق حدود استاندارد تشعشعات مورد توجه قرار گرفته است. لذا نیاز به سامانه عملیاتی که این پایش مستمر را انجام دهد نیز به عنوان اولین گام در رعایت بهداشت تشعشعات الزامی می‌باشد. با ظهور فناوری‌های نوین ارتباطات سلولی نظیر نسل‌های پنجم و ششم که باعث چگال‌تر شدن شبکه در سطح شهرها و محله‌های مسکونی، دغدغه تشعشعات الکترومغناطیسی بیش از پیش مورد توجه خواهد بود. با توجه به راه اندازی اولین پایلوت نسل پنجم

۱. مقدمه

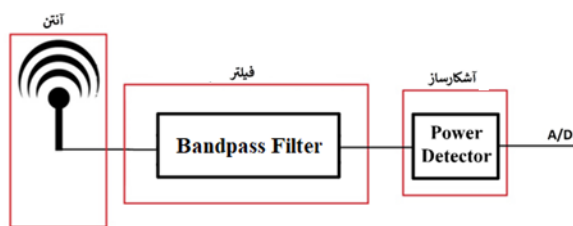
امروزه با گسترش روز افزون شبکه‌های ارتباطی و به تبع آن شبکه‌های رادیویی، موضوع تشعشعات الکترومغناطیسی به عنوان یکی از دغدغه‌های جدی شهروندان مطرح شده است. ابزار پایش و اندازه‌گیری شدت تشعشعات ناشی از دکل‌ها و سیستم‌های مخابراتی، سامانه‌های اندازه‌گیری تجمعی شدت تشعشعات الکترومغناطیسی هستند. دغدغه بهداشت تشعشعات به عنوان یکی از اصول بنیادین حقوق شهروندی مورد توجه دولت‌ها و نهادهای

^۱ نویسنده مسئول: مهدی فسنگری fasanghari@itrc.ac.ir

بر همین اساس پراب مورد نظر در این مقاله، باند فرکانسی مخابرات سیار 5G شامل ۳۴۰۰ تا ۳۶۰۰ مگاهرتز را در بر گرفته، و با استفاده از سه آنتن عمود برهم به همراه مدارات فیلتر و آشکار ساز پیاده سازی می گردد. بر این اساس، در بخش دوم این مقاله، بلوک دیگرام کلی پراب ارائه شده و به دنبال آن، در بخش سوم به طراحی و ساخت سه بخش اجزای پراب، پرداخته می شود. در نهایت، مجموعه کل پراب ساخته می شود و پارامترهای آن اندازه گیری می گردد. اندازه گیری های انجام شده، عملکرد مناسب پراب را از نظر رنج دینامیکی، دقت، حساسیت و میزان خطی بودن و ایزوتروپیک بودن میدان های الکتریکی دریافتی، تأیید می نماید. هر چند که تشعشعات الکتریکی در فضای آزاد صرفاً مربوط به نسل پنجم شبکه های ارتباطی نیستند و در حال حاضر فناوری های سلولی دیگر نظیر 2G، 3G و 4G نیز در حال ارائه خدمات به کاربران هستند، لذا برای بررسی همه جانبه اثرات تجمعی تشعشعات نیازمند طراحی و ساخت پراب های متناسب با هر فناوری می باشد. این نوع پراب ها در گذشته توسط پژوهشگران مختلف طراحی و ساخته شده است و با ظهور و بروز فناوری های نوین لازم است تا پراب های متناسب با باند فرکانسی آنها نیز طراحی و ساخته شوند. لذا این مقاله صرفاً به طراحی، ساخت و اندازه گیری با پراب نسل پنجم ارتباطی می پردازد.

۲. طرح پیشنهادی پراب الکتریکی نسل پنجم

طرح پیشنهادی پراب دریافت کننده تشعشعات امواج رادیویی در باند فرکانسی 5G، شامل بازه فرکانسی ۳۴۰۰ تا ۳۶۰۰ مگاهرتز، در شکل ۱ ملاحظه می گردد. همانطور که این شکل نشان می دهد این ساختار از سه بخش اساسی تشکیل شده است که عبارتند از آنتن، فیلتر میان گذر و آشکار ساز توان. آنتن، میدان های الکتریکی را که در باند فرکانسی 5G (یا همان بازه فرکانسی ۳۴۰۰ تا ۳۶۰۰ مگاهرتز) هست دریافت کرده، سپس فیلتر سیگنال هایی را که در خارج از این باند فرکانسی قرار گرفته اند، حذف می کند و در نهایت به کمک آشکار ساز توان این میدان ها تبدیل به ولتاژ DC شده و به کمک سیم های انتقال برای پردازش به بخش دیجیتال ارسال می گردد.



شکل ۱. بلوک دیگرام کلی مربوط به طرح پیشنهادی پراب 5G

پراب الکتریکی که وظیفه دریافت امواج الکتریکی در فضای آزاد را دارد بر روی یک دستگاه پایه اندازه گیر نصب می شود. در شکل ۲

شبکه های ارتباطی کشور در پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات (مرکز تحقیقات مخابرات ایران) و با در نظر گرفتن تجربیات گذشته در طراحی و ساخت سامانه های اندازه گیری تجمعی شدت تشعشعات رادیویی، پراب الکتریکی نسل پنجم شبکه های ارتباطی طراحی، شبیه سازی و ساخته شد.

در یک نگاه کلان سازگاری الکترومغناطیسی به سیستمی اطلاق می شود که علاوه بر اینکه باعث تداخل در دیگر سیستم های نمی شود (EMI) بلکه تأثیر پذیری الکترومغناطیسی (EMS) نیز ندارد. از این رو استانداردهایی در جهت تعیین حداکثر میزان تشعشعات الکترومغناطیسی وسایل الکتریکی و الکترونیکی نگارش شده اند. پراب های میدان نزدیک الکتریکی و مغناطیسی و همچنین پراب های مماسی از جدیدترین پژوهش های ارائه شده در این حوزه است [۱]-[۳].

در همین راستا و همگام با تدوین استانداردها، وسایلی جهت اندازه گیری میزان این تشعشعات (در جهت اجرای استانداردها) طراحی و ساخته شده اند [۴]-[۱۰].

در اندازه گیری میدان های الکترومغناطیسی، سنسورهایی که برای اندازه گیری شدت میدان های الکترومغناطیسی بکار می روند، به پراب های الکترومغناطیسی معروف هستند. میدان های الکترومغناطیسی در ناحیه میدان های دور، با استفاده از سنسورهایی اندازه گیری می شوند که مؤلفه های میدان الکتریکی یا میدان مغناطیسی را آشکار می کنند. در این میدان های دور، میدان الکترومغناطیسی عرضی بوده و رابطه بین میدان های الکتریکی و مغناطیسی ثابت و مستقل از فرکانس است و با داشتن یکی، دیگری قابل محاسبه خواهد بود. در چنین شرایطی، یکی از انواع این سنسورها را می توان برای تعیین شدت هر دو میدان استفاده نمود، که معمولاً این سنسور پراب میدان الکتریکی می باشد [۸]، [۹].

پراب های الکتریکی ارائه شده در تحقیقات اخیر، در بازه های فرکانسی پهن باندی که معمولاً از فرکانس های زیر ۱ گیگا هرتز شروع شده و بعضاً تا بالای ۲۰ گیگا هرتز می باشد، اندازه گیری میدان های الکتریکی را انجام می دهند. این پراب ها از سه بخش اساسی تشکیل شده اند که عبارتند از: آنتن دایپل الکتریکی، دیود آشکار ساز و خط انتقال مقاوم [۶]، [۷]. هنوز پرابی گزارش نشده است که بطور خاص قابلیت دریافت و اندازه گیری باند فرکانسی جدید 5G را دارا باشد.

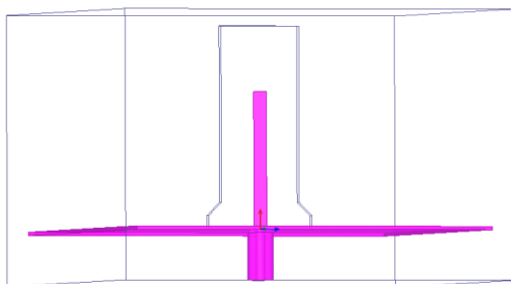
در این مقاله، به طراحی و ساخت پراب الکتریکی 5G ارائه می شود. هر چند که هنوز باند فرکانسی مربوط به 5G در نهاد های استاندارد گذاری و رگولاتوری معتبر بین المللی بطور دقیق مشخص نشده است اما بر اساس مطالعات انجام شده بیش از ۷۰ درصد از ایستگاه های راه اندازی شده در دنیا در بازه فرکانسی بین ۱ تا ۶ گیگاهرتز و بطور دقیق تر در بازه ۳۴۰۰ تا ۳۶۰۰ مگاهرتز هستند.

۱.۳ طراحی و ساخت آنتن

آنتن‌های متعددی با ساختارهای مختلف برای دریافت باند فرکانسی 5G مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۱]–[۱۷]. در اینجا، ساختار این نوع آنتن به گونه‌ای است که از یک شاخه آنتن نواری تک-قطبی تشکیل شده است، بطوری که طول این شاخه در مرکز باند فرکانسی (یعنی $f_0 = 350 \text{ MHz}$) برابر ربع طول موج می‌باشد. این آنتن در نرم‌افزار HFSS شبیه‌سازی شده و در شکل ۳ نشان داده شده است. ابعاد این آنتن بعد از بهینه‌سازی در شکل ۴(الف) مشاهده می‌گردد. این آنتن پس از طراحی، شبیه‌سازی، ساخت و اندازه‌گیری در شکل ۴(ب) ملاحظه می‌گردد.

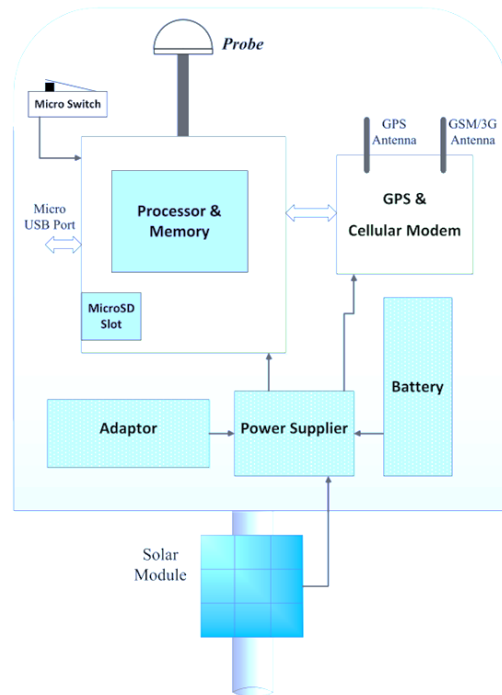
نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری پارامتر افت بازگشتی این آنتن، در شکل ۶ مقایسه شده است. تطابق قابل قبول این دو نتیجه، صحت طراحی را تأیید می‌نماید. همچنین الگوی تشعشعی آنتن در صفحه yz (به ازای $\phi = 0$) که در شکل ۶ نشان داده شده است، بیانگر دریافت تقریباً همه جهته و ایزوتروپیک بودن این آنتن می‌باشد. اندازه‌گیری افت بازگشتی آنتن توسط دستگاه Agilent network analyzer N5230A انجام شده است که در آزمایشگاه‌های پژوهشگاه موجود است. بر روی نتایج بدست آمده، از طرفی برازش منحنی انجام شده است، به همین دلیل با نتایج عددی خام که مستقیماً از اندازه‌گیری بدست آمده است، کمی متفاوت می‌باشد. بهره ماکزیمم آنتن حدود 3dBi می‌باشد که مشابه آنتن‌های Omni می‌باشد.

به دلیل اینکه در کاربرد مورد نظر، جهت‌دهی و بهره آنتن اهمیتی نداشته و مهم omni بودن آن است، به بهره آنتن پرداخته نشده است. هرچند برای محاسبه توان رسیده به آنتن، بهره آنتن هم نیاز هست، ولی در اینجا ولتاژ خروجی آشکارساز توان، بیانگر توان دریافتی آنتن می‌باشد. این ولتاژ در اتاق آنتن به ازای فرکانس‌های مختلف به گونه‌ای کالیبره می‌شود که در نهایت خروجی دستگاه، معادل توان دریافتی آنتن باشد. در واقع با وجود اینکه آنتن ایزوتروپیک نیست، ولی به کمک کالیبراسیون، در نهایت خروجی ایزوتروپیک تحویل می‌دهد.



شکل ۳. آنتن طراحی و شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار HFSS

بلوک‌دیگرام دستگاه پایه اندازه‌گیری پرتوهای الکتریکی نمایش داده شده است. توان پرتوهای الکتریکی از طریق پراب اندازه‌گیری می‌شود و به بخش پردازش (Processor) ارسال می‌شود. بخش پردازش میانگین اندازه‌گیری‌ها را در بازه مناسب ذخیره می‌نماید. همچنین کلیه بخش‌ها توسط بخش پردازش کنترل می‌شوند. ارتباط بخش پردازش با بیرون از طریق USB، کارت SD، و مودم شبکه سلولی می‌باشد. وظیفه مودم که هم از نسل دوم GSM/GPRS و هم از نسل سوم 3G پشتیبانی می‌نماید، برقراری ارتباط دستگاه با مرکز کنترل می‌باشد. در واقع مرکز کنترل، اطلاعات همه دستگاه‌های اندازه‌گیری یک منطقه جغرافیایی را جمع‌آوری می‌کند و فرامین کنترلی لازم را برای آنها ارسال می‌نماید. همچنین، بخش مودم، دارای GPS نیز می‌باشد که موقعیت دستگاه را با استفاده از سیستم ماهواره ای GPS، ثبت می‌نماید. یک میکروسویچ نیز برای تشخیص و هشدار باز بودن دستگاه قرار داده شده است. در بخش تامین توان، دو راه‌کار تغذیه از طریق برق شهر و تغذیه از طریق انرژی خورشیدی پیش‌بینی شده است.



شکل ۲. طرح کلی دستگاه پایه اندازه‌گیر پرتوهای الکتریکی

۳. طراحی اجزای پراب الکتریکی نسل پنجم

مهمترین چالش‌های موجود در روند طراحی، دریافت میدان‌ها در باند فرکانسی 5G، تفکیک این باند از کل بازه فرکانسی و در نهایت آشکارسازی مناسب می‌باشد. بنابراین ملاحظات در طراحی آنتن و فیلتر و انتخاب آشکارساز توان مورد نیاز است که باید مد نظر قرار گیرند.

گفته می‌شود. این فیلتر در تحقیقات اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۸]-[۲۱]. زیرلایه مورد نظر برای ساخت این فیلتر ROG4003 در نظر گرفته شده است. بر این اساس، می‌توان مشخصات فیلتر مورد نیاز را در جدول ۱ خلاصه نمود.

جدول ۱. مشخصات فیلتر CLM مربوط به پراب 5G

درجه فیلتر	۵
فرکانس مرکزی	۳۵۰۰ MHz
پهنای باند	۲۰۰ MHz (۵/۷%)
نوع فیلتر	CLM
تکنولوژی ساخت	مایکرواستریپ
زیرلایه	RO4003 ($\epsilon_r=3/55$)
ضخامت زیرلایه	$h=0/8$ mm

یک فیلتر CLM از اتصال $N+1$ جفت خط کوپل شده ساخته می‌شود که N درجه فیلتر می‌باشد. ساختار فیلتر CLM در شکل ۶ نشان داده شده است. روابط طراحی مربوط به این نوع فیلتر به شرح ذیل است [۲۲]:

$$Z_0 J_1 = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{2g_1}} \quad (1)$$

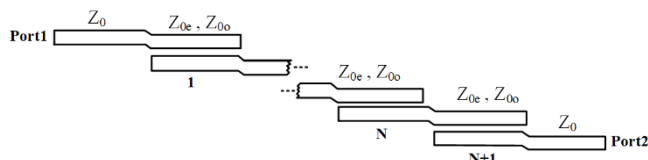
$$Z_0 J_n = \frac{\pi \Delta}{2\sqrt{g_{n-1}g_n}}, \quad n = 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

$$Z_0 J_{N+1} = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{2g_N g_{N+1}}} \quad (3)$$

در این روابط، Z_0 امپدانس مشخصه خط انتقال تغذیه، Δ ، پهنای باند نسبی، g_n ، مقادیر نرمالیزه المان‌های فیلتر پایین‌گذر نمونه، و J_n ، ادمیتانس مشخصه معکوس‌کننده‌های J می‌باشد. به کمک J_n ها می‌توان امپدانس مشخصه مود زوج (Z_{0e}) و امپدانس مشخصه مود فرد (Z_{0o}) مربوط به هر جفت خط کوپل شده را از روابط زیر بدست آورد:

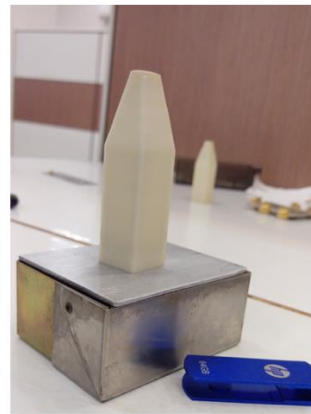
$$Z_{0e} = Z_0 [1 + JZ_0 + (JZ_0)^2] \quad (4)$$

$$Z_{0o} = Z_0 [1 - JZ_0 + (JZ_0)^2] \quad (5)$$

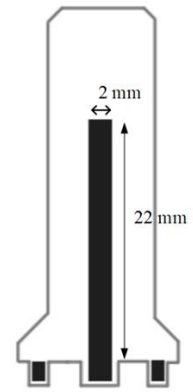


شکل ۷. ساختار کلی یک فیلتر CLM

با توجه به اینکه درجه فیلتر $N=5$ انتخاب شده است، به یک فیلتر با ۶ جفت خط کوپل شده نیاز می‌باشد. بنابراین، بر اساس مشخصات فیلتر و روابط طراحی (۱) تا (۵)، ابتدا Z_{0e} و Z_{0o} برای ۶



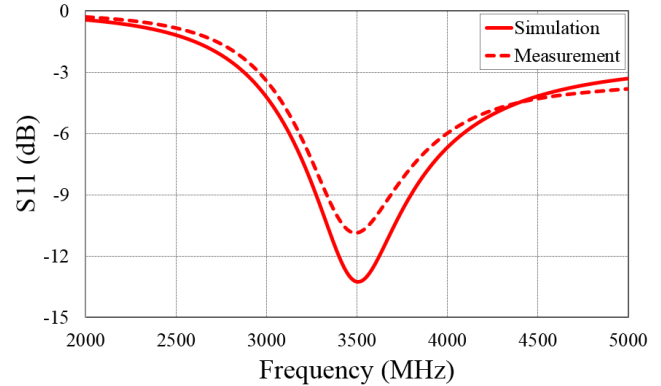
(ب)



(الف)

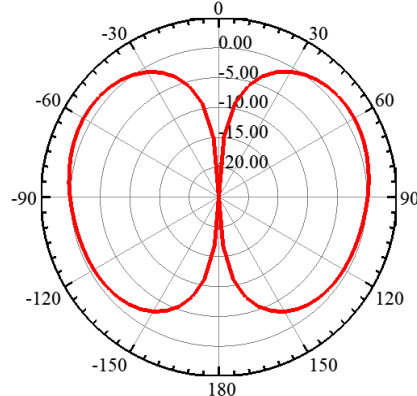
شکل ۴. (الف) طرح نهایی آنتن ساخته شده و نمایش ابعاد آنتن

(ب) نمونه ساخته شدهی آنتن.



شکل ۵. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مربوط به پاسخ فرکانسی افت

بازگشتی آنتن



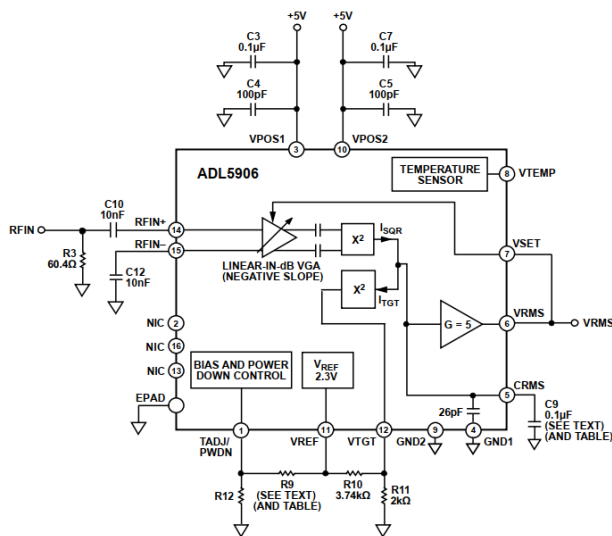
شکل ۶. نتایج اندازه‌گیری الگوی تشعشعی آنتن در فرکانس ۳/۵ گیگا هرتز

۲.۳ طراحی و ساخت فیلتر میان‌گذر باند 5G

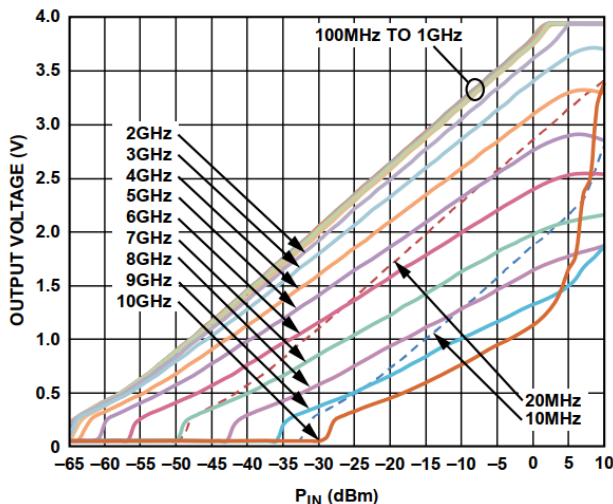
همانطور که اشاره شد یکی از بخش‌های اصلی پراب، فیلتر میان‌گذر در باند فرکانسی 5G می‌باشد. این فیلتر باید بنحوی عمل کند که سیگنال‌هایی که در بازه فرکانسی ۳۴۰۰ تا ۳۶۰۰ مگاهرتز قرار گرفته را عبور داده و سیگنال‌های خارج باند را با افت مناسبی حذف نماید. برای حذف مناسب سیگنال‌های خارج باند، درجه فیلتر برابر با ۵ انتخاب می‌شود. همچنین فیلتر مناسب برای این کار یک فیلتر میان‌گذر باند-باریک با فناوری مایکرواستریپ و از نوع فیلتر دوخط-کوپل شده^۱ انتخاب شده است، که به اختصار به آن فیلتر CLM

^۱ Coupled-Line Microstrip

تبدیل نماید. آشکارساز انتخاب شده یک IC از شرکت ANALOG DEVICES با نام تجاری ADL5906 موجود است. مشخصات پایه‌های این IC به همراه مدار جانبی پیشنهادی آن در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد. این آشکارساز در بازه فرکانسی ۱۰ مگاهرتز تا ۱۰ گیگاهرتز عملکرد خوبی داشته و همانطور که شکل ۱۰ نشان می‌دهد در باند فرکانسی 5G به ازای توان‌های ورودی -۶۰ dBm تا +۵ dBm بصورت خطی عمل کرده و بنابراین دارای رنج دینامیکی حدود ۶۵ dB می‌باشد و می‌تواند عملکرد خوبی در پراب مورد نظر ایجاد کند. بطور کلی، علت این انتخاب، بازه فرکانسی و رنج دینامیکی قابل قبول این محصول می‌باشد.



شکل ۱۰. مدار داخلی آشکارساز ADL5906 به همراه نمایش پایه‌ها و مدارات پیشنهادی جانبی



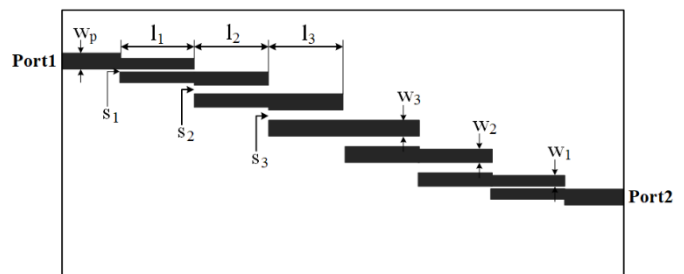
شکل ۱۱. منحنی‌های ولتاژ خروجی ایجاد شده توسط ADL5906 بر حسب توان‌های ورودی دریافتی به ازای فرکانس‌های مختلف در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد

همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، حساسیت ADL5906 و رنج دینامیکی آن در پهنای باند فرکانسی ۳۴۰۰ تا ۳۶۰۰ مگاهرتز تقریباً ثابت می‌باشد.

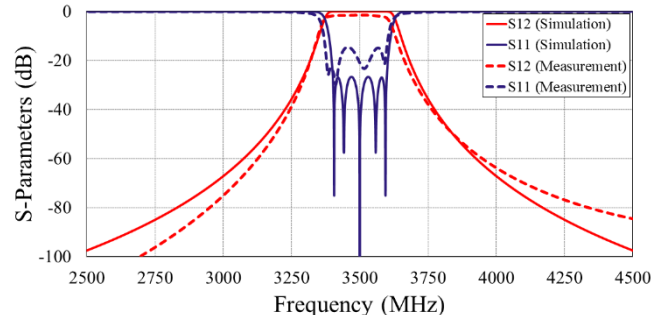
جفت خط کوپل شده محاسبه شده، سپس با توجه به مشخصات زیرلایه، ابعاد نهایی فیلتر (طول، عرض و فاصله خطوط) محاسبه می‌گردد. شبیه‌سازی این فیلتر در نرم افزار HFSS انجام شده و پارامترهای هندسی این ساختار برای رسیدن به مشخصات مورد نیاز، بهینه سازی شده است. مقادیر بهینه شده این پارامترها در جدول ۲ مشاهده می‌شود. در این جدول، به دلیل تقارن فیلتر، پارامترهای سه بخش از مدار (نیم مدار) ارائه شده است. طرح نهایی این فیلتر که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد، ساخته شده و توسط دستگاه تحلیلگر شبکه، پارامترهای پراکندگی آن، اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۹ نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری فیلتر CLM را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج اندازه‌گیری وجود دارد که صحت طراحی را تأیید می‌کند. این اختلافات در اثر اتصالات کانکتورها و لحیم کاری در ساخت ایجاد شده است که در شبیه‌سازی در نظر گرفته نشده است.

جدول ۲. مقادیر بهینه شده مربوط به پارامترهای فیلتر CLM

s(mm)	w(mm)	l (mm)	Z _{0s} (Ω)	Z _{0e} (Ω)	n
۰/۱۸	۱/۲۴	۱۲/۹۵	۳۸/۷	۷۳/۲	۱
۱/۰۸	۱/۶۵	۱۳	۴۵/۸	۵۴/۹	۲
۱/۳۲	۱/۷۹	۱۲/۸۵	۴۷/۱	۵۳/۳	۳



شکل ۸. طرح نهایی فیلتر CLM



شکل ۹. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری فیلتر CLM

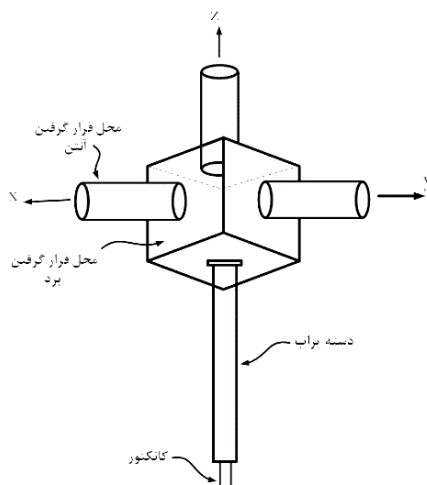
۳.۳ انتخاب آشکارساز توان مناسب

بعد از دریافت سیگنال توسط آنتن و فیلتر شدن آنها، نیاز به آشکارساز مناسبی است که سیگنال RF را به یک سیگنال DC

۴. نتایج نهایی ساخت و اندازه گیری

در نهایت ساختار کلی پراب، در شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد. آنتن‌ها در محفظه ای قرار می‌گیرند که از جنس ABS می‌باشد. همچنین بردهای مربوط به مدارهای فیلترها و آشکارساز توان هر کدام در یک وجه مکعب قرار می‌گیرند. بدین ترتیب سه وجه عمود بر هم مکعب نشان داده شده در شکل ۱۴، سه محور پروب را شامل می‌شوند. خروجی هر محور بعد از آشکارساز به کمک سیم‌های انتقال به سمت بخش دیجیتال جهت پردازش انتقال داده می‌شود.

این سیم‌های انتقال مربوط به هر محور از پروب، در دسته پروب قرار می‌گیرد. جنس دسته پروب از PVC است. در انتهای دسته پروب یک کانکتور قرار گرفته است، که برای انتقال سیگنال و تغذیه، بین پروب و بخش پایه سامانه اندازه‌گیری، استفاده می‌شود. در راستای بهبود عملکرد پروب در دماهای مختلف، از یک حسگر دمایی در قسمت دسته پروب کمک گرفته می‌شود. این حسگر دمایی بر روی یکی از محورهای پروب قرار گرفته است. از دمای اندازه‌گیری شده برای تصحیح خطای (انحراف) ناشی از تغییرات دمایی، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

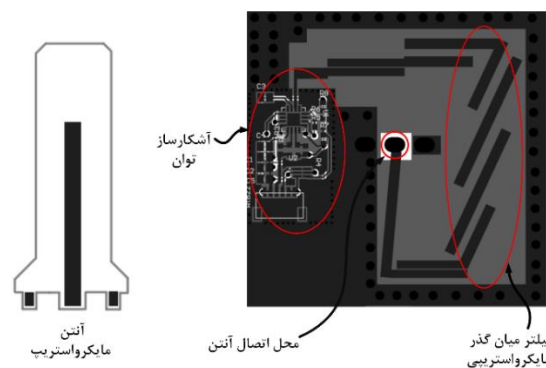


شکل ۱۴. ساختار کلی پراب 5G

در نهایت، پراب طراحی شده، ساخته شد که تصویر آن در اتاق آنتن در شکل ۱۵ مشاهده می‌گردد.

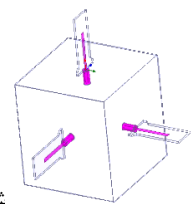
اندازه‌گیری‌ها و کالیبراسیون کامل این پراب در اتاق آنتن انجام می‌گیرد. از جمله مهمترین تست‌ها، اندازه‌گیری میزان خطی بودن^۱ پراب و محاسبه رنج دینامیکی آن می‌باشد. این تست در اتاق آنتن در فرکانس ۳۵۰۰ مگا هرتز انجام شده است. به این ترتیب که، به کمک یک مولد سیگنال و تقویت کننده، توان ورودی به آنتن فرستنده در اتاق آنتن از 0dBm تا 55dBm تغییر می‌کند، و ولتاژ خروجی دریافت شده توسط آشکارساز ADL5906، توسط ولتمتر اندازه‌گیری می‌شود.

پس از طراحی و تأیید صحت عملکرد هر سه بخش مربوط به پراب 5G، باید بتوان این سه بخش را در اتصال با هم و در کمترین فضای ممکن، قرار داد. طرح نهایی مربوط به آنتن، فیلتر و آشکارساز توان در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این شکل، محل اتصال آنتن، مدار میکرواستریبی فیلتر CLM، و محل تعبیه IC مربوط به آشکارساز به همراه مدارات جانبی آن مشاهده می‌گردد. فیلتر به همراه آشکارساز بر روی یک برد مربعی - شکل به ابعاد ۵۵*۵۵ mm² جای گرفته است و آنتن نواری در قسمت پشت برد و بصورت عمود بر برد قرار گرفته و در محل اتصال، لحیم می‌گردد. بدین ترتیب این مجموعه ساخته شده و توانایی دریافت میدان‌های الکتریکی باند مخبرات سیار 5G را دارا می‌باشد.



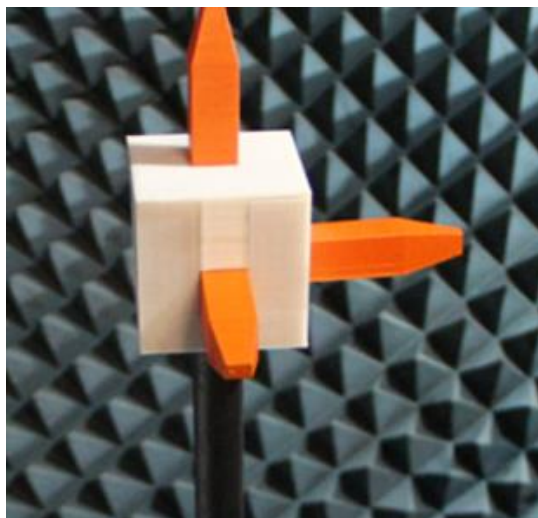
شکل ۱۲. طرح نهایی ساخته شده مربوط به پراب 5G

مجموعه ساخته شده، فقط در جهت یک محور، توانایی دریافت تشعشعات الکترومغناطیسی را دارا می‌باشد. برای اندازه‌گیری میدان الکتریکی کل، باید میدان الکتریکی در سه جهت عمود بر هم اندازه‌گیری شود. در واقع، برای ایزوتروپیک (همسانگرد) بودن پراب، اندازه‌گیری در سه محور X، Y، و Z انجام می‌شود. به جز جهت آنتن، ساختار دریافت سیگنال در سه محور یکسان است. به عبارت دیگر هر پروب الکتریکی 5G از سه آنتن عمود بر هم تشکیل شده است که در شکل ۱۳ مشاهده می‌گردد و هر کدام بطور جداگانه از مدارهای فیلتر و آشکارساز توان برخوردار هستند. این مجموعه داخل یک محفظه مکعبی شکل قرار می‌گیرد.

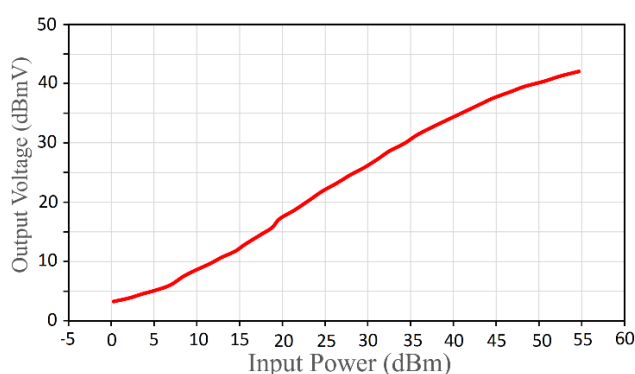


شکل ۱۳. چیدمان سه آنتن عمود بر هم برای دریافت ایزوتروپیک میدان‌ها

¹ Linearity



شکل ۱۵. پراب ساخته شده در اتاق آنتن در حال آزمون



شکل ۱۶. منحنی اندازه‌گیری ولتاژ خروجی دریافت شده بر حسب توان ورودی ارسال شده در فرکانس ۳ گیگاهرتز

نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری‌های مربوط به این پراب، با پراب‌های محصولات جدید شرکت Wavecontrol مقایسه گردید. می‌توان گفت این پراب به عنوان اولین محصولی است که توانایی دریافت و اندازه‌گیری شدت میدان‌های الکتریکی را در باند فرکانسی 5G دارا بوده و در عین حال قابلیت‌های پراب‌های مشابه را دارا می‌باشد.

۵. پایلوت نسل پنجم شبکه های ارتباطی

از جمله مهم‌ترین اقدامات در گذر از نسل‌های مختلف ارتباطات سیار به نسل‌های نوین، اجرای پایلوت به صورت محدود و سپس پیاده‌سازی آن در سطح وسیع است. در حال حاضر تعداد محدودی از کشورها، شبکه نسل پنجم شبکه ارتباطی را اجرا کرده‌اند اما بیشتر کشورها در حال پیاده‌سازی یا اجرای پایلوت آن هستند. کاهش تأخیر، ظرفیت بالای دسترسی، قابلیت اطمینان بسیار بالا، ارتقا ارتباطات موبایل پهن باند و قابلیت اتصال و ارتباط اشیا در سطح بسیار وسیع از جمله ویژگی‌های نسل پنجم ارتباطی است که این فناوری نوین ارتباطی را به عنوان یک فناوری تحول ساز که سایر جنبه‌های فناوری را نیز متحول می‌کند مطرح ساخته است. اجرای پایلوت نسل پنجم ارتباطی در پژوهشگاه، اولین گام دستیابی به بستر توسعه و آزمون نسل پنجم شبکه ارتباطی در کشور است. اجرای پایلوت و در ادامه،

نتایج این اندازه‌گیری در شکل ۱۶ ملاحظه می‌شود. همانطور که شکل ۱۶ نشان می‌دهد، با افزایش توان ورودی، ولتاژ خروجی هم بصورت خطی افزایش می‌یابد و با توجه به شکل، رنج دینامیکی حدود 50dB برای این اندازه‌گیری قابل ملاحظه می‌باشد.

در نهایت، عملکرد این پراب پس از کالیبراسیون، از نظر باند فرکانسی میدان‌ها، بازه اندازه‌گیری شدت میدان‌های الکتریکی، رنج دینامیکی، حساسیت، دقت، میزان خطی بودن و ایزوتروپیک بودن میدان‌ها، مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار گرفته است که نتایج آن در جدول ۳ ملاحظه می‌شود. نتایج اندازه‌گیری با نتایج حاصل از محصول شرکت Wavecontrol مقایسه شده است.

جدول ۳. نتایج اندازه‌گیری پراب 5G

نوع پراب	پراب پیشنهادی مقاله	پراب Wavecontrol
باند فرکانسی	5G (۳۴۰۰-۳۶۰۰ MHz)	GSM900 GSM1800 3G2100 & 4G
بازه اندازه‌گیری شدت میدان الکتریکی	۰/۲ - ۶۵ V/m	۰/۴ - ۶۵ V/m
رنج دینامیکی	۵۰ dB	۶۴ dB
حساسیت	۰/۲ V/m	۰/۲ V/m
دقت	۰/۵ dB	۰/۵ dB
میزان خطی بودن	± ۱ dB	± ۱/۲ dB
تغییرات ایزوتروپیک	± ۱/۹ dB	± ۱/۷ dB
تغییرات نسبت به دما	± ۰/۸ dB @ ۱۰°C to ۴۰°C	± ۱ dB
ابعاد ^۳ cm	۳۰۰*۱۰/۵*۱۰/۵	۳۵۰*۱۲*۱۲
وزن	۳۵۰g	۴۵۰g

- [3] G. Li et al., "Ultrawideband Differential Magnetic Near Field Probe With High Electric Field Suppression," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 14, pp. 7669-7676, 15 July 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2981764.
- [4] S. i. Kwak, B. C. Kim, and H. D. Choi, "Analysis of isotropic deviation of the electric-fields probe in the personal exposure measurement meter," *ICTC 2012*, 235-237, Oct. 2012.
- [5] S. i. Kwak, J. H. Kwon and Y. J. Yoon, "Experimental Results of an E-Field Probe Using Variable Resistors to Improve Performance," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1369-1372, 2016.
- [6] S. I. Kwak, J. H. Kwon and Y. J. Yoon, "Design of the E-field probe for mobile communication bands in the personal exposure meter," *The 18th IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE 2014)*, Jeju, Korea (South), 2014, pp. 1-2.
- [7] S. I. Kwak, J. H. Kwon and Y. J. Yoon, "Design of the E-field probe with variable resistors," *2014 International Symposium on Antennas and Propagation Conference Proceedings*, Kaohsiung, Taiwan, 2014, pp. 353-354.
- [8] S. I. Kwak, B. C. Kim, H. D. Choi, and Y.J. Yoon, "Design of the electric-fields probe in the personal exposure meter," *PIERS Proceedings*, Stockholm, Sweden, Aug. 12-15, 2013.
- [9] E. S. Pires, P. I. L. Ferreira, G. Fontgalland, M. A. B. de Melo, R. M. Valle and T. P. Vuong, "Design of a UWB antenna for sensor and wireless systems applications," *2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, Hannover, Germany, 2008, pp. 185-188.
- [10] M. Kanda, "Standard probes for electromagnetic field measurements," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 41, no. 10, pp. 1349-1364, Oct. 1993.
- [11] X. Zhang and B. Huang, "The design of the elliptic monopole omnidirectional antenna," *2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, Xi'an, China, 2017, pp. 1-3.
- [12] R.A. Sadeghzadeh, M.A. Honarvar, A.R. Eskandari, "Coplanar-fed UWB elliptical patch antenna with notched band characteristics," *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, Xi'an, China, March 22-26, 2010.
- [13] M. N. Hasan and M. Seo, "A Planar 3.4 -9 GHz UWB Monopole Antenna," *2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Busan, Korea (South), 2018, pp. 1-2.
- [14] C. Li, X. Zhu, P. Liu and C. Yu, "Novel wideband omnidirectional monopole antenna for indoor communication environment," *12th European*

راه اندازی بستر توسعه و آزمون نسل پنجم شبکه ارتباطی در پژوهشگاه، امکان مشارکت و حمایت از استارت آپ ها، دانشگاه ها، شرکت ها و سایر بخش های خصوصی برای بهره برداری از خدمات این پایلوت در لایه های مختلف توسعه شبکه، فراهم خواهد شد. ایجاد زمینه توسعه بومی و داخلی زیرساخت های سخت افزاری و نرم افزاری جهت ارائه سرویس در سال های پیش رو، از جمله مهم ترین کاربردهای این پایلوت در ادامه پیاده سازی طرح کلان نسل پنجم شبکه ارتباطی خواهد بود. سامانه اندازه گیری شدت تشعشعات الکترومغناطیسی برای میدان الکتریکی تا فرکانس ۱۸ گیگاهرتز و میدان مغناطیسی تا فرکانس ۱۰۰ مگاهرتز در پژوهشگاه طراحی و ساخته شده است. پراب الکتریکی تلفن همراه نیز در گذشته برای فناوری های ارتباطی تا نسل چهارم نیز طراحی و ساخته شده بود [۲۳].

با طراحی و ساخت طراحی و ساخت پراب اندازه گیری و پایش پیوسته شدت تشعشعات میدان های الکتریکی برای نسل پنجم ارتباطی، باعث توسعه سبد محصولات پژوهشگاه در زمینه اندازه گیری شدت تشعشعات پرتوهای الکترومغناطیسی می شود.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله، یک پراب الکتریکی 5G برای اندازه گیری شدت میدان های الکتریکی باند فرکانسی 5G شامل بازه فرکانسی ۳۴۰۰ تا ۳۶۰۰ مگا هرتز طراحی و ساخته شد. محدوده دینامیکی میدان های الکتریکی در بازه ۰/۲ تا ۶۵ V/m اندازه گیری گردید که رنج دینامیکی حدود ۵۰ dB را تأیید می کند. مهمترین ویژگی این پراب، توانایی اندازه گیری میدان های الکتریکی، با تغییرات پاسخ فرکانسی قابل قبول ± 1 dB و با میزان ایزوتروپیک $1/9$ dB \pm می باشد. می توان از این پراب در جهت پایش شدت تشعشعات میدان الکتریکی در راستای فراهم آوردن بستری مناسب در جهت اجرای بهداشت محیط، استفاده نمود.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مادی و معنوی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات (مرکز تحقیقات مخابرات ایران) انجام شده است.

مراجع

- [1] Mediano, "Using Near Field Probes in Electronic Circuits," *PCIM Europe 2022; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2022, pp. 1-9, doi: 10.30420/565822011.
- [2] Z. He, L. Wang, L. Chen, R. Luo and Q. H. Liu, "A Wideband Tangential Electric Field Probe and a New Calibration Kit for Near-Field Measurements," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, no. 7, pp. 3557-3565, July 2022, doi: 10.1109/TMTT.2022.3174593.

- [20] W. Zhang, K. Ma, H. Zhang and H. Fu, "Design of a Compact SISL BPF With SEMCP for 5G Sub-6 GHz Bands," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 12, pp. 1121-1124.
- [21] Y. I. A. Al-Yasir, N. OjaroudiParchin, A. Abdulkhaleq, K. Hameed, M. Al-Sadoon and R. Abd-Alhameed, "Design, Simulation and Implementation of Very Compact Dual-band Microstrip Bandpass Filter for 4G and 5G Applications," *2019 16th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*, Lausanne, Switzerland, 2019, pp. 41-44.
- [22] G. Matthaei, E.M.T. Jones, L. Young, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, Artech House books, 1980.
- [23] آرزومند، مسعود، پژوهش طراحی و اجرای سامانه اندازه گیری شدت تشعشعات پرتوهای رادیویی، پژوهشکده فناوری ارتباطات، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، ۱۳۹۸
- Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018), London, UK, 2018, pp. 1-3.
- [15] M. Arrawatia, M. S. Baghini and G. Kumar, "Broadband omnidirectional antenna for GSM900, GSM1800, 3G, 4G and Wi-Fi applications," *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Diego, CA, USA, 2017, pp. 329-330.
- [16] L. Zhao, Z. Chen and J. Wang, "A Wideband Dual-Polarized Omnidirectional Antenna for 5G/WLAN," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 14266-14272, 2019.
- [17] J. Xie, Y. Gao and C. Y. Xia, "A design of three-band monopole antenna applied to 4G/5G," *2020 International Conference on Computer Communication and Network Security (CCNS)*, Xi'an, China, 2020, pp. 99-103.
- [18] N. N. Al-Areqi, N. Seman and T. A. Rahman, "Parallel-coupled line bandpass filter design using different substrates for fifth generation wireless communication applications," *2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Hobart, TAS, Australia, 2015, pp. 1-4.
- [19] Y. Guan, Y. Wu and M. M. Tentzeris, "A Bidirectional Absorptive Common-Mode Filter Based on Interdigitated Microstrip Coupled Lines for 5G "Green" Communications," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 20759-20769, 2020.