

در این مقاله، ابتدا ضمن ارائه مقدمه‌ای بر فناوری ۵G، توضیحاتی در مورد نحوه عملکرد شبکه‌های مبتنی بر این فناوری و کلیاتی از رهنمودهای پرتوگیری از این شبکه‌ها ارائه می‌شود. در ادامه، با معرفی و بررسی ویژگی‌های شبکه‌های ۵G و فناوری‌های مورد استفاده در این شبکه‌ها، میزان پرتوگیری در آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. اصول شبکه‌های ۵G

۵G نسلی از ارتباطات سیار است که عملکرد تلفن همراه را در میان کاربران دچار تحول کرده است. این فناوری برای افزایش کارایی طیف و ارائه برنامه‌های کاربردی جدید از طریق نرخ داده گیگابیتی، تأخیر کم و قابلیت اطمینان بالا طراحی شده است و می‌تواند پشتیبانی کارآمدی را برای اتصالات انبوه اینترنت اشیا فراهم کند. افزایش کارایی طیف به این معنی است که برای انتقال مقدار مشخصی از اطلاعات به پهنای باند و انرژی کمتری نیاز است. نرخ داده ارائه شده توسط شبکه‌های ۵G تا ۱۰۰ برابر سریع‌تر از شبکه‌های 4G است و با تأخیر شبکه به شدت کاهش یافته‌ای از دسترسی آنی به خدمات و برنامه‌های کاربردی پشتیبانی می‌کند [۸]. علاوه بر این، فناوری ۵G برش شبکه^۲ را ارائه می‌دهد که امکان اختصاص بخشی منحصر به فرد از شبکه را برای یک سرویس خاص فراهم می‌کند.

۵G نیز مانند سایر انواع ارتباطات رادیویی همچون پخش رادیویی و تلویزیونی، ارتباطات ماهواره‌ای و نسل‌های قبلی شبکه‌های تلفن همراه، از امواج رادیویی برای انتقال اطلاعات بین ایستگاه‌های پایه و دستگاه‌های متصل شده^۵ به شبکه استفاده

مکرر ممکن است سبب ایجاد حساسیت الکترومغناطیسی^۱ یا اختلالات عصبی شود.

اگرچه بحث در مورد نگرانی‌های بهداشتی مربوط به پرتوگیری از میدان‌های الکترومغناطیسی در نسل‌های قبلی فناوری تلفن همراه نیز وجود داشته است، اما معرفی فناوری جدید ۵G و استفاده از طیف موج میلی‌متری و سلول‌های کوچک^۲ در آن باورهای جدیدی را در رابطه با پرتوگیری از این شبکه‌ها ایجاد کرده است. از سوی دیگر، با توجه به این که در شبکه‌های ۵G، برای پشتیبانی از نرخ بیت مورد نیاز سرویس‌های جدید و پاسخگویی به تقاضای کاربران موبایل، استقرار و توسعه ایستگاه‌های پایه بیش‌تری مورد نیاز است، این توسعه همراه با پیاده‌سازی فناوری‌های جدیدی همچون اینترنت اشیا^۳ (IoT)، نگرانی‌های پیش‌تر ذکر شده را تشدید کرده است [۳-۵]. چنین عواملی باعث ایجاد جنبش‌های ضد ۵G و تلاش‌هایی برای از بین بردن دکل‌های تجهیزات رادیویی آن شده است.

به‌طور کلی، از آن‌جاکه تجهیزات ۵G به شبکه‌های مخابراتی موجود اضافه می‌شود، ممکن است افزایش اندکی در پرتوگیری رادیویی ایجاد کنند، اما مطابق اندازه‌گیری‌های انجام شده، سطح کلی یا تجمعی پرتوگیری بسیار کمتر از حدودی است که توسط استانداردها تعیین شده است [۶]. از طرفی، استفاده از فرکانس‌های بالاتر در ۵G به معنای ایجاد پرتوگیری بیش‌تر یا شدیدتری نیست. فرکانس‌های موج میلی‌متری پیش‌بینی شده و مورد استفاده در ۵G فرکانس‌های جدیدی نیستند و قبلاً استفاده از آن‌ها در اسکنرهای امنیتی فرودگاه‌ها، رادارهای سنجش سرعت و لینک‌های مایکروویو، به شکل غیرعمومی رایج بوده است [۷].

1 Electromagnetic Hypersensitivity

حساسیت الکترومغناطیسی به احساسی اطلاق می‌شود که اگرچه فاقد مبنایی علمی در پزشکی است، اما افراد دارای این حساسیت علائمی مانند سردرد، خستگی، استرس، اختلالات خواب، علائم پوستی مانند سوزش، و درد در

عضلات را به هنگام مواجهه با سطوح میدان‌های الکترومغناطیسی بسیار کمتر از سطوح مجاز بین‌المللی تجربه می‌کنند.

² Small cell

³ Internet of Things

⁴ Network slicing

⁵ Connected devices

می‌کند. امواج رادیویی شکلی از میدان‌های الکترومغناطیسی هستند که توسط آنتن‌ها ارسال و دریافت می‌شوند.

۱.۲. نحوه کارکرد شبکه‌های 5G

پیاده‌سازی‌های اولیه شبکه‌های 5G در فرکانس‌هایی مشابه با فرکانس‌های شبکه‌های 3G، 4G و Wi-Fi انجام شده است. به این ترتیب، بسیاری از سایت‌ها و دکل‌های آنتن و زیرساخت‌های شبکه‌های پیشین مجدداً توسط 5G مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در شبکه‌های 5G برای دستیابی به ظرفیت بالاتر، از فرکانس‌های موج میلی‌متری نیز استفاده می‌شود. امواج رادیویی در فرکانس‌های موج میلی‌متری دارای برد کوتاه‌تری نسبت به امواج مورد استفاده در شبکه‌های 4G (یا باندهای پایین‌تر فرکانسی مورد استفاده در شبکه‌های 5G) هستند. این امواج با توجه به برد کوتاه خود در سلول‌های کوچک استفاده می‌شوند [۹]. ایستگاه‌های پایه این سلول‌ها که دارای آنتن‌های کوچک و سطح توان تابشی پایینی هستند بر روی تیرهای چراغ‌های برق خیابانی یا در داخل ساختمان‌ها نصب می‌شوند. پیش‌بینی می‌شود که تعداد زیادی از سلول‌های کوچک برای ایجاد ظرفیت و پوشش مورد نیاز شبکه‌های 5G در این شبکه‌ها مستقر شوند.

شبکه‌های 5G از ترکیب سلول‌های کوچک با فناوری‌های آنتن‌های هوشمند برای ارائه سیگنال‌های رادیویی به کاربران استفاده می‌کنند [۱۰]. آنتن‌های هوشمند می‌توانند ظرفیت شبکه را افزایش داده و کارایی آن را بهبود بخشند. پوشش رادیویی آنتن‌های همه جهتی مشابه با نوردهی نورافکنی است که منطقه وسیعی را روشن می‌کند، درحالی‌که نحوه پوشش‌دهی آنتن‌های هوشمند مانند روشنایی حاصل از چراغ‌قوه‌ای است که تنها یک

ناحیه کوچک را روشن می‌کند. به این ترتیب با استفاده از شکل-دهی پرتو^۱ و هدایت^۲ آن توسط آنتن‌های هوشمند تنها نقطه مورد نظر تحت پوشش قرار می‌گیرد و شدت سیگنال در سایر نقاطی که نیازی به سرویس‌دهی ندارند، به شدت کاهش می‌یابد. در واقع تنها کسری از توان کلی ایستگاه پایه 5G به هر کاربر مجزا تابش می‌شود. در شبکه‌های 5G، برای بهبود قابل توجه عملکرد شبکه، فناوری چند ورودی چند خروجی انبوه^۳ (MIMO) به کار می‌رود [۱۱]. افزایش قابل توجه تعداد پورت‌های آنتن (تا صدها پورت) در مقایسه با سیستم‌های معمولی، امکان تطبیق الگوهای تشعشع آنتن را با ترافیک متغیر با زمان و شرایط انتشار رادیویی چند مسیری و همچنین دریافت یا ارسال هم‌زمان سیگنال‌های متعدد با استفاده از الگوهای تابشی مختلف ممکن می‌سازد. در این فناوری با تنظیم فاز و دامنه هر پورت آنتن، انرژی با استفاده از شکل‌دهی پرتو به سمت مسیرهای رادیویی خاص هدایت می‌شود و این کار شدت سیگنال دریافتی در جهت کاربر و در نتیجه توان عملیاتی کاربر نهایی را افزایش می‌دهد درحالی‌که توان تابشی و به تبع آن پرتوگیری کلی را در سایر جهات به حداقل می‌رساند.

۲.۲. سطوح استاندارد پرتوگیری از شبکه‌های 5G

در سال ۱۹۹۸ میلادی، کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوهای غیر یون‌ساز^۴ (ICNIRP) برای اولین بار رهنمودهایی را در مورد محدودیت‌های پرتوگیری از فرکانس‌های رادیویی تا 300 GHz برای محافظت از شاغلین و عموم مردم ارائه کرد. کلیه فناوری‌های بی‌سیم رادیویی در کشورهای مختلف می-بایست مطابق با مقررات ملی خاص آن کشور (که در برخی از کشورها مطابق با رهنمودهای ارائه شده توسط ICNIRP است)

⁴ International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection

¹ Beamforming

² Beam steering

³ Massive multi-input multi-output

مکان‌یابی مشترک^۱ آنتن‌ها را دشوار و تعداد سایت‌های آنتن موردنیاز را افزایش می‌دهند [۱۰].

به‌منظور بررسی انطباق میزان پرتوگیری رادیویی ایجاد شده در شبکه‌های ۵G با مقادیر مشخص شده در رهنمودهای ICNIRP و مطابقت با مقررات ایمنی، لازم است که ارائه‌دهندگان خدمات و سازمان‌های نظارتی از چگونگی تعیین سطوح قرارگرفتن در معرض پرتوگیری از این شبکه‌ها اطلاع دقیق داشته باشند.

۳. ارزیابی و تعیین سطوح پرتوگیری در شبکه‌های ۵G

هدف از ارزیابی میزان پرتوگیری در شبکه‌های ۵G تعیین حداکثر سطوح پرتوگیری رادیویی ناشی از این شبکه‌ها، ارائه روش‌هایی برای محدودکردن پرتوگیری عموم مردم و شاغلینی که در مجاورت تجهیزات رادیویی این شبکه‌ها کار می‌کنند، و ارائه الگوی گزارش‌دهی میزان پرتوگیری است. چارچوب‌های حاصل باید مبتنی بر حفظ سلامتی و ایمنی عموم مردم و شاغلین مجاور تأسیسات شبکه در حین حفظ کیفیت سرویس دریافتی توسط کاربران باشد.

۱.۳. تعیین سطوح پرتوگیری از ایستگاه‌های پایه ۵G با قابلیت شکل‌دهی پرتو

طراحی سیستم‌های ۵G به‌گونه‌ای است که از نظر آنتن‌های مورداستفاده، تخصیص منابع و معماری سلولی بسیار انعطاف‌پذیر باشند. ایستگاه‌های پایه ۵G تفاوت‌های عمده‌ای در مدیریت ارسال و دریافت داده دارند و معماری آن‌ها همچنان درحال توسعه است. هر سازنده یا اپراتور می‌تواند فناوری‌های متفاوتی از آنتن‌ها و معماری RAN^2 را توسعه دهد. این تنوع

عمل کنند. رهنمودهای ICNIRP مورد به‌روزرسانی قرار گرفته‌اند و آخرین نسخه آن‌ها در سال ۲۰۲۰ میلادی منتشر شده است [۱۲]. رهنمودهای به روز شده، تمام فرکانس‌های مورد استفاده برای ارتباطات سیار، از جمله فرکانس‌های مورد استفاده در شبکه‌های ۵G را پوشش داده و راهنمایی‌های بهتر و دقیق‌تری را به ویژه برای فرکانس‌های بالای ۶ GHz ارائه می‌دهند. در واقع، معرفی یک فناوری جدید با استفاده از فرکانس‌های رادیویی موجود یا جدید، ویژگی‌های آن فرکانس‌ها را تغییر نمی‌دهد، یعنی، رهنمودهای ICNIRP که تا ۳۰۰ GHz (بسیار بالاتر از فرکانس‌های پیشنهاد شده برای ۵G) اعمال می‌شوند، همچنان برای فناوری جدید نیز معتبر باقی می‌مانند.

سازمان بهداشت جهانی رهنمودهای این کمیسیون مستقل غیردولتی را به رسمیت می‌شناسد و بر این باور است که پرتوگیری از سطوح امواج الکترومغناطیسی کمتر از حدود توصیه شده در رهنمودهای ICNIRP پیامد شناخته شده‌ای بر سلامتی ندارد. این سازمان استفاده از رهنمودهای یاد شده را در کل کشورها پیشنهاد می‌کند. در واقع از نظر سازمان بهداشت جهانی، وجود تفاوت‌های قابل‌ملاحظه میان محدودیت‌های کشورهای مختلف می‌تواند باعث سردرگمی برای سازمان‌های نظارتی و سیاست‌گذاران شود، نگرانی‌های عمومی را افزایش دهد و چالشی را برای تولیدکنندگان و اپراتورهای سیستم‌های مخابراتی ایجاد کند تا ملزم به تنظیم محصولات خود متناسب با بازار هر کشور باشند. اعمال محدودیت‌های سخت‌گیرانه‌تر از حدود تعیین شده در رهنمودهای ICNIRP توسط برخی از کشورها، مبنای علمی تأیید شده برای ایجاد محافظت بیش‌تر در مقابل پرتوگیری رادیویی ندارد (لیکن تاکنون به‌صورت علمی رد هم نشده است)، اما استقرار شبکه تلفن همراه را ناکارآمد،

² Radio access network

¹ Co-location

در پیاده‌سازی، بررسی میزان پرتوگیری را پیچیده‌تر از فناوری‌های قدیمی‌تر می‌کند. در ارزیابی انطباق پرتوگیری رادیویی از ایستگاه‌های پایه 5G چالش اصلی این است که چگونه تغییرات پویای الگوهای تابشی آنتن‌هایی در نظر گرفته شود که به کاربران در مکان‌های مختلف سرویس‌دهی می‌کنند. از آن‌جا که اندازه‌گیری‌های طیف کامل 5G نمایش مناسبی از توان دریافتی را ارائه نمی‌کند، یک روش جایگزین برای به‌دست‌آوردن تخمینی محافظه‌کارانه از توان دریافتی پیشنهاد شده است. این روش شامل اندازه‌گیری کانال‌های همیشه روشن لینک فروسو^۱، و سپس برون‌یابی آن در کل باند است. بلوک سیگنال هم‌زمان‌سازی^۲ (SSB) تنها کانال لینک فروسوئی است که مستقل از تراکم شبکه و با دوره تناوب مشخصی به‌صورت یک سیگنال مرجع پایدار منتشر می‌شود. SSBها را می‌توان در اسپن صفر^۳ اندازه‌گیری کرده و از این مقدار برای برون‌یابی توان به کل پهنای باند استفاده کرد. با این حال، این سیگنال به‌تنهایی برای تخمین میزان پرتوگیری رادیویی از ایستگاه‌های پایه 5G کافی نیست [۱۳].

SSB نقش مهمی در مدیریت پرتو و تخصیص منابع ایفا می‌کند. جاروب پرتو^۴ با نگاشت هر SSB به یک پرتو مشخص اجرا می‌شود. پرتوهای حامل SSB به‌صورت زمانی جاروب شده و در فواصل زمانی منظم بر اساس تناوب تنظیم شده به سمت کاربرانی ارسال می‌شوند که در مکان‌های مختلفی در منطقه تحت پوشش قرار دارند. روش جاروب پرتو در شکل ۱ نشان داده شده است.

هر SSB با یک عدد منحصر به فرد به نام شاخص SSB شناسایی می‌شود. SSBها به طور پیش‌فرض در اطراف فرکانس

مرکزی ارسالی ایستگاه پایه قرار دارند و می‌توان آن را در یک پهنای باند مشخص کمتر یا برابر با پهنای باند ارسال اندازه‌گیری کرد. تعداد پرتوها در روش جاروب کردن مستقیماً با تعداد SSBها در یک مجموعه SSB و فرکانس عملکرد مورد استفاده توسط ایستگاه پایه مرتبط است. کاربران واقع در ناحیه پوشش اطراف ایستگاه‌های پایه 5G، SSBها را دریافت کرده و شدت سیگنال هر SSB را اندازه‌گیری می‌کنند. سپس هر کاربر پرتوی مطلوب را با توجه به نتیجه اندازه‌گیری‌ها انتخاب می‌کند و آن را به ایستگاه پایه باز می‌گرداند.

اندازه‌گیری در حوزه زمان (اسپن صفر)، توان لحظه‌ای دریافتی از پهنای باند اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. توان لحظه‌ای اندازه‌گیری شده کانال‌های SSB را می‌توان به کل پهنای باند ارسال تعمیم داد تا حداکثر توان دریافتی ممکن از یک پرتوی خاص در محل اندازه‌گیری قابل تخمین باشد.

یکی از ویژگی‌های دسترسی رادیویی 5G پالایش پرتو^۵ است که مرحله بعدی برقراری ارتباط بین ایستگاه پایه 5G و کاربر را برای ارسال داده تشکیل می‌دهد (شکل ۲). برای این منظور، آنتن ایستگاه پایه شکل‌دهی پرتوی خود را به‌گونه‌ای تطبیق می‌دهد که برای کاربر مورد نظر مناسب‌تر باشد. به این ترتیب، بهره آنتن به هنگام ارسال در کانال داده مانند هنگام ارسال در کانال سیگنال نخواهد بود. بنابراین، در صورت استفاده از پالایش پرتو، دیگر نمی‌توان به‌سادگی اندازه‌گیری کانال SSB را به کل پهنای باند انتقال تعمیم داد، زیرا بهره آنتن در هنگام ارسال داده بیش‌تر خواهد بود. بنابراین برآورد افزایش بهره برای جلوگیری از دست کم گرفتن میزان پرتوگیری ضروری است. این بهره اضافی را می‌توان با اندازه‌گیری اختلاف توان لحظه‌ای

در این حالت نوسان‌ساز محلی تحلیلگر طیف در یک فرکانس مشخص ثابت می‌ماند و جاروب فرکانسی انجام نمی‌دهد.

⁴ Beam sweeping

⁵ beam refinement

¹ Downlink

² Synchronization signal block

³ Zero-span

$$E_{asmt} = E_{SSB} \sqrt{F_{extBeam} \cdot F_{BW} \cdot F_{PR} \cdot F_{TDC} \cdot F_B^{-1}} \quad (۱)$$

که E_{SSB} شدت میدان الکتریکی در هر عنصر منبع از قوی‌ترین سیگنال SSB، $F_{extBeam}$ ضریب برون‌یابی متناظر با نسبت پوش الگوی تابشی داده به پوش توان تابشی همسانگرد معادل^۵ (EIRP) سیگنال SSB در جهت ارتفاع مورد نظر، F_B نسبت توان ارسالی سمبل SSB نسبت به توان ارسالی سمبل داده، F_{BW} نسبت کل پهنای باند حامل به فاصله فرکانسی سیگنال SSB، F_{PR} ضریب کاهش توان و F_{TDC} ضریب دوره^۶ کاری سیگنال‌ها است که جزئیات محاسبه هر یک در [۱۳] ذکر شده است.

۲.۳. محاسبه چگالی توان دریافتی

محدودیت‌های پرتوگیری از فرکانس‌های رادیویی تعیین شده در رهنمودهای ICNIRP برحسب کمیت‌های مختلفی ارائه شده‌اند. یکی از این کمیت‌ها چگالی توان تابشی است که می‌تواند برای ارزیابی سطح پرتوگیری رادیویی مورد استفاده قرار گیرد. سطوح توان دریافتی در محل کاربران به صورت زیر برای محاسبه چگالی توان دریافتی استفاده می‌شود:

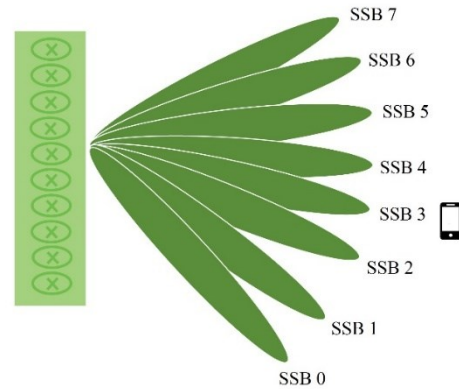
$$S(\theta, \phi) = \frac{PG(\theta, \phi)}{4\pi r^2} \quad (\text{Wm}^{-2}) \quad (۲)$$

که P توان فرستنده، $G(\theta, \phi)$ بهره آنتن فرستنده در جهت کاربر و r فاصله فرستنده تا کاربر است.

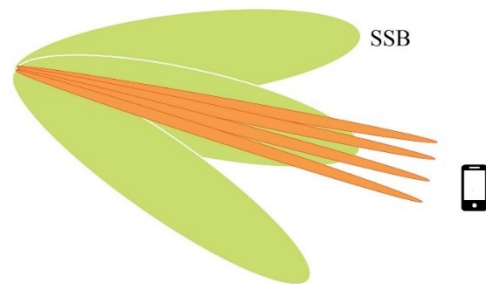
۳.۳. مدل آنتن

مدل آنتن مورد استفاده توسط 3GPP^۷ برای بازه فرکانسی ۶ گیگاهرتز تا ۱۰۰ گیگاهرتز ارائه شده است. الگوی تابشی کلی آنتن ترکیبی از الگوی تابشی هر عنصر تابشی و ضریب آرایه است. الگوی تابشی یک عنصر تابشی با در نظر داشتن زوایای

دریافتی در یک باند فرکانسی کوچک (به عنوان مثال ۱ مگاهرتز) بین SSB و کانال فیزیکی فروسوی به اشتراک گذاشته شده^۱ (PDSCH) تخمین زد.



شکل (۱): جاروب پرتو SSB در ایستگاه پایه ۵G.



شکل (۲): پالایش پرتو در ایستگاه پایه ۵G.

برای انجام برون‌یابی می‌توان از اطلاعات پوش^۲ الگوی تابش پرتو برای سیگنال‌های SSB و داده استفاده کرد. برای پوش سیگنال SSB، فرض می‌شود که تمام عناصر منبع توان یکسانی را ارسال می‌کنند. برون‌یابی بر اساس نسبت پوش الگوی تابشی سیگنال داده به پوش الگوی تابشی پوش^۳ و ارتفاع^۴ مشخص انجام می‌شود. نسبت ضریب برون‌یابی را در این زاویه سمت و ارتفاع^۴ می‌دهد. شدت میدان الکتریکی برون‌یابی شده، E_{asmt} ، با رابطه زیر به دست می‌آید [۱۴]:

physical downlink shared channel

² Envelope

³ Azimuth

⁴ Elevation

⁵ Equivalent isotropic radiated power

⁶ Duty-cycle

⁷ Third Generation Partnership Project

که $v_{m,n}$ جابجایی فاز ناشی از محل قرارگیری عنصر آنتنی، $w_{m,n}$ ضریب مربوط به شیب الکتریکی پایین^۴ و تضعیف پرتوهای جانبی آنتن، و N_H و N_V به ترتیب تعداد عناصر آنتنی در راستای افقی و عمودی می‌باشند. ضرایب $v_{m,n}$ و $w_{m,n}$ از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$v_{m,n} = \exp \left(j 2 \pi i \left((n-1) \frac{d_V}{\lambda} \cos(\theta) + (m-1) \frac{d_H}{\lambda} \sin(\theta) \sin(\phi) \right) \right) \quad (7)$$

for $m = 1, 2, \dots, N_H, n = 1, 2, \dots, N_V$

$$w_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{N_H N_V}} \exp \left(j 2 \pi i \left((n-1) \frac{d_V}{\lambda} \sin(\theta_{\text{tilt}}) - (m-1) \frac{d_H}{\lambda} \cos(\theta_{\text{tilt}}) \sin(\phi_{\text{scan}}) \right) \right) \quad (8)$$

for $m = 1, 2, \dots, N_H, n = 1, 2, \dots, N_V$

که θ_{tilt} زاویه هدایت شیب الکتریکی پایین و ϕ_{scan} زاویه هدایت افقی الکتریکی آنتن است و از آنجا که فرض می‌شود پرتو اصلی آنتن به سمت کاربر تحت سرویس است، آرایه آنتن متناسب با موقعیت مکانی هر کاربر الگوی تابش متفاوتی به سمت آن دارد.

۴. ارزیابی انطباق پرتوگیری از ایستگاه‌های پایه 5G

مجهز به MIMO انبوه

برای بررسی میزان پرتوگیری ناشی از یک ایستگاه پایه 5G، یک ایستگاه پایه مجهز به فناوری MIMO انبوه را در نظر می‌گیریم که در باند فرکانسی ۳/۵ GHz کار می‌کند. این آرایه دارای $M \times N$ عنصر آنتن که در حالت TDD^۵ کار می‌کند. فاصله بین دو عنصر آنتن مجاور برابر با $\lambda/5$ در هر دو راستای افقی و عمودی است، که λ طول موج سیگنال RF است. تعداد عناصر آنتن N در راستای عمودی به L زیرآرایه تقسیم می‌شوند که

اوج^۱ θ ($0^\circ < \theta < 180^\circ$) و سمت ϕ ($0^\circ < \phi < 180^\circ$) در سیستم مختصاتی که مبدأ آن در مرکز آرایه آنتن قرار دارد به صورت زیر به دست می‌آید [۱۵]:

$$A_E(\theta, \phi) = -\min[A_{E,V}(\theta) + A_{E,H}(\phi), A_m] \quad (3)$$

که $A_{E,V}$ و $A_{E,H}$ الگوهای تابشی عمودی و افقی عنصر تابشی می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$A_{E,V}(\theta) = -\min \left[10 \log \left(\frac{\theta - 90^\circ}{\theta_{\text{dB}}} \right)^2, SLA_V \right] \quad (4)$$

$$A_{E,H}(\phi) = -\min \left[10 \log \left(\frac{\phi}{\phi_{\text{dB}}} \right)^2, A_m \right] \quad (5)$$

که $\theta_{\text{dB}} = \phi_{\text{dB}} = 65^\circ$ پهنای پرتوهای 3 dB عمودی و افقی آنتن، $SLA_V = 30$ dB سطح تضعیف پرتو جانبی عمودی^۲ و $A_m = 30$ dB نشان‌دهنده نسبت تفاوت شدت سیگنال ارسال شده در جهت اصلی آنتن به سیگنال ارسال شده در جهت مخالف هستند.

پیاده‌سازی تعداد زیادی از عناصر آنتنی در آرایه، ارسال توان با بهره بالا را با متمرکز کردن شدت میدان در جهت کاربر تحت سرویس، امکان‌پذیر می‌کند. الگوی تابشی آرایه بر اساس پیاده‌سازی فیزیکی عناصر آنتن و هدایت الکتریکی پرتو اصلی آن تعیین می‌شود.

الگوی تابشی آرایه مستطیلی با فاصله یکنواخت عناصر در ابعاد افقی و عمودی و با فرض الگوی تابشی یکسان برای هر عنصر آن به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$A_A(\theta, \phi) = A_{E,V}(\theta, \phi) + 10 \log \left[1 + \rho \left(\left| \sum_{m=1}^{N_H} \sum_{n=1}^{N_V} w_{m,n} v_{m,n} \right|^2 - 1 \right) \right] \quad (6)$$

^۴ Down-tilt

^۵ Time-division duplexing

^۱ Zenith

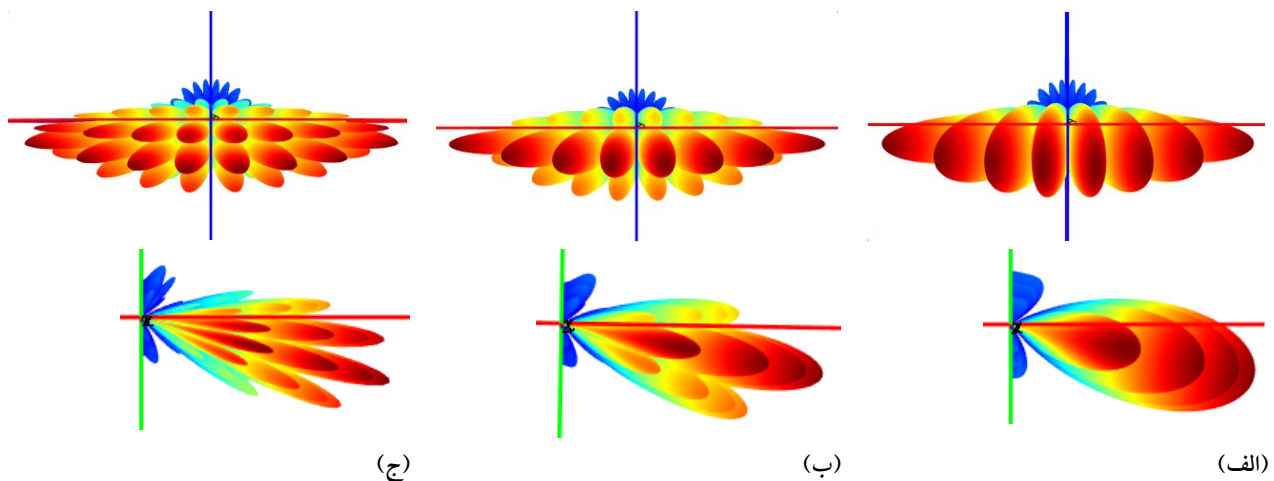
^۲ Beamwidths

^۳ Sidelobe attenuation level

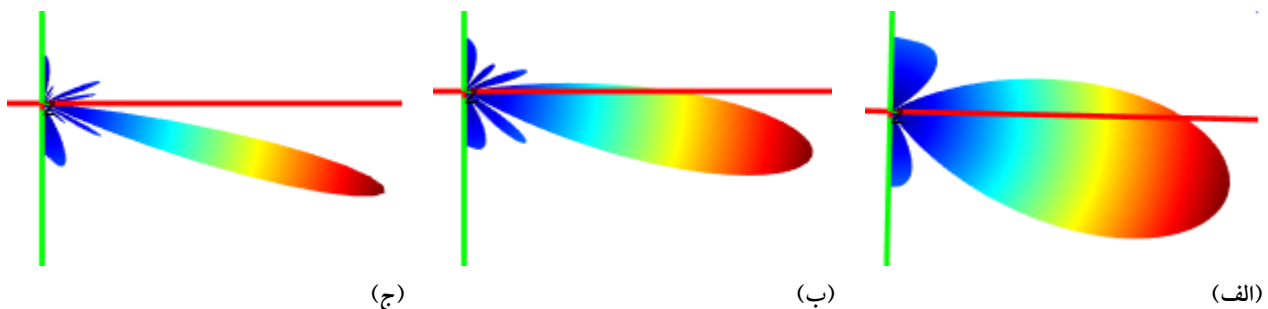
هر زیرآرایه از تعداد N/L عنصر تشکیل شده است. با فرض اینکه هر زیرآرایه دارای سه عنصر آنتن باشد (یعنی $N/L=3$)، فاصله بین مراکز دو زیرآرایه مجاور برابر $\lambda/5 = 1/5 \times 3\lambda$ است. یک تابع پنجره به صورت زیر به الگوی آرایه در راستای عمودی اعمال می شود:

$$W_L = \left| \frac{\sin(\cdot/\Delta\pi N \sin\theta)}{\cdot/\Delta\pi N \sin\theta} \right| \quad (9)$$

ارتفاع نصب ایستگاه پایه ۱۰ m، حداکثر توان نامی آن ۵۰ W و بهره آنتن ۱۸ dBi است. شیب الکتریکی پایین الگوی تابشی آنتن 12° فرض می شود. الگوی تابشی هر عنصر مطابق با (۳) تنظیم شده است. مقادیر ضرایب رابطه (۱) مطابق با ضرایب اندازه گیری شده در [۱۶] تنظیم شده اند.

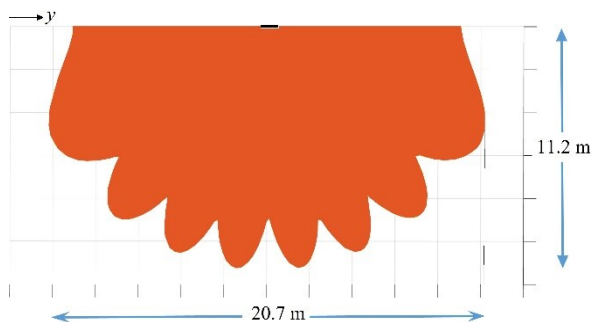


شکل (۳): الگوی تابشی کامل ایجاد شده توسط آرایه آنتن در حالت $M=8$. (الف) و $L=1$ (ب) $L=2$ و (ج) $L=4$. ردیف بالای نمای جلویی و ردیف پایین نمای جانبی الگوی تابشی.

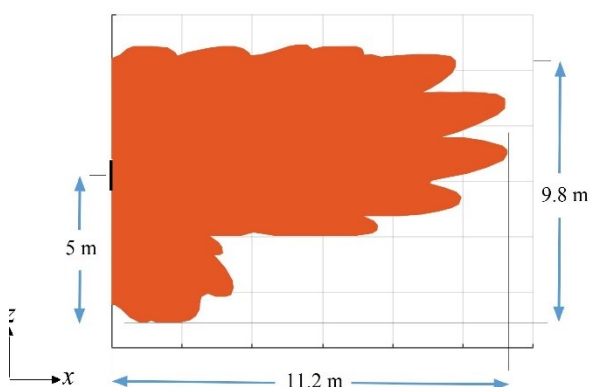


شکل (۴): نمای جانبی الگوی تابشی برای سرویس دهی به تک کاربر در حالت $M=8$. (الف) و $L=1$ (ب) $L=2$ و (ج) $L=4$.

را مشخص می‌کند. با توجه به اینکه در داخل ناحیه ممنوعه، میزان پرتوگیری بیش از حد مجاز تعیین شده برای عموم مردم در استاندارد است، این افراد باید از ورود به آن اجتناب کنند.



(الف)



(ب)

شکل (۵): مرزهای ناحیه ممنوعه. (الف) نمای بالایی (در صفحه xy) و (ب) نمای جانبی (در صفحه xz) ناحیه ممنوعه.

برای آرایه آنتن مشخص شده در بالا حدود مرزها و شکل ناحیه ممنوعه با استفاده از رابطه (۲) تعیین و با رنگ نارنجی در شکل ۵ نشان داده شده است. مقادیر محاسبه شده برای ابعاد این ناحیه بر حسب متر در صفحات xy و xz به ترتیب در شکل‌های ۵ (الف) و ۵ (ب) مشاهده می‌شود (محور z راستای قائم را در فضای سه بعدی نشان می‌دهد و $z=0$ نشان دهنده سطح زمین است). برای سادگی محاسبه از اثر انعکاس سطح زمین صرف نظر شده است. مطابق این شکل، حداکثر ابعاد ناحیه ممنوعه در صفحه xy ۱۱/۲ m و ۲۰/۷ m و در صفحه xz ۹/۸ m و ۱۱/۲ m است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به الگوی

در صورتی که از دو پلاریزاسیون متعامد در عناصر آرایه استفاده شود، تعداد کاربران قابل پشتیبانی توسط این ساختار به ۶۴ افزایش پیدا می‌کند.

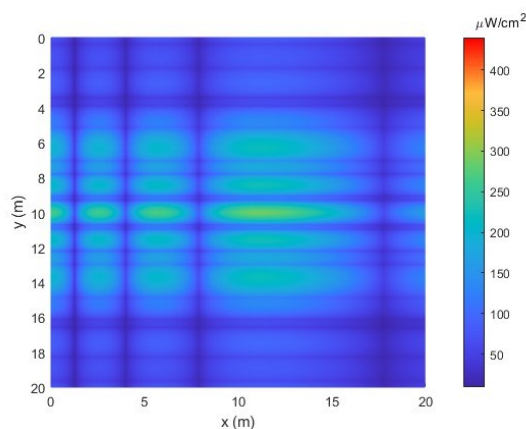
با توجه به شکل ۳ می‌توان مقایسه کرد که برای سرویس‌دهی به یک کاربر، پهنای پرتوهای ایجاد شده و در نتیجه میزان پرتوگیری ناشی از آن در حالتی که تعداد عناصر آرایه کم است تا چه حد بیش‌تر از حالتی است که تعداد عناصر آرایه افزایش می‌یابد. همچنین، توجه به این نکته لازم است که با توجه به اینکه توان ارسالی آرایه بین این پرتوها تقسیم می‌شود، میزان توان تابشی در هر پرتو نیز با افزایش تعداد عناصر آرایه به شدت کاهش می‌یابد. برای مقایسه بهتر میزان پرتوگیری ایجاد شده در حالتی که تنها یک کاربر تحت سرویس‌دهی قرار می‌گیرد، الگوی تابشی آرایه برای این وضعیت در سه حالت فوق مقایسه شده و در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که تعداد بالای آنتن‌ها چگونه می‌تواند پرتو تابشی را در راستای کاربر موردنظر متمرکز کرده و از ایجاد تشعشع در سایر جهات و در نتیجه افزایش سطح پرتوگیری جلوگیری نماید؛ بنابراین در شبکه‌های 5G، استفاده از فناوری MIMO انبوه با آنتن‌های هوشمند قابلیت کاهش قابل‌ملاحظه میزان پرتوگیری را در مقایسه با ساختارهای آنتن مورد استفاده در نسل‌های قبلی شبکه تلفن همراه دارا است.

برای تعیین مرزهای ناحیه ممنوعه برای عموم مردم، یعنی ناحیه‌ای که در آن سطح تشعشع ایستگاه پایه بزرگتر یا مساوی سطح مرجع تعیین شده برای حد پرتوگیری است، باید مطابق با استاندارد IEC ۶۲۲۳۲ [۱۴]، عمل کرد. برای این منظور باید با استفاده از رابطه (۲)، فواصلی از آنتن که در آن چگالی توان دریافتی برای تمامی زوایای $S(\theta, \phi)$ مساوی سطح مرجع تعیین شده در استاندارد ملی شماره ۸۵۶۷ ایران [۱۷] برای عموم مردم، یعنی $440 \mu W/cm^2$ است، محاسبه شود. مقدار فاصله به دست آمده به ازای زوایای (θ, ϕ) ، ابعاد و شکل هندسی ناحیه ممنوعه

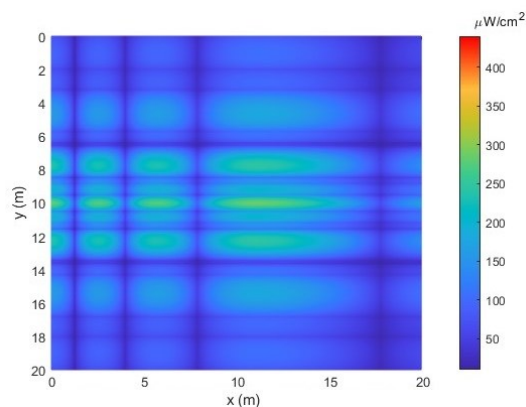
مشخص شده) بر روی مقدار $440 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ تنظیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سطح چگالی توان دریافتی کاملاً کمتر از مقدار مجاز $440 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ است. بخش کوچکی از این ناحیه $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ دارای رنگی غیر از طیف رنگی آبی است. طیف رنگ آبی سطوح توان دریافتی کمتر از حدود $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ و طیف رنگی غیر آبی (شامل سبز، زرد و نارنجی) سطوح توان دریافتی بیش‌تر از این مقدار را نشان می‌دهند. در ارتفاع بیش‌تر (8 m)، به دلیل نزدیکی به آنتن، ناحیه طیف رنگ غیر آبی سطوح چگالی توان دریافتی بالاتری را نشان می‌دهد. با کاهش ارتفاع و دور شدن از آنتن، سطح چگالی توان دریافتی کمتر شده و این مساله در طیف رنگی غیر آبی ارتفاع‌های 4 m و 1.5 m به‌وضوح قابل مشاهده است.

تابشی آنتن MIMO استفاده شده، شکل ناحیه ممنوعه از نظر هندسی پیچیده است. مطابق آنچه پیش‌تر اشاره شد، با توجه به این‌که در ناحیه نارنجی رنگ میزان پرتوگیری بیش از حد مجاز $440 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ است، می‌بایست از ورود عموم مردم به آن ممانعت به‌عمل آید.

شکل‌های ۶ (الف)، ۶ (ب) و ۶ (ج) چگالی توان دریافتی محاسبه شده از آرایه را در صفحه xz به ترتیب در $z=1.5 \text{ m}$ (فاصله تقریبی سر انسان از سطح زمین)، $z=4 \text{ m}$ در مجاورت محل نصب آنتن در یک ناحیه $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ نشان می‌دهند. محاسبه با در نظر گرفتن انعکاس از سطح زمین انجام شده است. برای درک بهتر نتایج، حداکثر چگالی توان دریافتی نوار رنگی کنار شکل‌ها (که با رنگ قرمز

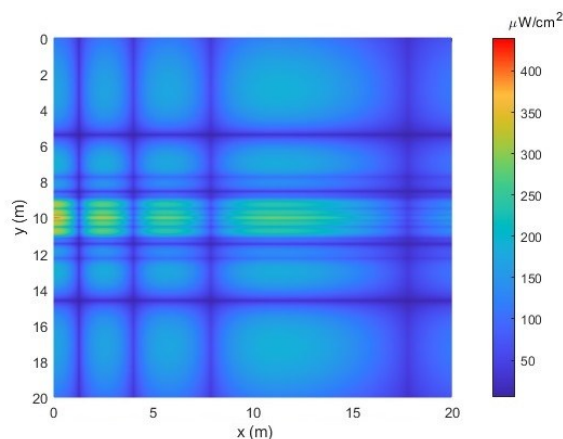


(الف)



(ب)

شکل (۶): چگالی توان دریافتی در ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین. (الف) $z=1.5 \text{ m}$ ، (ب) $z=4 \text{ m}$.



(ج)

ادامه شکل (۶): و (ج) $z = 8$ m.

۵. نتیجه‌گیری

مقدار قابل ملاحظه‌ای نسبت به فناوری‌های قبلی تلفن همراه که فاقد این قابلیت هستند، کاهش دهد. قابل ذکر است فضاهایی که در آن‌ها از نسل‌های مختلف تلفن همراه استفاده می‌شود، نیاز به بررسی بیش‌تری دارند. نتایج ارائه شده در بالا برای شرایطی است که تنها از فناوری 5G برای ایجاد پوشش تلفن همراه استفاده شده است.

در این مقاله پس از معرفی ساختار شبکه‌های 5G و فناوری‌های مورد استفاده در این شبکه‌ها، میزان پرتوگیری رادیویی حاصل از ایستگاه‌های پایه 5G را مورد بررسی قرار دادیم. بر مبنای نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده، به کارگیری MIMO انبوه در کنار شکل‌دهی پرتو می‌تواند با ایجاد پرتوهای بسیار باریک در راستای کاربران مورد نظر، میزان پرتوگیری در سایر جهات را به

۶. مراجع

1. P. Staebler. *Human Exposure to Electromagnetic Fields: From Extremely Low Frequency (ELF) to Radiofrequency*. Wiley-ISTE. 1st ed. John Wiley & Sons, 2017.
2. Y. Stein, I. G. Udasin. Electromagnetic hypersensitivity (EHS, microwave syndrome) – Review of mechanisms. *Environ. Res.* 186 (2020) 109445.
3. F. de Vocht, P. Albers. The population health effects from 5G: Controlling the narrative. *Front Public Health.* 10 (2022) 1082031.
4. L. Chiaraviglio, A. Elzanaty, M. -S. Alouini. Health Risks Associated With 5G Exposure: A View From the Communications Engineering Perspective. *IEEE Open J. Commun. Soc.* 2 (2021) 2131-2179.
5. G. Wersényi. Health issues using 5G frequencies from an engineering perspective: Current Review. *Open Eng.* 12 (1) (2022) 1060-1077.
6. Electromagnetic Field (EMF) measurements near 5G mobile phone base stations: Summary of results, OFCOM, (2021).
7. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.ie/environment-and-you/radiation/emf/what-is-emf/radiofrequency-fields/5g---new-rf-technologies/5g-exposure-and-guidelines/>
8. I. A. I. Ahmad, F. Osasona, S. Onimisi Dawodu, O. C. Obi, A. C. Anyanwu, S. Onwusinkwue. Emerging 5G technology: A review of its far-reaching implications for communication and security. *World J. Adv. Res. Rev.* 21 (1) (2024) 2474-2486.

9. X. Ge, S. Tu, G. Mao, C. X. Wang, T. Han. 5G ultra-dense cellular networks. *IEEE Wireless Commun.* 23 (1) (2016) 72-79.
10. GSMA. 5G, *EMF Exposure and Safety*. (2020). https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/public-policy/wp-content/uploads/2020/05/GSMA_5G_EMF_Exposure_and_Safety_05_20.pdf
11. M. I. Mapa, D. K. M. Ibarlin, E. R. Arboleda. Optimizing antenna performance: A review of multiple-input multiple output (MIMO) antenna design techniques. *Int. J. Sci. Res. Archive* 12 (2) (2024) 438-444.
12. ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 KHz to 300 GHz). *Health Phys.* 118 (5) (2020) 483-524.
13. M. A. Hajj. Radio frequency exposure analysis in 5G massive MIMO systems. PH. D. Dissertation (2023).
14. IEC 62232. Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of base stations for the purpose of evaluating human exposure. (2022).
15. ETSI TR 138 901 V16.1.0. 5G Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16) (2020).
16. M. Ruttner, H. Keller, B. Strutz, D. Šuka, S. Q. Wali. 5G FR1 exposure measurements: Comparison of different IEC 62232:2022 extrapolation methods. *IOP Conf. Ser. Mat. Sci. Eng.* 1320 (1) (2024) 012001.

۱۷. استاندارد ملی ایران شماره ۸۵۶۷، پرتوهای غیریون‌ساز -

حدود پرتوگیری. بهار ۱۴۰۳.