

انتقال همزمان قدرت و اطلاعات: تحولی نوین در فناوری ارتباطات بی سیم

شکراله کریمیان*

چکیده

امروزه فناوری بی سیم به اندازه ای فراگیر شده که حذف آن از سیستم های ارتباطی و مخابراتی، آینده این سیستم ها را با ابهام مواجه می سازد. این ایده که تلفن های همراه، تبلت ها و یا حتی اتوموبیل های الکتریکی در آینده ای نه چندان دور قادر به شارژ هوشمند بی سیم باشند، بسیار هیجان انگیز است. از منظری دیگر البته، حتی تصور اینکه قطع کامل ارتباطات در بلایای طبیعی یا حادثه های انسانی چه فاجعه ای برای سلامت انسانها و نیز عملیات نجات به بار خواهد آورد، دلخراش است. البته همه ی ما مدام با مقیاس بسیار کوچکتري از این معضل، یعنی نیاز به شارژ یا جایگزینی مکرر باتری تلفن های همراه و تبلت (لوح الکترونیکی) های خود، دست و پنجه نرم می کنیم؛ چرا که اساسا کارایی سیستم های ارتباطی بی سیم به عمر منبع انرژی آنها (یعنی باتری ها) محدود شده است. لذا، با توجه به زیرساخت های موجود در انتقال بی سیم اطلاعات و پیشرفت های اخیر در انتقال بی سیم انرژی، شاید اکنون زمان آن رسیده باشد تا برای انتقال همزمان قدرت و اطلاعات، آینده ای بیش از صرفا یک رویا متصور شد. فناوری انتقال همزمان بی سیم قدرت و اطلاعات (سوویت)، امکان ایجاد شبکه هایی قویتر با توان عملیاتی بالاتر و قابلیت انعطاف بیشتر را برای یک ارتباط مداوم واقعی فراهم خواهد نمود؛ البته، این مهم مشکلات پژوهشی و پیامدهای اجرایی بسیاری را نیز متوجه محققین می سازد. در این نوشتار، تلاش گردیده تا با مروری بر آخرین پیشرفت های فناوری سوویت، کاربردهای آن، چالش های کلیدی و نیز راه حل ها در طراحی و کاربرد سیستم های مبتنی بر آن بررسی گردد. همچنین، پیشنهادات لازم در جهت پیاده سازی این فناوری

واژگان کلیدی: انتقال همزمان بی سیم قدرت و اطلاعات (سوویت)، ارتباطات بی سیم، میکروویو، اینترنت اشیا.

* پژوهشگر پسا دکترا، دانشکده اخترفیزیک دانشگاه آکسفورد انگلستان، آدرس ایمیل: shokrollah.karimian@physics.ox.ac.uk

میلادی می رسد؛ زمانی که رویای دانشمندانی مانند هانتینگ و لیلانک و شاید مهمتر از همه نیکولا تسلا برای انتقال بی سیم قدرت (انرژی) به نقاط دیگر زمین آغاز شد [۴]. تسلا موفق شد انتقال بی سیم قدرت را توسط یک جفت سیم پیچ به اثبات برساند. او در یکی از آزمایشهای لامپی را به صورت بی سیم از طریق دو سیم پیچ جدای از هم روشن نمود [۵]؛ اصولی که امروزه نیز در فناوری انتقال بی سیم قدرت پابرجا هستند. هرچند این محققان موفق به تحقق رویای بزرگتر خویش نشدند، از دهه ۱۹۶۰ به بعد شاهد نمونه های موفق متعددی از پیشرفت انتقال بی سیم قدرت بوده ایم [۶-۷].

این فناوری در سالهای اخیر و بویژه در محصولات تجاری مانند تلویزیون های دیجیتال، شارژرهای موبایل و لپ تاپ، و سامانه های بازشناسی با امواج رادیویی پیشرفت های قابل ملاحظه ای داشته است. کاربردهای بی نظیر دیگری نیز متکی بر فناوری انتقال بی سیم قدرت در دست تحقیق و اجرا هستند که از جمله می توان به ارتباط نقطه حسگرهای مجزا و ربات ها، دستگاه های کاشته شده در بدن، خودروهای الکتریکی آنلاین [۸-۹] و ارسال بی سیم قدرت به مناطق غیرقابل دسترس یا خطرناک اشاره نمود. تصویر ۱ نمونه هایی از این کاربری ها را نشان می دهد.

ب) روش های انتقال بی سیم قدرت دو دسته کلی از روش های انتقال بی سیم قدرت وجود دارد که عبارتند از: القای الکترومغناطیسی و تابش الکترومغناطیسی [۱۰-۱۳]. روش هایی مانند کوپل القایی (رزونانت) و کوپل خازنی، روش های غیرتابشی و میدان-نزدیک انتقال قدرت هستند که در دسته نخست جای می گیرند [۱۴-۱۶]. متقابلاً، روش های تابش الکترومغناطیسی، مانند انتقال قدرت میکروویو [۱۷] و لیزر، روش های انتقال قدرت تابشی و میدان-دور هستند.

سیستم های «انتقال تابشی» به دلیل کاربرد در مکان هایی که استفاده از شبکه های سیم برق امکان پذیر نبوده یا هزینه بر می باشد، مورد توجه خاص محققان قرار گرفته اند. عملکرد این سیستم ها بر مبنای انتقال پیام های الکترومغناطیسی آر-اف (که همزمان حامل انرژی و اطلاعات هستند) از

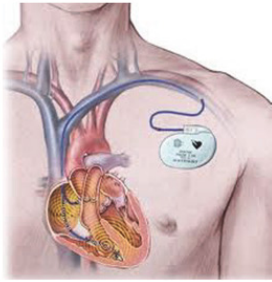
آغاز استفاده از ادوات الکترونیکی و دستگاه های مخابراتی قابل حمل از دهه ۱۹۸۰ میلادی، فواید بیشتری را برای جوامع انسانی به همراه داشته است. به عنوان مثال، اختراع و توسعه روز افزون استفاده از تلفن های همراه، تحولات عظیمی در روش های ارتباطی میان انسان ها به وجود آورده است. به گزارش مجله ایندپندنت، در سال ۲۰۱۴ میلادی تعداد دستگاه های موبایل در دنیا به ۷٫۲ میلیارد عدد رسید [۱]. البته از منظری دیگر و به لحاظ زیست محیطی، محصولات الکترونیکی قابل-شارژ با شارژر مخصوص خود ارائه می شوند، که معضل افزایش زباله های الکترونیکی را در پی دارد [۲]. معضلی که لازمه حل آن همکاری ویژه انجمن های بزرگ تحقیقاتی و صنعت است. ارائه پروتکل های شارژ عمومی (مانند گذرگاه های مایکرو-یو اس بی) به عنوان استاندارد عمومی شارژرهای سیمی، یکی از این راهکارهاست، که منتج به کاهش بیش از پنجاه و یک هزار تن از شارژرها شده است [۳]. بعلاوه، روش های بی سیم جدیدی نیز ظهور کرده اند که از برجسته ترین آنها، فناوری انتقال همزمان قدرت و اطلاعات (سوپیت) است، که پیش بینی می شود انقلابی در این عرصه ایجاد نماید.

در این نوشتار، ابتدا به معرفی انواع فناوری های انتقال بی سیم قدرت و مقایسه ویژگی های آنها می پردازیم. سپس، با تمرکز بر فناوری سوپیت، کاربردها، آخرین پیشرفت ها و نیز پتانسیل های این فناوری برای ساخت شبکه هایی با ظرفیت و قدرت بیشتر، و نیز انعطاف بالاتر (نسبت به همتای باسیم آن)، مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین ضمن بررسی چالش های پیش رو، پیشنهادهای به منظور ایجاد زیرساخت های لازم در جهت توسعه این فناوری در مقیاسی ملی و بین المللی ارائه می گردد.

فناوری های انتقال بی سیم قدرت

الف) پیشینه انتقال بی سیم قدرت
پیشینه انتقال بی سیم قدرت به اواخر دهه ۱۸۰۰

انتقال همزمان قدرت و اطلاعات



(ج)

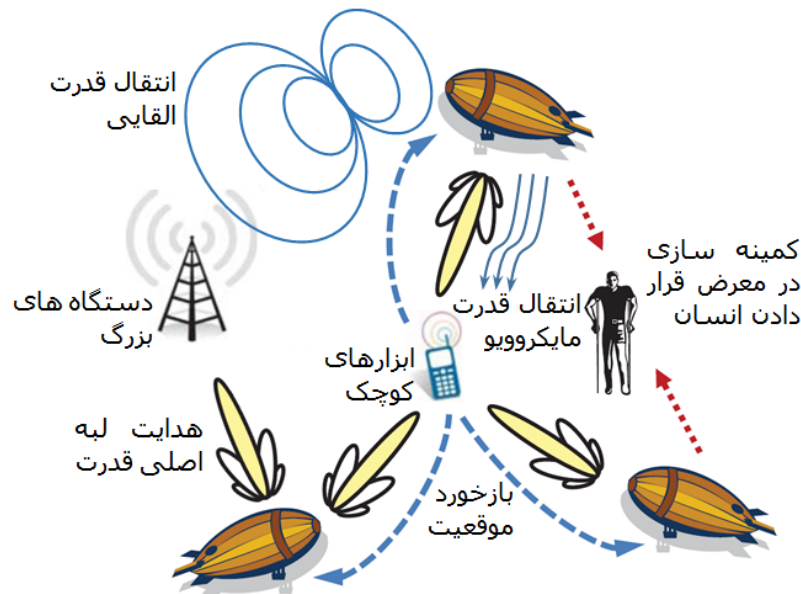


(ب)



(الف)

تصویر ۱: شارژ بی سیم (الف) موبایل، (ب) خودروهای الکتریکی و (ج) دستگاه تنظیم کننده ضربان قلب.



تصویر ۲: ساختار انتقال ترکیبی قدرت (مشمول بر انتقال القایی و مایکروویو)، و راهکارهای بهبود آن [۲۱].

قدرت کاملاً جدید نبوده، چراکه کم و بیش به مبانی ارتباطات بی سیم و سیستم های راداری بر میگردند. البته کامیابی دراز مدت این فناوری بواسطه روش (انتقال قدرت به جای اطلاعات) و اهداف خاص آن نیازمند ملاحظه محدودیت ها و توانمندی های آنها از نگاهی جدید به ابزارهای نظری و راهکارهای طراحی می باشد. از این رو، منطقی است که سیستم های جدید انتقال بی سیم قدرت امکان تعامل و به کارگیری هر دو روش (تابشی و غیرتابشی) را یکجا فراهم آورند. تصویر ۲ نمایی از این فناوری هیبریدی و موارد مهم در توسعه آن را منعکس می نماید.

نقطه تولید به دست کم یک گیرنده دور است که به کمک مدارهای یکسوساز (مرکب از دایود/ ترانزیستور و فیلتر)، موظف به جمع آوری و تبدیل امواج دریافتی به جریان مستقیم (دی سی) و ذخیره آن در باتری های تعبیه شده می باشد [۲۲]. در این نوع گیرنده ها، دو مکانیزم را می توان متصور شد: یکی تعویض زمان و دیگری تقسیم قدرت. در نوع اول، پیام دریافت شده در یک زمان خاص توسط گیرنده انرژی یا گیرنده اطلاعات پردازش می شود. در حالیکه در نوع دوم، پیام دریافتی با تقسیم به دو مسیر قدرت، در میان گیرنده های انرژی و اطلاعات تقسیم می گردد [۲۳]. لذا، آنگونه که پیداست، اصول فناوری انتقال بی سیم

فناوری انتقال همزمان قدرت و اطلاعات (SWIPT)

صرفاً برای انتقال انرژی بی سیم بین دستگاه‌ها می‌باشند. مسیرهای دیگر جهت انتقال همزمان انرژی و اطلاعات می‌باشند، که در این نوشتار از آنها به عنوان «سوپیت» نام برده شده. در این مدل همچنین مسیری دیگر می‌توان متصور شد که انتقال انرژی به یک سمت و انتقال اطلاعات به سمت دیگر انجام شود. بدیهی است که پیاده‌سازی این فناوری نیازمند طراحی کامل و استفاده بهینه از مدل‌ها، پروتکل‌ها و نیز ملاحظه تمامی شرایط احتمالی در ارتباطات است که در چارچوب این نوشتار نمی‌گنجد. لیکن، بی‌تردید، سوای نوع و شکل مدل به کارگرفته شده، مشکلات، محدودیت‌ها و ملاحظات متعددی (مشابه با سیستم‌های موجود) در توسعه آینده‌ی چنین سیستم‌هایی وجود خواهد داشت، که در ادامه مختصراً به برخی از آنها اشاره خواهد شد.

چالش‌های سیستم‌های مبتنی بر فناوری سوپیت

در محصولات جدید مبتنی بر فناوری سوپیت، علاوه بر چالش‌های معمول سادگی، کوچکی، سبکی، قوت بدنه، ارزانی و قابل اعتماد بودن، بواسطه مقتضیات جدید چالش‌های «غیرمعمول» نیز بایستی مورد ملاحظه قرار گیرند. برخی از این چالش‌ها عبارتند از: (۱) کارایی سیستم آر-اف نقطه-به-نقطه، (۲) شکل، فرم و ساختار آرایه‌های سخت افزاری و نرم افزاری ارسال و دریافت و نیز بازیابی انرژی و اطلاعات، (۳) روش‌های تمرکز پرتوها، (۴) توسعه و اعمال استانداردهای مربوط، (۵) دقت و پایداری روش‌های کنترلی برای افزایش ایمنی و کارایی انتقال قدرت، (۶) کاهش پیچیدگی شبکه تغذیه در عین در نظر گرفتن تمامی پارامترهای ترکیبی و روش‌های بهینه‌سازی تئوری و عملی، و در نهایت ارتقای عملکرد سیستم. بدیهی است که ملاحظات ایمنی و سلامت انسانی جای بسیار مهمی را در تحقیقات مربوطه به خود اختصاص داده‌اند.

ملاحظات ایمنی

با افزایش مقدار و مسافت انتقال بی سیم قدرت، پیامدهای ایمنی مربوط به قرار گرفتن انسان در معرض میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی

یکی از جدیدترین و شاید مهمترین کاربردهای انتقال بی سیم قدرت که به تازگی توجه محققان بسیاری را به خود معطوف ساخته، شکل نوینی از ارتباطات بی سیم است که در آن دستگاه‌های بی سیم از انرژی فراورده شده به منظور ارسال/رمزگشایی اطلاعات به/از دستگاه‌های دیگر استفاده می‌کنند [۱۹-۲۱]. این فناوری که انتقال همزمان قدرت و اطلاعات (سوپیت) نام گرفته، انتظار می‌رود بدون وقفه‌ی حاصل از اتمام انرژی در ارتباطات و با تحمل ظرفیت بالاتر نسبت به ارتباطات متکی بر-باتری، سبب افزایش آسایش کاربران گردد. از فواید دیگر این فناوری می‌توان به هزینه‌های نگهداری بسیار کمتر و انعطاف پذیری بالاتر اشاره نمود. البته به دلیل تضعیف و میرایی بالای انرژی میکروویو در فاصله‌های دور، از این فناوری معمولاً در پشتیبانی دستگاه‌های کم-مصرف (مانند برجسب‌های سامانه‌های شناسایی با امواج رادیویی، یا حسگرها) استفاده می‌شود؛ هرچند که پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های آنتن و مدارهای گردآوری انرژی آر-اف، امکان انتقال سطح و کیفیت بالاتری از قدرت امواج میکروویو را نیز فراهم آورده است. بنابراین، به نظر می‌رسد که فناوری سوپیت در آینده عنصری کلیدی در سیستم‌های صنعتی و تجاری محبوب بشر خواهد بود؛ سیستم‌های نوظهوری مانند اینترنت اشیا/اینترنت همه چیز و میلیاردها ابزارهای حسگری/RFID به همراه شبکه‌های بزرگ حسگر بی سیم. آنگونه که ذکر شد، در فناوری سوپیت اطلاعات را نیز می‌توان همراه با انرژی توسط یک شکل موج ارسال نمود. در پژوهش‌های اولیه، کارآمدی الگوی این فناوری در استفاده بهینه از طیف فرکانس در مقایسه با ارسال مجزای اطلاعات و انرژی به اثبات رسیده است [۱۹-۲۱]. پژوهش‌های اخیر همچنین نشان می‌دهد که برای سیستم مبتنی بر فناوری سوپیت سه مدل ارتباطی متعارف می‌توان ترسیم نمود، که آنها را می‌توان در غالب ساختارهای «تعویض زمان» یا «تقسیم قدرت» پیاده‌سازی نمود.

در این مدل، که شامل دستگاه‌های فرستنده و گیرنده متعدد است، برخی از مسیرهای ارتباطی

بینایی در قرنیه، که حتی بدون ورود فتون‌ها به چشم (یعنی به هنگام بسته بودن چشم) در انسان بوجود می‌آید. پدید آمدن فسفن را از علائم پیش از جدا شدن شبکیه می‌دانند. به هر حال، توصیه همه این گروه‌ها کاهش در معرض قرار گرفتن انسان به پایین‌ترین سطح ممکن از میزان امواج الکترومغناطیسی است. لذا بدین منظور، تمرکز اساسی پژوهشی‌های کنونی در توسعه سیستم‌های مبتنی بر فناوری سوپت، متمرکز نمودن پرتوی اصلی، کاهش امواج جانبی، توسعه گیرنده‌های آرایه‌ای کارآمد، هوشمندسازی این سیستم‌ها و هشیارسازی آنها نسبت به قطع یا محدود نمودن عملیات در حضور انسان است.

جمع بندی

انتقال بی سیم قدرت و اطلاعات در گستره برد-بلند، بویژه در کاربری‌هایی که نبود شبکه‌های سیم برق نیاز باشد، فناوری‌ای توانمند و نوید بخش است. با اذعان به افزایش دائمی علاقه به کاربردهای ذکر شده، پژوهش‌های متعددی در حال شکل‌گیری و توسعه است که برخی از آنها، بویژه در طراحی آرایه‌های سخت افزاری فرستنده و گیرنده، نتایج تجربی موفقی نیز ارائه نموده‌اند. در این نوشتار تلاش گردید تا با مروری کوتاه بر فناوری‌های انتقال بی سیم قدرت، به معرفی پیشرفته‌ترین شکل آن یعنی فناوری انتقال همزمان قدرت و اطلاعات (سوپت) و کاربردهای آن پرداخته و با بررسی فرصت‌ها و چالش‌ها در طراحی سیستم‌هایی مبتنی بر این فناوری، آینده‌ای برای آن ترسیم شود. به عبارت دیگر تلاش گردید تا فناوری سوپت به بخش پژوهشی کشور معرفی گردد تا پژوهش‌هایی به منظور طراحی و تولید محصول و نیز ارائه خدمات ارتقای سطح زندگی شهروندان هدایت شوند. بدیهی است برگزاری دوره‌های آموزشی، کارگاه‌ها، همایش‌ها و مسابقات ملی و بین‌المللی نیز اقداماتی تعیین‌کننده در این مسیر خواهند بود.

و الکترومغناطیسی یک نگرانی واقعی است. بر اساس نتایج پژوهش‌های انجام شده، تأثیرات پایدار آسیب سلامت به طور کلی به فرکانس و شدت میدان الکترومغناطیسی برمی‌گردد. در این قالب، امواج با فرکانس پایین‌تر از فرکانس گذار (100KHz) غالباً تأثیرات تحریک الکتریکی، و بالاتر از آن، تأثیرات گرمایی خواهند داشت [13]. در مقررات آموزشی و محدودکننده‌ای که توسط سازمان بهداشت جهانی، انجمن مهندسين برق و الکترونیک، و نیز کمیسیون بین‌المللی حفاظت از پرتوهای غیر یونیزان به منظور کاهش در معرض قرار گرفتن انسان پیشنهاد گردیده و راهکارهایی برای ایجاد ارتباط بی سیم در مسافت‌های متفاوت ارائه گردیده است. در مسافت‌های نزدیک، مسئله اصلی ایمنی «شار نشتی» است که اکثر تحقیقات بر کاهش آن متمرکز بوده و ظاهراً در این دسته مسائل مربوط به میدان‌های الکترومغناطیسی زیاد جدی نمی‌باشند. در انتقال قدرت بی سیم در مسافت‌های متوسط و دور، مسئله اصلی ایمنی میدان‌های متغیر با زمان الکتریکی، مغناطیسی و الکترومغناطیسی (در محدوده فرکانسی 3KHz - 300GHz) هستند، که برای آن نیز سازمان‌های فوق‌الذکر توصیه‌هایی به صورت جداگانه برای موارد شغلی و موارد عمومی ارائه نموده‌اند. البته نکته مشترک همه این دستورالعمل‌ها، تعیین میزان بالای سطح مرجع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در فرکانس‌های پایین (کمتر از 10MHz)، و کاهش شدید این میزان در فرکانس‌های بالاتر و مایکروویو می‌باشد؛ همچنین برای چگالی قدرت رابطه‌ای عکس این رفتار مشاهده می‌شود [24]. به لحاظ زیستی نیز، بر اساس نتیجه آخرین بررسی‌های تحقیقاتی گروه‌های مذکور، شواهد پایداری مبنی بر ایجاد سرطان بواسطه قرار گرفتن انسان در معرض میدان‌های الکترومغناطیسی فرکانس‌های رادیویی (آر اف) یافت نشده است. اما این شواهد نشان‌دهنده افزایش دمای بدن یا گرمای بافت‌ها، و همچنین تحریک بافت‌های عصبی و ماهیچه‌ای می‌باشند. بعلاوه، بر اساس تحقیقات ICNIRP، القای فسفن‌های قرنیه را می‌توان در تعیین محدودیت‌های ایمنی در این زمینه در نظر گرفت. فسفن پدیده‌ای است موقت از احساس نور یا نمایان شدن لکه‌هایی در میدان

- [14] I. Mayordomo, T. Dräger, P. Spies, J. Bernhard, and A. Pflaum, "An overview of technical challenges and advances of inductive wireless power transmission," *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1302–1311, June 2013.
- [15] A. L. Manez, "Optimization of Inductive Resonant Coupling Links for Low Power and Mid-range Wireless Power Transfer," *Politecnica*, 2014.
- [16] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljai, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, July 2007.
- [17] A. Massa, G. Oliver, F. Viani, P. Rocca, "Array Designs for Long-Distance Wireless Power Transmission: State-of-the-Art and Innovative Solutions," *Proc. of the IEEE*, Vol. 101, No. 6, June 2013, pp. 1464-1481.
- [18] C. H. Lee, "Wireless Information and Power Transfer for Communication Recovery in Disaster Areas," 15th IEEE Int. Symp. on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, June 2014, pp.1-4.
- [19] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy tradeoff," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 61, no. 11, pp. 4754-4767, Nov. 2013.
- [20] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Trans. Wireless Comm.*, vol. 12, no. 5, pp. 1989-2001, May 2013.
- [21] Y. J. Ren and K. Chang, "5.8 GHz circularly polarized dual-dipole rectenna and rectenna array for microwave power transmission," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 4, pp. 1495–1502, Apr. 2006.
- [22] S. Bi, C. K. Ho, and R. Zhang, "Wireless Powered Communication: Opportunities and Challenges," *IEEE Communications Magazine on Networking and Internet Architecture*, 30 December 2014, pp. 1-19.
- [23] X. Di, K. Xiong and Z. Qiu, "Simultaneous Wireless Information and Power Transfer for Two-hop OFDM Relay System," 2 July 2014, pp. 1-18.
- [24] A. L. Máñez, "Optimization of Inductive Resonant Coupling Links for Low Power and Mid-Range Wireless Power Transfer," *Tra-bajo Fin De Master*, September 2014.
- [1] Z. D. Boren, "There are officially more mobile devices than people in the world," *The Independent, Lifestyle Tech News*, 7 Oct 2014.
- [2] C.S. Wong, N. S. Duzgoren-Aydin, A. Aydin, and M.H. Wong, "Evidence of excessive releases of metals from primitive e-waste processing in Guiyu, China," *Environmental Pollution*, Jan. 18, 2007.
- [3] D. Lowther and R. Fogg, "Mobile industry unites to drive universal charging solution for mobile phones," *GSM Association Press Release*, 2014.
- [4] M. Huntin and M. Leblanc, "Transformer system for electric railways," *U.S. Patent 527 857*, Oct. 23, 1894.
- [5] H. Winfield Secor, "Tesla apparatus and experiments-how to build both large and small Tesla and Oudin coils and how to carry on spectacular experiments with them," *Practical Electrics*, Nov. 1921.
- [6] W. C. Brown, "The technology and application of free-space power transmission by microwave beam," *Proc. IEEE*, vol. 62, no. 1, pp. 11–25, Jan. 1974.
- [7] J. Gavan and S. Tapuch, "Microwave wireless-power transmission to high-altitude-platform systems," *Radio Sci. Bull.*, no. 334, pp. 25–42, Sep. 2010.
- [8] J. Gozalvez, "WiTricity-the wireless power transfer," *IEEE Vehicles Technology Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 38–44, June 2007.
- [9] J. C. Lin, "Space solar-power station, wireless power transmission, and biological implications," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 43, no. 5, pp. 166–169, Oct. 2001.
- [10] G. Covic and J. Boys, "Modern trends in inductive power transfer for transportation applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 1, pp. 28–41, Mar. 2013.
- [11] G. Franceschetti, "The new scientific scenario of wireless power transmission," in *Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, Toronto, ON, Canada, Jul. 11–17, 2010.
- [12] J. Garnica, R. Chinga, and J. Lin, "Wireless power transmission: From far field to near field," *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1321–1331, June 2013.
- [13] S. Hui, W. Zhong, and C. Lee, "A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4500-4511, Mar. 2013.