



Amirkabir University of Technology
(Tehran Polytechnic)
Department of Electrical Engineering

Ph.D. Thesis

**Efficiency Enhancement in Simultaneous
Transmission of Power and Data Through an
Inductive Link for Cochlear Implants**

By
Farshad Gozalpour

Supervisor
Dr. Mohammad Yavari

Summer 2024



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)
دانشکده مهندسی برق

رساله دکتری
رشته مهندسی برق، گرایش الکترونیک

عنوان پایان نامه
بهبود راندمان در انتقال همزمان توان و داده از طریق لینک القایی
برای پروتز کاشت حلزونی

نگارش
فرشاد گوزل‌پور

استاد راهنما
دکتر محمد یآوری

تابستان ۱۴۰۳

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



به نام خدا

تاریخ: ۱۴۰۳/۰۵/۲۱

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب فرشاد گوزل پور متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان‌نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مآخذ بلامانع است.

فرشاد گوزل پور

امضاء

تقديم

تقديم به:

پدر و مادر عزيزم

تقدیر

با سپاس فراوان از پروردگار متعال که بار دیگر بنده خود را مورد لطف و عنایت قرار داد تا به کمک او بتوانم این کار را به انجام برسانم. در اینجا بر خود لازم می‌دانم از زحمات ارزشمند استاد راهنمای گرامی جناب آقای دکتر محمد یآوری کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. در طول تحصیل دوره دکتری، ایشان نه تنها بنده را از چشمه علم و معرفت سرشار خویش سیراب کردند، بلکه در ابعاد مختلف زندگی همواره راهنما و دلسوز بنده بوده و هستند. همچنین از زحمات اساتید ممتحن گرامی این رساله، جناب آقای دکتر سید ادیب ابریشمی‌فر (استاد دانشگاه علم و صنعت ایران)، جناب آقای دکتر شاهین آشتیانی (استاد دانشگاه تهران)، جناب آقای دکتر عبدالعلی عبدی‌پور (استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر)، و جناب آقای دکتر محسن معزی (استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر) کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین لازم می‌دانم از پدر و مادر عزیزم که در این راه اینجانب را همراهی نموده و همواره در سختی‌ها روحیه امید و تلاش را در من زنده نگه داشتند قدردانی نمایم. از خداوند منان برای همه اساتید و خانواده‌ام، صحت و تندرستی و موفقیت را در تمامی مراحل زندگی مسئلت دارم.

چکیده

در این پایان‌نامه، یک فرستنده برای انتقال هم‌زمان توان و داده با مدولاسیون FSK و با استفاده از یک لینک القایی برای پروتز حلزون شنوایی پیشنهاد شده است که شامل تقویت‌کننده توان کلاس E، لینک القایی دو بانده، مدولاتور، و دمدولاتور است. با ترکیب کوپل‌های PCB و سلونوئید در این لینک، دو فرکانس رزونانس حاصل می‌شود و توان مورد نیاز با راندمان زیادی در هر دو حامل FSK به بار منتقل می‌شود. انتخاب ۵ MHz و ۱۰ MHz به عنوان حامل‌های FSK باعث می‌شود تلفات حرارتی امواج الکترومغناطیسی در بافت بدن قابل صرف‌نظر باشد و همچنین به ازای نرخ داده ۲/۵ Mbps، به نسبت DRCF برابر با ۳۳/۳٪ دست یافت. فرستنده پیشنهادی با استفاده از قطعات COTS پیاده‌سازی شده است و از یک لایه گوشت گاو با ضخامت ۴ mm در کیسه پلی‌اتیلن برای تقلید ناحیه اسکالپ پشت گوش، و از سیلیکان زیست‌سازگار با ضخامت ۱ mm به عنوان محافظ هرمتیک کوپل‌های PCB در برابر مایعات و بافت بدن استفاده شده است. ضریب گذردهی الکتریکی سیلیکان خیلی کم بوده و اثرات پارازیتی بافت بدن را در کوپل کمینه می‌کند. به ازای ارسال داده شبه تصادفی با نرخ ۲/۵ Mbps، مقدار PDL و PTE اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر با ۴۸/۲ mW و ۳۸/۸٪ است. BER اندازه‌گیری شده نیز کم‌تر از 10^{-5} است. در مرحله بعد و با اضافه کردن یکسوساز، هر دو بخش مدولاتور و گیرنده در تکنولوژی ۱۸۰ nm شرکت TSMC و با نرم‌افزار Cadence جانمایی شده است و برای تقویت‌کننده توان نیز از مدل Spice قطعات COTS استفاده شده است. به ازای ارسال داده با نرخ ۲/۵ Mbps و فاصله ۶ mm بین کوپل‌ها، PDL و PTE شبیه‌سازی شده در گوشه TT و دمای ۲۷ °C به ترتیب برابر با ۳۴/۹۷ mW و ۳۳/۵۵٪ است. مقدار BER نیز کم‌تر از 10^{-5} است.

در طراحی لینک‌های القایی برای پروتزهای زیست‌پزشکی، استفاده از یک فرایند تکرار شونده برای رسیدن به اهداف مورد نظر مانند PDL و PTE ضروری است. شبیه‌سازی‌های مبتنی بر FEM برای استخراج پارامترهای الکترومغناطیسی، یکی از دلایل اصلی زمان‌بر بودن این فرایند است. در این پایان‌نامه، یک مدل دو بعدی با تقارن محوری برای کوپل‌های PCB و سلونوئید در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics پیشنهاد شده است که قابلیت آن در تبدیل حجم هندسی سه بعدی به نواحی دو بعدی، موجب سرعت بخشیدن به شبیه‌سازی‌های FEM می‌شود. به منظور بررسی دقت مدل پیشنهادی، یک نمونه کوپل PCB و سلونوئید با مشخصات هندسی مناسب برای کاشت در بدن ساخته شده است. تطابق نتایج اندازه‌گیری با نتایج شبیه‌سازی مبتنی بر مدل دو بعدی نشان می‌دهد مدل پیشنهادی در عین حال که زمان مورد نیاز در شبیه‌سازی‌های مبتنی بر FEM و فرایند طراحی لینک القایی را در حدود ۹۰ درصد کاهش می‌دهد، از دقت خوبی نیز در استخراج پارامترهای الکترومغناطیسی کوپل‌ها مانند ضریب تزویج، مقاومت AC سری، اندوکتانس، خازن پارازیتی موازی، و ضریب کیفیت برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: پروتز حلزون شنوایی، لینک القایی دو بانده، انتقال هم‌زمان توان و داده، مدولاسیون FSK، راندمان انتقال توان، مدل دو بعدی با تقارن محوری.

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱- انگیزه‌ها و اهداف	۱
۲-۱- دستاوردهای پایان‌نامه	۷
۳-۱- ساختار پایان‌نامه	۸
فصل ۲: انتقال بی‌سیم توان و داده و مروری بر پیشینه پژوهشی	۹
۱-۲- پروتز حلزون شنوایی	۹
۲-۲- لینک القایی	۱۲
۱-۲-۲- مدل‌سازی کوئل‌ها	۱۵
۲-۲-۲- مدل‌سازی لینک القایی	۱۸
۳-۲-۲- انتخاب ساختار رزونانسی	۲۳
۴-۲-۲- انشعاب فرکانسی	۲۴
۵-۲-۲- انتقال توان و داده با لینک‌های القایی مجزا	۲۵
۱-۵-۲-۲- پیاده‌سازی هم‌سطح و هم‌محور	۲۸
۲-۵-۲-۲- پیاده‌سازی متعامد و شکل‌هشتی	۲۹
۳-۵-۲-۲- دمدولاتور مقاوم در برابر تداخل حامل توان	۳۱
۶-۲-۲- ایمنی الکترومغناطیسی و حرارتی	۳۲
۳-۲- تقویت‌کننده توان	۳۴
۱-۳-۲- معادلات طراحی	۳۶
۲-۳-۲- جبران‌سازی تغییرات بار و فاصله کوئل‌ها	۳۹
۱-۲-۳-۲- شبکه تطبیق امپدانس	۳۹
۴-۲- یکسوساز ولتاژ	۴۱

۴۲	۱-۴-۲- یکسوسازهای غیرفعال
۴۴	۲-۴-۲- یکسوساز فعال مبتنی بر مقایسه گر
۴۵	۳-۴-۲- جبران سازی تأخیر
۴۶	۱-۳-۴-۲- تزریق آفست مصنوعی در مقایسه گر
۴۹	۵-۲- انتقال توان و داده با لینک القایی مشترک
۵۱	۱-۵-۲- پیاده سازی طرح های مدولاسیونی برای داده Downlink
۵۹	۶-۲- نتیجه گیری
۶۰	فصل ۳: مدل پیشنهادی برای کویل ها و نتایج اندازه گیری و شبیه سازی
۶۰	۱-۳- مقدمه
۶۲	۲-۳- مدل پیشنهادی دو بعدی با تقارن محوری
۶۶	۳-۳- نتایج اندازه گیری و شبیه سازی پارامترهای الکترومغناطیسی
۶۶	۱-۳-۳- اندوکتانس، مقاومت AC سری، و خازن پارازیتی موازی
۷۵	۲-۳-۳- ضریب تزویج
۸۱	۴-۳- نتیجه گیری
۸۳	فصل ۴: فرستنده پیشنهادی توان و داده و نتایج اندازه گیری و شبیه سازی
۸۳	۱-۴- مقدمه
۸۴	۲-۴- لینک القایی دو بانده
۸۷	۳-۴- نتایج اندازه گیری و شبیه سازی لینک القایی دو بانده
۹۱	۴-۴- فرستنده پیشنهادی با لینک القایی دو بانده
۹۶	۵-۴- نتایج اندازه گیری فرستنده پیشنهادی
۱۰۳	۶-۴- مقایسه با کارهای پیشین
۱۰۶	۷-۴- افزودن یکسوساز به فرستنده پیشنهادی
۱۰۸	۸-۴- نتایج شبیه سازی با یکسوساز اضافه شده
۱۱۶	۹-۴- مقایسه با کارهای پیشین

۱۱۷	 ۴-۱۰- نتیجه‌گیری
۱۲۰	 فصل ۵: جمع‌بندی و پیشنهادات
۱۲۰	 ۵-۱- جمع‌بندی
۱۲۲	 ۵-۲- پیشنهادات
۱۲۴	 فهرست مراجع

فهرست جداول

- جدول (۱-۲): مقایسه ضرایب تزویج، بهره مسیرهای مختلف، و SITR برای دو نوع ... ۲۹
- جدول (۱-۳): مشخصات و پارامترهای هندسی مربوط به کوئل PCB و سلونوئید ... ۶۷
- جدول (۲-۳): ویژگی‌های الکترومغناطیسی مواد استفاده شده در کوئل PCB و سلونوئید ... ۶۷
- جدول (۱-۴): مقادیر عناصر استفاده شده در فرستنده پیشنهادی توان و داده برای ستاپ I و II ۱۰۱
- جدول (۲-۴): پارامترهای هندسی کوئل‌های PCB (L_1 و L_2) و سلونوئید (L_3 و L_4) برای ... ۱۰۱
- جدول (۳-۴): توان مصرفی اندازه‌گیری شده مربوط به بخش‌های مختلف به ازای ... ۱۰۴
- جدول (۴-۴): مقایسه پارامترهای مختلف فرستنده پیشنهادی با سایر کارها ... ۱۰۷
- جدول (۵-۴): اندازه ترانزیستورهای بخش مدولاتور و راه‌اندازها ... ۱۱۲
- جدول (۶-۴): اندازه ترانزیستورهای بخش گیرنده ... ۱۱۲
- جدول (۷-۴): اندازه مقاومت‌ها و خازن‌های بخش گیرنده ... ۱۱۲
- جدول (۸-۴): مقادیر عناصر استفاده شده در بخش لینک القایی فرستنده پیشنهادی ... ۱۱۳
- جدول (۹-۴): پارامترهای هندسی کوئل‌های PCB (L_1 و L_2) و سلونوئید (L_3 و L_4) ... ۱۱۳
- جدول (۱۰-۴): مقدار تأخیر تولید شده توسط سول تأخیر در سه گوشه مختلف و ... ۱۱۵
- جدول (۱۱-۴): مقایسه پارامترهای مختلف فرستنده پیشنهادی با مدولاتور و ... ۱۲۰

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱): کالبدشناسی سیستم شنوایی انسان ۲
- شکل (۲-۱): ساختار داخلی حلزون شنوایی در گوش انسان ۲
- شکل (۳-۱): انتقال بی‌سیم توان به روش تزویج خازنی ۴
- شکل (۴-۱): انتقال بی‌سیم توان به روش التراسونیک ۵
- شکل (۵-۱): انتقال بی‌سیم توان به روش تزویج القایی ۷
- شکل (۱-۲): اجزای تشکیل دهنده پروتز حلزون شنوایی ۱۱
- شکل (۲-۲): پیاده‌سازی سیستمی برای دو بخش بیرونی و داخلی پروتز حلزون شنوایی ۱۱
- شکل (۳-۲): سیستم تزویج القایی برای انتقال بی‌سیم توان ۱۳
- شکل (۴-۲): ساختار رزونانسی (الف) SS، (ب) SP، (پ) PS، و (ت) PP ۱۳
- شکل (۵-۲): فرایند طراحی در یک لینک القایی ۱۴
- شکل (۶-۲): ساختار و پارامترهای هندسی در کوپل‌های (الف) PCB، (ب) سلونوئیدی، و ۱۵
- شکل (۷-۲): برشی از سطح مقطع یک کوپل PCB به همراه محیط احاطه کننده چند لایه آن ۱۷
- شکل (۸-۲): کوپل انعطاف‌پذیر ساخته شده با تزریق آلیاژ فلز مایع EGaIn در ۱۸
- شکل (۹-۲): امپدانس منعکس شده از ثانویه به اولیه در یک لینک القایی ۲۰
- شکل (۱۰-۲): مثالی از Z_2 در یک لینک القایی با ترکیب رزونانسی موازی در سمت ثانویه ۲۰
- شکل (۱۱-۲): استفاده از لینک‌های مجزا برای انتقال توان و داده ۲۵
- شکل (۱۲-۲): پیاده‌سازی کوپل‌های توان و داده به صورت (الف) هم‌سطح، (ب) هم‌محور ۲۸
- شکل (۱۳-۲): پیاده‌سازی کوپل‌های توان و داده به صورت (الف) متعامد بر کوپل توان، (ب) ۳۰
- شکل (۱۴-۲): پیاده‌سازی کوپل‌های توان و داده به صورت متعامد بر کوپل توان ۳۰
- شکل (۱۵-۲): دمدولاتور ASK مقاوم در برابر تداخل ناشی از حامل توان ۳۱

-
- شکل (۲-۱۶): افزایش دمای ناشی از کوئل ساخته شده از طلا به ازای جریان‌های ... ۳۳
- شکل (۲-۱۷): (الف) شماتیک مداری تقویت‌کننده توان کلاس E (ب) شکل موج‌های ... ۳۵
- شکل (۲-۱۸): تقویت‌کننده توان کلاس E ۳۷
- شکل (۲-۱۹): سیستم القایی انتقال بی‌سیم توان به همراه شبکه تطبیق ۴۰
- شکل (۲-۲۰): پیاده‌سازی‌های مختلف از یکسوسازهای غیرفعال ۴۳
- شکل (۲-۲۱): یکسوساز فعال مبتنی بر مقایسه‌گر ۴۵
- شکل (۲-۲۲): تأخیر on و off در یکسوساز فعال مبتنی بر مقایسه‌گر ۴۶
- شکل (۲-۲۳): مقایسه‌گر با (الف) بایاس نامتعادل، (ب) اندازه‌بندی نامتعادل ... ۴۷
- شکل (۲-۲۴): جزئیات مداری جبران‌سازی تأخیر on و off مبتنی بر نمونه‌برداری و ... ۴۸
- شکل (۲-۲۵): جبران‌سازی مبتنی بر نمونه‌برداری و تزریق جریان آفست. (الف) تأخیر on ... ۴۸
- شکل (۲-۲۶): انتقال هم‌زمان توان و داده با استفاده از لینک‌های القایی جداگانه ۵۰
- شکل (۲-۲۷): انتقال هم‌زمان توان و داده با استفاده از فقط یک لینک القایی ۵۰
- شکل (۲-۲۸): (الف) شمای مداری پیشنهاد شده در [۱۲۳] برای انتقال توان و داده ... ۵۳
- شکل (۲-۲۹): دو پیشنهاد ارائه شده در [۲۳] برای انتقال توان و داده ASK با یک لینک القایی ۵۴
- شکل (۲-۳۰): مدار پیشنهاد شده در [۱۲۴] برای انتقال توان و داده ASK با یک لینک القایی ۵۵
- شکل (۲-۳۱): مدار پیشنهاد شده در [۲۰] برای انتقال توان و داده SCM با یک لینک القایی ۵۶
- شکل (۲-۳۲): شکل موج با مدولاسیون CWM به ازای نرخ داده و pi مختلف ۵۷
- شکل (۲-۳۳): پیاده‌سازی مدولاسیون FSK در سیستم انتقال توان و داده با ... ۵۸
- شکل (۲-۳۴): لینک القایی استفاده شده برای انتقال توان و داده FSK با کمک پدیده ... ۵۹
- شکل (۳-۱): فرایند ساده شده طراحی لینک القایی در محصولات زیست‌پزشکی با استفاده از ... ۶۱
- شکل (۳-۲): (الف) کوئل PCB، (ب) سلونوئید، (پ) مدل الکتریکی کوئل PCB و سلونوئید ۶۲

-
- شکل (۳-۳): مدل دو بعدی با تقارن محوری برای (الف) کوئل PCB، (ب) سلونوئید ۶۴
- شکل (۴-۳): (الف) کوئل PCB، و (ب) سلونوئید ساخته شده با مشخصات هندسی جدول (۱-۳) ۶۷
- شکل (۵-۳): مش‌بندی و لایه مرزی در (الف) سطح مقطع مستطیلی مربوط به هادی در ۶۸
- شکل (۶-۳): اندوکتانس و مقاومت AC سری محاسبه شده، شبیه‌سازی شده، و ۶۹
- شکل (۷-۳): چگالی جریان در سطوح مقطع هادی مربوط به (الف) کوئل PCB، و (ب) سلونوئید ۷۳
- شکل (۸-۳): ضریب کیفیت (الف) کوئل PCB، و (ب) سلونوئید در ۷۳
- شکل (۹-۳): فرکانس f_{SRF} شبیه‌سازی شده برای (الف) کوئل PCB و (ب) سلونوئید ۷۴
- شکل (۱۰-۳): مدل دو بعدی برای شبیه‌سازی ضریب تزویج بین دو کوئل PCB ۷۶
- شکل (۱۱-۳): ضریب تزویج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بین دو کوئل PCB ۷۶
- شکل (۱۲-۳): ضریب تزویج شبیه‌سازی شده به ازای تغییرات فاصله عمودی و ۷۷
- شکل (۱۳-۳): ضریب تزویج شبیه‌سازی شده به ازای تغییرات فاصله عمودی و ۷۷
- شکل (۱۴-۳): شبیه‌سازی پارامتری ضریب تزویج بین دو کوئل PCB به عنوان ۷۸
- شکل (۱۵-۳): شبیه‌سازی حداکثر ضریب تزویج بین دو کوئل PCB به عنوان ۷۹
- شکل (۱۶-۳): (الف) ناحیه مربوط به Ψ_{k-max} ، (ب) ناحیه مربوط به k_{max} متناظر ۸۰
- شکل (۱-۴): (الف) کوئل دو رزونانسه، (ب) لینک القایی دو رزونانسه، (پ) مدل T لینک ۸۹
- شکل (۲-۴): (الف) لینک القایی دو رزونانسه، (ب) ستاپ اندازه‌گیری پارامترهای ۹۱
- شکل (۳-۴): (الف) PDL و (ب) PTE شبیه‌سازی شده لینک القایی دو رزونانسه ۹۲
- شکل (۴-۴): نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی برای (الف) PDL در f_{01} (۵ MHz)، (ب) ۹۳
- شکل (۵-۴): نتایج اندازه‌گیری برای (الف) PDL و (ب) PTE در بازه فرکانسی ۹۴
- شکل (۶-۴): فرستنده پیشنهادی توان و داده برای پروتز حلزون شنوایی به همراه ۹۵
- شکل (۷-۴): (الف) فرستنده پیشنهادی توان و داده پیاده‌سازی شده با قطعات ۹۹
- شکل (۸-۴): ستاپ اندازه‌گیری عملکرد فرستنده پیشنهادی. (الف) ستاپ I: فاصله ۱۰۰
-

-
- شکل (۹-۴): شکل موج‌های اندازه‌گیری شده ولتاژ درین و ولتاژ گیت M_{E1} (الف) ... ۱۰۲
- شکل (۱۰-۴): شکل موج FSK دریافت شده، داده آشکارسازی شده، و کلاک بازیابی ... ۱۰۳
- شکل (۱۱-۴): PDL و PTE اندازه‌گیری شده فرستنده به ازای نرخ داده ۲/۵ Mbps و ... ۱۰۵
- شکل (۱۲-۴): فرستنده پیشنهادی برای پروتز حلزون شنوایی با مدولاتور و ... ۱۰۹
- شکل (۱۳-۴): شمای مداری مدولاتور و راه‌اندازهای CMOS در فرستنده پیشنهادی ... ۱۰۹
- شکل (۱۴-۴): شمای مداری گیرنده CMOS در فرستنده پیشنهادی برای ... ۱۱۰
- شکل (۱۵-۴): جانمایی مدولاتور و راه‌اندازهای CMOS در تکنولوژی ۱۸۰ nm شرکت TSMC ۱۱۱
- شکل (۱۶-۴): جانمایی گیرنده CMOS در تکنولوژی ۱۸۰ nm شرکت TSMC ۱۱۱
- شکل (۱۷-۴): مدل‌سازی لایه‌های گوشت گاو و سیلیکان بین کویل‌های فرستنده و ... ۱۱۳
- شکل (۱۸-۴): نتایج شبیه‌سازی زمانی ولتاژ خروجی یکسوساز ($V_{REC.}$) در ... ۱۱۴
- شکل (۱۹-۴): نتایج شبیه‌سازی ولتاژ خروجی یکسوساز ($V_{REC.}$) در سه گوشه مختلف ... ۱۱۴
- شکل (۲۰-۴): نتایج شبیه‌سازی PDL در سه گوشه مختلف و به ازای ... ۱۱۶
- شکل (۲۱-۴): نتایج شبیه‌سازی PTE_{tot} در سه گوشه مختلف و به ازای ... ۱۱۶
- شکل (۲۲-۴): نتایج شبیه‌سازی شکل موج‌های مدولاتور ۱۱۷
- شکل (۲۳-۴): نتایج شبیه‌سازی شکل موج‌های گیرنده ۱۱۸

علايم اختصارى

ASK	Amplitude Shift Keying
ASK-PPM	Amplitude Shift Keying Pulse Position Modulation
ASK-PWM	Amplitude Shift Keying Pulse Width Modulation
BER	Bit Error Rate
COTS	Commercial-off-the-Shelf
CWM	Carrier Width Modulation
DPSK	Differential Phase Shift Keying
DR	Data Rate
DRCF	Data Rate to Carrier Frequency
FSK	Frequency Shift Keying
FEM	Finite Element Method
FoM	Figure of Merite
IED	Infinite Element Domain
LDO	Low Dropout
LSK	Load Shift Keying
OOK	on-off Keying
PCE	Power Conversion Efficiency
PDL	Power Delivered to Load
PDMS	Polydimethylsiloxane
PGA	Programmable Gain Amplifier
PHM	Pulse Harmonic Modulation
PPM	Pulse Position Modulation
PSK	Phase Shift Keying
PTE	Power Transmission Efficiency
PVT	Process Voltage Temperature
QCWM	Quad Level Carrier Width Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
SRF	Self Resonant Frequency
SAR	Specific Absorption Rate
SCM	Suspended Carrier Modulation
SITF	Signal to Interference Transfer Function
SNR	Signal to Noise Ratio
THD	Total Harmonic Distortion
VCR	Voltage Conversion Ratio
VNA	Vector Network Analyzer
WPT	Wireless Power Transmission
ZVDS	Zero Voltage Derivative Switching
ZVS	Zero Voltage Switching

واژه‌نامه

Cross Coupled	اتصال ضربدری
Skin Effect	اثر پوستی
Total Harmonic Distortion	اعوجاج هارمونیک کل
Ultrasonic	التراسونیک
Stimulation Electrode	الکتروود تحریک
Aliasing	الیاسینگ یا برهم‌افتادگی
Transimpedance	امپدانس انتقالی
Wireless Power Transmission	انتقال بی‌سیم توان
Unbalanced Sizing	اندازه‌بندی نامتعادل
Mutual Inductance	اندوکتانس متقابل
Modulation Index	اندیس مدولاسیون
Frequency Splitting	انشعاب فرکانسی
Unbalanced Biasing	بایاس نامتعادل
Beef Ribs	بخش دنده‌ای گوشت گاو
Substrate	بستر
Cochlear Implant	پروتز حلزون شنوایی
Retinal Prosthesis	پروتز شبکیه چشم
Stacked	پشته شده
Charge Pump	پمپ بار
Signal to Interference Transfer Function	تابع تبدیل سیگنال به تداخل
Annealed	تابکاری شده
Interference	تداخل
Inductive Coupling	تزوید القایی
Capacitive Coupling	تزوید خازنی
Programmable Gain Amplifier	تقویت‌کننده با بهره متغیر
Charge Amplifier	تقویت‌کننده بار
Class-E Power Amplifier	تقویت‌کننده توان کلاس E
Error Amplifier	تقویت‌کننده خطا
Power Delivered to Load	توان منتقل شده به بار
Lateral Displacement	جاب‌جایی جانبی
Coaxial Displacement	جاب‌جایی هم‌محور

Out-of-Plane Current	جریان بیرون صفحه‌ای
Displacement Current	جریان جابه‌جایی
In-Plane Current	جریان درون صفحه‌ای
Leakage Current	جریان نشتی
Conduction Current	جریان هدایتی
Power Carrier	حامل توان
Data Carrier	حامل داده
Demodulator	دمدولاتور
Two-Dimensional Axisymmetric	دو بعدی با تقارن محوری
Junction Diode	دیود پیوندی
Saturable Reactor	راکتور اشباع‌پذیر
Power Transmission Efficiency	راندمان انتقال توان
Power Conversion Efficiency	راندمان تبدیل توان
Conductivity	رسانایی
Finite Element Method	روش اجزای محدود
Biocompatible	زیست‌سازگار
Hair Cell	سلول مویی
Solenoid	سلونوئید
Adaptive System	سیستم تطبیق‌پذیر
Magnet Wire	سیم مغناطیسی
Magnetic Flux	شار مغناطیسی
Pseudorandom	شبه تصادفی
Pacemaker	ضربان‌ساز
Coupling Coefficient	ضریب تزویج
Quality Factor	ضریب کیفیت
Misalignment	عدم تطبیق
Skin Depth	عمق پوستی
Proximity Factor	ضریب مجاورت
Iterative Process	فرایند تکرار شونده
Resonant Frequency	فرکانس رزونانس
Operating Frequency	فرکانس کاری
Effective Diameter	قطر موثر

PCB Coil	کویل PCB
Pancake Coil	کویل پنکیکی
Relative Permittivity	گذردهی الکتریکی نسبی
Coating Layer	لایه پوششی
Inductive Link	لینک القایی
Dual-Band Inductive Link	لینک القایی دو بانده
Analog to Digital Converter	مبدل آنالوگ به دیجیتال
Piezoelectric Transducer	مبدل پیزوالکتریک
Perpendicular	متعامد
Dynamic Range	محدوده پویایی
Modulator	مدولاتور
Modulation	مدولاسیون
Artificial Boundary	مرز مصنوعی
Meshing	مش بندی
Comparator	مقایسه گر
Bit Error Rate	نرخ خطای بیت
Data Rate	نرخ داده
Voltage Conversion Ratio	نسبت تبدیل ولتاژ
Signal to Noise Ratio	نسبت سیگنال به نویز
Data Rate to Carrier Frequency Ratio	نسبت نرخ داده به فرکانس حامل
Relative Permeability	نفوذپذیری مغناطیسی نسبی
Overdrive Voltage	ولتاژ اضافه تحریک
Unregulated Voltage	ولتاژ تنظیم نشده
Ferrite Core	هسته فریت
Cross-Talk	هم شنوایی
Rectifier	یکسوساز

- [1] DR. Dewsnup, "Anatomy of the Ear and Understanding Hearing," <https://www.happyyearshearing.com/anatomy-of-the-ear/> (accessed Nov. 15, 2022).
- [2] S. M. Vlajkovic, and P. R. Thorne, "Purinergic signalling in the cochlea," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, no. 23, pp. 14874, Nov. 2022.
- [3] F.-G. Zeng, "Challenges in improving cochlear implant performance and accessibility," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 64, no. 8, pp. 1662-1664, Aug. 2017.
- [4] F.-G. Zeng, S. Rebscher, W. Harrison, X. Sun, and H. Feng, "Cochlear implants: system design, integration, and evaluation," *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 1, pp. 115-142, Nov. 2008.
- [5] M. Tamura, T. Segawa, and M. Matsumoto, "Capacitive coupler for wireless power transfer to intravascular implant devices," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 6, pp. 672-675, Jun. 2022.
- [6] M. Z. Erel, K. C. Bayindir, M. T. Aydemir, S. K. Chaudhary, and J. M. Guerrero, "A comprehensive review on wireless capacitive power transfer technology: Fundamentals and applications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 3116-3143, Dec. 2021.
- [7] A. S. Hossain, P. Mohseni, and H. M. Lavasani, "Design and optimization of capacitive links for wireless power transfer to biomedical implants," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 16, no. 6, pp. 1299-1312, Dec. 2022.
- [8] A. S. Hossain, R. Erfani, P. Mohseni, and H. M. Lavasani, "on the non-idealities of a capacitive link for wireless power transfer to biomedical implants," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 314-325, Apr. 2021.
- [9] A. S. Hossain, P. Mohseni, and H. M. Lavasani, "A Resonant Capacitive Wireless Power and Data Transfer Link with 52% PTE and 6.5 Mbps Data Rate for Biomedical Implants," in *IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*, Nov. 2022, pp. 292-296.
- [10] L. Yang, B. Feng, Y. Zhang, X. Li, L. Zhang, X. Chen, J. Nie, H. Wen, J. Tian, and J. Jian, "Single wire capacitive wireless power transfer system for wearable biomedical sensors based on flexible graphene film material," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 16, no. 6, pp. 1337-1347, Sep. 2022.
- [11] K. Agarwal, R. Jegadeesan, Y.-X. Guo, and N. V. Thakor, "Wireless power transfer strategies for implantable bioelectronics," *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 10, pp. 136-161, Mar. 2017.
- [12] S. Hosseini, K. Laursen, A. Rashidi, and F. Moradi, "Multi-ring ultrasonic transducer on a single piezoelectric disk for powering biomedical implants," in *41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Oct. 2019, pp. 3827-3830.
- [13] S. Hosseini, K. Laursen, A. Rashidi, T. Mondal, B. Corbett, and F. Moradi, "S-mrut: Sectorized-multiring ultrasonic transducer for selective powering of brain implants," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 68, no. 1, pp. 191-200, Jun. 2020.

-
- [14] M. Meng, and M. Kiani, "Self-image-guided ultrasonic wireless power transmission to millimeter-sized biomedical implants," in *41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Oct. 2019, pp. 364-367.
 - [15] Z. Kashani, and M. Kiani, "A study on ultrasonic wireless power transfer with phased array for biomedical implants," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 713-724, Aug. 2023.
 - [16] A. Rashidi, M. Saccher, C. B. Karuthedath, A. T. Sebastian, A. S. Savoia, F. Lavigne, F. Stubbe, R. Dekker, and V. Giagka, "An Ultrasonically Powered System Using an AlN PMUT Receiver for Delivering Instantaneous mW-Range DC Power to Biomedical Implants," in *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Nov. 2023, pp. 1-4.
 - [17] A. Arnau, *Piezoelectric transducers and applications*, 2nd Edition, Springer, 2004.
 - [18] U. Anwar, Z. Liu, and D. Markovic, "A 6.78-MHz Burst-Mode Controlled Inductive Wireless Power Transfer System for Biomedical Implants With Back-Channel Communication Eliminated Using Transmitter Q-Factor Detection," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 10, no. 5, pp. 6383-6395, Oct. 2022.
 - [19] H. Lyu, and A. Babakhani, "A 13.56-MHz -25-dBm-sensitivity inductive power receiver system-on-a-chip with a self-adaptive successive approximation resonance compensation front-end for ultra-low-power medical implants," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 80-90, Feb. 2021.
 - [20] K. Dehghan, O. Shoaie, and S. J. Ashtiani, "A Class-E Power and Data Transmitter With Improved Data Rate to Carrier Frequency Ratio for Medical Implants," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 69, no. 6, pp. 2692-2696, Jun. 2022.
 - [21] Y. Chen, Y. Liu, Y. Li, G. Wang, and M. Chen, "An energy-efficient ASK demodulator robust to power-carrier-interference for inductive power and data telemetry," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 108-118, Feb. 2022.
 - [22] P. Dehghanzadeh, H. Zamani, and S. Mandal, "Fundamental trade-offs between power and data transfer in inductive links for biomedical implants," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 235-247, Apr. 2021.
 - [23] M. M. Ahmadi, S. Pezeshkpour, and Z. Kabirkhoo, "A high-efficiency ASK-modulated class-E power and data transmitter for medical implants," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 1, pp. 1090-1101, Jan. 2022.
 - [24] N. Soltani, M. ElAnsary, J. Xu, J. Sales Filho, and R. Genov, "Safety-optimized inductive powering of implantable medical devices: Tutorial and comprehensive design guide," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 15, no. 6, pp. 1354-1367, Dec. 2021.
 - [25] L. Qian, K. Qian, Y. Shi, H. Xia, J. Wang, and Y. Xia, "TSV based orthogonal coils with high misalignment tolerance for inductive power transfer in biomedical implants," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 68, no. 6, pp. 1832-1836, Jun. 2021.
 - [26] M. J. Karimi, A. Schmid, and C. Dehollain, "Wireless power and data transmission for implanted devices via inductive links: A systematic review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 6, pp. 7145-7161, Mar. 2021.
-

-
- [27] T. Gajecski, Y. Zhang, and W. Nogueira, "A deep denoising sound coding strategy for cochlear implants," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 70, no. 9, pp. 2700-2709, Sep. 2023.
- [28] X.-H. Qian, Y.-C. Wu, T.-Y. Yang, C.-H. Cheng, H.-C. Chu, W.-H. Cheng, T.-Y. Yen, T.-H. Lin, Y.-J. Lin, and Y.-C. Lee, "Design and in vivo verification of a CMOS bone-guided cochlear implant microsystem," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 66, no. 11, pp. 3156-3167, Nov. 2019.
- [29] S.-H. Wang, Y.-K. Huang, C.-Y. Chen, L.-Y. Tang, Y.-F. Tu, P.-C. Chang, C.-F. Lee, C.-H. Yang, C.-C. Hung, and C.-H. Liu, "Design of a bone-guided cochlear implant microsystem with monopolar biphasic multiple stimulations and evoked compound action potential acquisition and its in vivo verification," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 56, no. 10, pp. 3062-3076, Oct. 2021.
- [30] Y. Xu, C. Luo, F.-G. Zeng, J. C. Middlebrooks, H. W. Lin, and Z. You, "Design, fabrication, and evaluation of a parylene thin-film electrode array for cochlear implants," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 66, no. 2, pp. 573-583, Feb. 2019.
- [31] J. Schott, R. Gransier, J. Wouters, and M. Moonen, "Detection of electrically evoked auditory steady-state responses in cochlear-implant recipients with a system identification based method," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 71, no. 3, pp. 738-749, Mar. 2024.
- [32] T. Oberhoffner, R. Mlynski, S. Schraven, G. Brademann, A. Dierker, P. Spitzer, and M. Hey, "Effects of Intraoperative Cochlear Implant Electrode Conditioning on Impedances and Electrically Evoked Compound Action Potentials," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 71, no. 2, pp. 650-659, Feb. 2024.
- [33] M. Yip, R. Jin, H. H. Nakajima, K. M. Stankovic, and A. P. Chandrakasan, "A fully-implantable cochlear implant SoC with piezoelectric middle-ear sensor and arbitrary waveform neural stimulation," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 50, no. 1, pp. 214-229, Jan. 2015.
- [34] V. Poluboina, A. Pulikala, and A. N. P. Muthu, "An improved noise reduction technique for enhancing the intelligibility of sinewave vocoded speech: Implication in cochlear implants," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 787-796, Dec. 2022.
- [35] D. M. Wohlbauer, W. K. Lai, and N. Dillier, "InterLACE Sound Coding for Unilateral and Bilateral Cochlear Implants," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 71, no. 3, pp. 904-915, Mar. 2024.
- [36] F. Henry, M. Glavin, and E. Jones, "Noise reduction in cochlear implant signal processing: A review and recent developments," *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 16, pp. 319-331, Jul. 2021.
- [37] L. Sijgers, A. Huber, S. Tabibi, J. Grosse, C. Rösli, P. Boyle, K. Koka, N. Dillier, F. Pfiffner, and A. Dalbert, "Predicting cochlear implant electrode placement using monopolar, three-point and four-point impedance measurements," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 69, no. 8, pp. 2533-2544, Aug. 2022.
- [38] G. Yang, R. F. Lyon, and E. M. Drakakis, "A 6 μ W per Channel Analog Biomimetic Cochlear Implant Processor Filterbank Architecture With Across Channels AGC," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 72-86, Feb. 2015.
- [39] P. A. Lawton, F. J. Lin, G. A. Covic, and D. J. Thrimawithana, "A Wireless Synchronization Controller for High-Power Stationary and Semi-Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38,
-

-
- no. 11, pp. 13341-13352, Nov. 2023.
- [40] R. Venkatesan, A. D. Savio, C. Balaji, R. Narayanamoorthi, H. Kotb, A. ELrashidi, and W. Nureldeen, "A Comprehensive Review on Efficiency Enhancement of Wireless Charging System for an Electric Vehicles Application," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 46967-46994, Mar. 2024.
 - [41] T. Campi, S. Cruciani, F. Maradei, A. Montalto, F. Musumeci, and M. Feliziani, "EMI in a cardiac implantable electronic device (CIED) by the wireless powering of a left ventricular assist device (LVAD)," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 4, pp. 988-995, Aug. 2021.
 - [42] C. Vivarelli, F. Censi, G. Calcagnini, F. Freschi, L. Giaccone, A. Canova, and E. Mattei, "Electromagnetic Immunity of Pacemakers and Implantable Defibrillators to Wireless Power Transfer Systems for Automotive: A Provocative Study," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 66, no. 1, pp. 97-107, Feb. 2024.
 - [43] H. Huang, D. Luo, W. Song, M. Zhang, Z. Wang, and G. Li, "A Compact 16-Channel Neural Signal Recorder with Wireless Power and Data Transmission," in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Jul. 2023, pp. 1-5.
 - [44] H.-S. Lee, K. Eom, M. Park, S.-B. Ku, K. Lee, T. Kim, T. Kim, Y.-M. Shon, H. Park, and H.-M. Lee, "A multi-channel neural recording system with neural spike scan and adaptive electrode selection for high-density neural interface," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 70, no. 7, pp. 2844-2857, Jul. 2023.
 - [45] S.-H. Wang, Y.-K. Huang, C.-Y. Chen, C.-F. Lee, C.-H. Yang, C.-C. Hung, C.-H. Liu, M.-D. Ker, and C.-Y. Wu, "Improved design and in vivo animal tests of bone-guided cochlear implant microsystem with monopolar biphasic multiple stimulation and neural action potential acquisition," in *IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)*, Feb. 2021, pp. 1-4.
 - [46] D.-H. Choi, and D.-W. Jee, "A 1984-pixels, 1.26 nW/pixel retinal prosthesis chip with time-domain in-pixel image processing and bipolar stimulating electrode sharing," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 58, no. 10, pp. 2757-2766, Oct. 2023.
 - [47] J. Lee, J. G. Letner, J. Lim, G. Atzeni, J. Liao, A. Kamboj, B. Mani, S. Jeong, Y. Kim, and Y. Sun, "A Sub-mm 3 Wireless Neural Stimulator IC for Visual Cortical Prosthesis With Optical Power Harvesting and 7.5-kb/s Data Telemetry," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 59, no. 4, pp. 1110-1122, Apr. 2024.
 - [48] G. Clark, and C.-P. Richter, "Cochlear Implants: Fundamentals and Applications," *Physics Today*, vol. 57, no. 11, pp. 66-67, Nov. 2004.
 - [49] W. H. Ko, S. P. Liang, and C. D. Fung, "Design of radio-frequency powered coils for implant instruments," *Medical and Biological Engineering and Computing*, vol. 15, pp. 634-640, Nov. 1977.
 - [50] M. Schormans, V. Valente, and A. Demosthenous, "Practical inductive link design for biomedical wireless power transfer: A tutorial," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 12, no. 5, pp. 1112-1130, Oct. 2018.
 - [51] U.-M. Jow, and M. Ghovanloo, "Design and optimization of printed spiral coils for efficient transcutaneous inductive power transmission," *IEEE Transactions on biomedical circuits and systems*, vol. 1, no. 3, pp. 193-202, Sep. 2007.
 - [52] A. N. Laskovski, M. R. Yuce, and T. Dissanayake, "Stacked spirals for biosensor telemetry," *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 1484-1490, Jun. 2011.
 - [53] U.-M. Jow, and M. Ghovanloo, "Optimization of data coils in a multiband wireless
-

-
- link for neuroprosthetic implantable devices,” *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 4, no. 5, pp. 301-310, Oct. 2010.
- [54] U.-M. Jow, and M. Ghovanloo, “Modeling and optimization of printed spiral coils in air, saline, and muscle tissue environments,” *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 3, no. 5, pp. 339-347, Oct. 2009.
- [55] A. Qusba, A. K. RamRakhyani, J.-H. So, G. J. Hayes, M. D. Dickey, and G. Lazzi, “On the design of microfluidic implant coil for flexible telemetry system,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 1074-1080, Apr. 2014.
- [56] A. Draisma, L. Maffioli, M. Gasparini, G. Savelli, E. Pauwels, and E. Bombardieri, “Gallium-67 as a Tumor-seeking Agent in Lymphomas-a Review,” *Tumori Journal*, vol. 84, no. 4, pp. 434-441, Aug. 1998.
- [57] W. M. Haynes, *Handbook of chemistry and physics*, 95th Edition, Boca Raton: CRC press, 2014.
- [58] F. Shaini, R. Shelton, P. Marquis, and A. Shortall, “In vitro evaluation of the effect of freshly mixed amalgam and gallium-based alloy on the viability of primary periosteal and osteoblast cell cultures,” *Biomaterials*, vol. 21, no. 2, pp. 113-119, Jan. 2000.
- [59] C. M. Zierhofer, and E. S. Hochmair, “Geometric approach for coupling enhancement of magnetically coupled coils,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 43, no. 7, pp. 708-714, Jul. 1996.
- [60] F. E. Terman, *Radio Engineers' Handbook*, 1st Edition, New York: McGraw-Hill, 1943.
- [61] *IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz*, C95.1-2005, Apr. 2006.
- [62] G. Lazzi, “Thermal effects of bioimplants,” *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 24, no. 5, pp. 75-81, Sep. 2005.
- [63] E. K. Van Schuylenbergh and R. Puers, *Inductive Powering*, Dordrecht, Netherlands: Springer, 2009.
- [64] K. Hata, T. Imura, and Y. Hori, “Simplified measuring method of kQ product for wireless power transfer via magnetic resonance coupling based on input impedance measurement,” in *43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dec. 2017, pp. 6974-6979.
- [65] R. Jegadeesan, and Y.-X. Guo, “Topology selection and efficiency improvement of inductive power links,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 10, pp. 4846-4854, Oct. 2012.
- [66] W.-Q. Niu, J.-X. Chu, W. Gu, and A.-D. Shen, “Exact analysis of frequency splitting phenomena of contactless power transfer systems,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 60, no. 6, pp. 1670-1677, Jun. 2013.
- [67] M. Schormans, V. Valente, and A. Demosthenous, “Efficiency optimization of class-D biomedical inductive wireless power transfer systems by means of frequency adjustment,” in *37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Nov. 2015, pp. 5473-5476.
- [68] M. Schormans, V. Valente, and A. Demosthenous, “Frequency splitting analysis and compensation method for inductive wireless powering of implantable biosensors,” *Sensors*, vol. 16, no. 8, pp. 1229, Aug. 2016.
- [69] B. Lee, D. Ahn, and M. Ghovanloo, “Three-phase time-multiplexed planar power transmission to distributed implants,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 263-272, Mar. 2016
-

-
- [70] Y.-L. Lyu, F.-Y. Meng, G.-H. Yang, B.-J. Che, Q. Wu, L. Sun, D. Erni, and J. L.-W. Li, "A method of using nonidentical resonant coils for frequency splitting elimination in wireless power transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6097-6107, Nov. 2015.
 - [71] A. Trigui, S. Hached, F. Mounaim, A. C. Ammari, and M. Sawan, "Inductive power transfer system with self-calibrated primary resonant frequency," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6078-6087, Nov. 2015.
 - [72] W. H. Ko, S. P. Liang, and C. D. Fung, "Design of radio-frequency powered coils for implant instruments," *Medical and Biological Engineering and Computing*, vol. 15, no. 6, pp. 634-640, Nov. 1977.
 - [73] G. Wang, P. Wang, Y. Tang, and W. Liu, "Analysis of dual band power and data telemetry for biomedical implants," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 208-215, Jun. 2012.
 - [74] L. S. Theogarajan, "A low-power fully implantable 15-channel retinal stimulator chip," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 43, no. 10, pp. 2322-2337, Oct. 2008.
 - [75] G. Simard, M. Sawan, and D. Massicotte, "Novel coils topology intended for biomedical implants with multiple carrier inductive link," in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Jun. 2009, pp. 537-540.
 - [76] O. P. Gandhi, "Electromagnetic fields: human safety issues," *Annual Review of Biomedical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 211-234, Aug. 2002.
 - [77] C. C. Johnson, and A. W. Guy, "Nonionizing electromagnetic wave effects in biological materials and systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 60, no. 6, pp. 692-718, Jun. 1972.
 - [78] N. O. Sokal, and A. D. Sokal, "Class EA new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers," *IEEE Journal of solid-state circuits*, vol. 10, no. 3, pp. 168-176, Jun. 1975.
 - [79] A. Beigi, F. Tavana, A. A. R. Haeri, and A. Safarian, "Analysis and Design of a Duty-Cycle-Controlled Amplitude Shift Keying Class-E Power Amplifier," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 8, pp. 10470-10479, Aug. 2023.
 - [80] H. Liu, Q. Shao, and X. Fang, "Modeling and optimization of class-E amplifier at subnominal condition in a wireless power transfer system for biomedical implants," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 35-43, Feb. 2017.
 - [81] R. Johnston, and A. Boothroyd, "High-frequency transistor frequency multipliers and power amplifiers," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 7, no. 1, pp. 81-89, Feb. 1972.
 - [82] R. Peden, "Charge-driven HF transistor-tuned power amplifier," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 5, no. 2, pp. 55-63, Apr. 1970.
 - [83] W. J. Chudobiak, and D. F. Page, "Frequency and power limitations of Class-D transistor amplifiers," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 4, no. 1, pp. 25-37, Feb. 1969.
 - [84] N. O. Sokal, "Class-E RF power amplifiers," *Qex Magazine*, vol. 204, no. 1, pp. 9-20, Feb. 2001.
 - [85] F. Raab, "Idealized operation of the class E tuned power amplifier," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 24, no. 12, pp. 725-735, Dec. 1977.
 - [86] P. Troyk, and Z. Hu, "Simplified design equations for class-E neural prosthesis transmitters," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 60, no. 5, pp.
-

-
- 1414-1421, May 2013.
- [87] S. Aldhaher, P. C.-K. Luk, and J. F. Whidborne, "Electronic tuning of misaligned coils in wireless power transfer systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 11, pp. 5975-5982, Nov. 2014.
 - [88] T. C. Beh, M. Kato, T. Imura, S. Oh, and Y. Hori, "Automated impedance matching system for robust wireless power transfer via magnetic resonance coupling," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 9, pp. 3689-3698, Sep. 2013.
 - [89] A. P. Sample, B. H. Waters, S. T. Wisdom, and J. R. Smith, "Enabling seamless wireless power delivery in dynamic environments," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1343-1358, Jun. 2013.
 - [90] M. Liu, S. Liu, and C. Ma, "A high-efficiency/output power and low-noise megahertz wireless power transfer system over a wide range of mutual inductance," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 11, pp. 4317-4325, Nov. 2017.
 - [91] S. Guo, and H. Lee, "An efficiency-enhanced CMOS rectifier with unbalanced-biased comparators for transcutaneous-powered high-current implants," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 44, no. 6, pp. 1796-1804, Jun. 2009.
 - [92] J. Charthad, S. Baltsavias, D. Samanta, T. C. Chang, M. J. Weber, N. Hosseini-Nassab, R. N. Zare, and A. Arbabian, "An ultrasonically powered implantable device for targeted drug delivery," in *38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Oct. 2016, pp. 541-544.
 - [93] P. Li, and R. Bashirullah, "A wireless power interface for rechargeable battery operated medical implants," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 54, no. 10, pp. 912-916, Oct. 2007.
 - [94] H. Uluşan, S. Chamanian, Ö. Zorlu, A. Muhtaroglu, and H. Kùlah, "Neural stimulation interface with ultra-low power signal conditioning circuit for fully-implantable cochlear implants," in *IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*, Mar. 2018, pp. 1-4.
 - [95] T. T. Le, J. Han, A. Von Jouanne, K. Mayaram, and T. S. Fiez, "Piezoelectric micro-power generation interface circuits," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 6, pp. 1411-1420, Jun. 2006.
 - [96] M. Usami, A. Sato, K. Sameshima, K. Watanabe, H. Yoshigi, and R. Imura, "Powder LSI: An ultra small RF identification chip for individual recognition applications," in *IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, Feb. 2004, pp. 398-501.
 - [97] Y.-S. Hwang, C.-C. Lei, Y.-W. Yang, J.-J. Chen, and C.-C. Yu, "A 13.56-MHz low-voltage and low-control-loss RF-DC rectifier utilizing a reducing reverse loss technique," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 12, pp. 6544-6554, Dec. 2014.
 - [98] G. D. Szarka, B. H. Stark, and S. G. Burrow, "Review of power conditioning for kinetic energy harvesting systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 2, pp. 803-815, Feb. 2012.
 - [99] S. Roy, A. W. Azad, S. Baidya, and F. Khan, "A comprehensive review on rectifiers, linear regulators, and switched-mode power processing techniques for biomedical sensors and implants utilizing in-body energy harvesting and external power delivery," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 11, pp. 12721-12745, Nov. 2021.
 - [100] L. Dongsheng, L. Huan, Z. Xuecheng, G. Liang, Y. Ke, and L. Zilong, "A high
-

-
- sensitivity analog front-end circuit for semi-passive HF RFID tag applied to implantable devices,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 62, no. 8, pp. 1991-2002, Aug. 2015.
- [101] J. H. Cheong, S. S. Y. Ng, X. Liu, R.-F. Xue, H. J. Lim, P. B. Khannur, K. L. Chan, A. A. Lee, K. Kang, and L. S. Lim, “An inductively powered implantable blood flow sensor microsystem for vascular grafts,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 59, no. 9, pp. 2466-2475, Sep. 2012.
 - [102] Z. Wang, and S. Mirabbasi, “A low-voltage CMOS rectifier with on-chip matching network and a magnetic field focused antenna for wirelessly powered medical implants,” *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 554-565, Jun. 2019.
 - [103] A. Facen, and A. Boni, “Power supply generation in CMOS passive UHF RFID tags,” in *Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics*, Sep. 2006, pp. 33-36.
 - [104] T. Umeda, H. Yoshida, S. Sekine, Y. Fujita, T. Suzuki, and S. Otaka, “A 950-MHz rectifier circuit for sensor network tags with 10-m distance,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 1, pp. 35-41, Jan. 2006.
 - [105] K. Kotani, and T. Ito, “High efficiency CMOS rectifier circuit with self-Vth-cancellation and power regulation functions for UHF RFIDs,” in *IEEE Asian Solid-State Circuits Conference*, Jan. 2008, pp. 119-122.
 - [106] R. Erfani, F. Marefat, S. Nag, and P. Mohseni, “A 1–10-MHz frequency-aware CMOS active rectifier with dual-loop adaptive delay compensation and > 230-mW output power for capacitively powered biomedical implants,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 55, no. 3, pp. 756-766, Mar. 2020.
 - [107] K. Zheng, X. Liu, Q. Su, X. Wang, and Y. Liu, “A 2MHz CMOS Active Rectifier With PWM Mode Adaptive On/Off Delay Compensation for Wireless Power Transfer Systems,” in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Nov. 2022, pp. 2448-2452.
 - [108] G. Namgoong, E. Choi, W. Park, B. Lee, H. Park, H. Ma, and F. Bien, “3–12-V wide input range adaptive delay compensated active rectifier for 6.78-MHz loosely coupled wireless power transfer system,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 68, no. 6, pp. 2702-2713, Jun. 2021.
 - [109] K. S. Zheng, X. Liu, X. Wang, Q. Su, and Y. Liu, “A 6.78 MHz CMOS Active Rectifier With Hybrid Mode Delay Compensation for Wireless Power Transfer Systems,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 46176-46186, Apr. 2022.
 - [110] G. Namgoong, E. Choi, W. Park, B. Lee, H. Park, H. Ma, and F. Bien, “A 6.78 MHz, 95.0% peak efficiency monolithic two-dimensional calibrated active rectifier for wirelessly powered implantable biomedical devices,” *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 15, no. 3, pp. 509-521, Jun. 2021.
 - [111] H.-C. Cheng, C.-S. A. Gong, and S.-K. Kao, “A 13.56 MHz CMOS high-efficiency active rectifier with dynamically controllable comparator for biomedical wireless power transfer systems,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 49979-49989, Sep. 2018.
 - [112] Y. Ma, K. Cui, Z. Ye, Y. Sun, and X. Fan, “A 13.56-MHz active rectifier with SAR-assisted coarse-fine adaptive digital delay compensation for biomedical implantable devices,” *IEEE Solid-State Circuits Letters*, vol. 3, pp. 122-125, Jun. 2020.
 - [113] K. Noh, J. Amanor-Boadu, M. Zhang, and E. Sánchez-Sinencio, “A 13.56-MHz CMOS active rectifier with a voltage mode switched-offset comparator for implantable medical devices,” *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 26, no. 10, pp. 2050-2060, Oct. 2018.
-

-
- [114] S. Pal, and W.-H. Ki, "40.68 MHz digital on-off delay-compensated active rectifier for WPT of biomedical applications," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 67, no. 12, pp. 3307-3311, Dec. 2020.
 - [115] Q. Duan, C. Chen, X. Han, and L. Cheng, "A 40.68-MHz active rectifier using an inverter-based conduction-time generator for wirelessly powered implantable medical devices," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 69, no. 11, pp. 4334-4338, Nov. 2022.
 - [116] Z. Luo, J. Liu, and H. Lee, "A 40.68-MHz active rectifier with cycle-based on-/off-delay compensation for high-current biomedical implants," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 58, no. 2, pp. 345-356, Feb. 2023.
 - [117] L. Cheng, X. Ge, L. Hu, Y. Yao, W.-H. Ki, and C.-Y. Tsui, "A 40.68-MHz active rectifier with hybrid adaptive on/off delay-compensation scheme for biomedical implantable devices," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 67, no. 2, pp. 516-525, Feb. 2020.
 - [118] L. Cheng, W.-H. Ki, Y. Lu, and T.-S. Yim, "Adaptive on/off delay-compensated active rectifiers for wireless power transfer systems," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 51, no. 3, pp. 712-723, Mar. 2016.
 - [119] C. Huang, T. Kawajiri, and H. Ishikuro, "A near-optimum 13.56 MHz CMOS active rectifier with circuit-delay real-time calibrations for high-current biomedical implants," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 51, no. 8, pp. 1797-1809, Aug. 2016.
 - [120] X. Li, C.-Y. Tsui, and W.-H. Ki, "A 13.56 MHz wireless power transfer system with reconfigurable resonant regulating rectifier and wireless power control for implantable medical devices," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 50, no. 4, pp. 978-989, Apr. 2015.
 - [121] A. Trigui, S. Hached, A. C. Ammari, Y. Savaria, and M. Sawan, "Maximizing data transmission rate for implantable devices over a single inductive link: Methodological review," *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 12, pp. 72-87, Oct. 2018.
 - [122] R. W. Middlestead, "Phase shift keying (PSK) modulation, demodulation, and performance," in *Digital Communications with Emphasis on Data Modems: Theory, Analysis, Design, Simulation, Testing, and Applications*, Wiley Telecom Press, 2017, pp. 153-205.
 - [123] M. L. Navaii, H. Sadjedi, and A. Sarrafzadeh, "Efficient ASK data and power transmission by the class-E with a switchable tuned network," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 65, no. 10, pp. 3255-3266, Oct. 2018.
 - [124] M. M. Ahmadi, and M. Sarbandi-Farahani, "A class-E power and data transmitter with on-off keying data modulation for wireless power and data transmission to medical implants," *Circuits, Systems, and Signal Processing*, vol. 39, no. 8, pp. 4174-4186, Feb. 2020.
 - [125] P. R. Troyk, W. Heetderks, M. Schwan, and G. Loeb, "Suspended carrier modulation of high-Q transmitters," U.S. Patent 5 697 076, Dec. 1997.
 - [126] A. Trigui, M. Ali, S. Hached, J.-P. David, A. C. Ammari, Y. Savaria, and M. Sawan, "Generic wireless power transfer and data communication system based on a novel modulation technique," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 67, no. 11, pp. 3978-3990, Nov. 2020.
 - [127] A. Trigui, M. Ali, A. C. Ammari, Y. Savaria, and M. Sawan, "Quad-level carrier width modulation demodulator for micro-implants," in *14th IEEE International New*
-

-
- Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*, Oct. 2016, pp. 1-4.
- [128] A. Trigui, M. Ali, A. C. Ammari, Y. Savaria, and M. Sawan, "A 14.5 μ W generic Carrier Width demodulator for telemetry-based Medical Devices," in *15th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*, Aug. 2017, pp. 369-372.
 - [129] M. Kiani, and M. Ghovanloo, "A 13.56-Mbps pulse delay modulation based transceiver for simultaneous near-field data and power transmission," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 1-11, Feb. 2015.
 - [130] M. M. Ahmadi, and S. Ghandi, "A class-E power amplifier with wideband FSK modulation for inductive power and data transmission to medical implants," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 17, pp. 7242-7252, Sep. 2018.
 - [131] W. Huang, K. S. Zheng, X. Liu, X. Wang, Y. Hou, and Y. Liu, "Simultaneous High-Efficiency Power Delivery and Energy-Efficient Forward Data Transmission Over Single Inductive Link," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 76793-76803, Jul. 2023.
 - [132] Y. Park, S.-T. Koh, J. Lee, H. Kim, J. Choi, S. Ha, C. Kim, and M. Je, "A wireless power and data transfer IC for neural prostheses using a single inductive link with frequency-splitting characteristic," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 15, no. 6, pp. 1306-1319, Dec. 2021.
 - [133] M. Kiani, U.-M. Jow, and M. Ghovanloo, "Design and optimization of a 3-coil inductive link for efficient wireless power transmission," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 5, no. 6, pp. 579-591, Dec. 2011.
 - [134] A. K. RamRakhiani, S. Mirabbasi, and M. Chiao, "Design and optimization of resonance-based efficient wireless power delivery systems for biomedical implants," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 48-63, Feb. 2011.
 - [135] A. Ibrahim, and M. Kiani, "A figure-of-merit for design and optimization of inductive power transmission links for millimeter-sized biomedical implants," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 10, no. 6, pp. 1100-1111, Dec. 2016.
 - [136] M. Kiani, and M. Ghovanloo, "A figure-of-merit for designing high-performance inductive power transmission links," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 11, pp. 5292-5305, Nov. 2013.
 - [137] A. Khalifa, Y. Liu, Y. Karimi, Q. Wang, A. Eisape, M. Stanaćević, N. Thakor, Z. Bao, and R. Etienne-Cummings, "The microbead: A 0.009 mm³ implantable wireless neural stimulator," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 13, no. 5, pp. 971-985, Oct. 2019.
 - [138] Y. Jia, S. A. Mirbozorgi, B. Lee, W. Khan, F. Madi, O. T. Inan, A. Weber, W. Li, and M. Ghovanloo, "A mm-sized free-floating wirelessly powered implantable optical stimulation device," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 608-618, Aug. 2019.
 - [139] M. Jaakko, and P. Robert, *Bioelectromagnetism: principles and applications of bioelectric and biomagnetic fields*, New York: Oxford University Press, 1995.
 - [140] H. Chen, J. Zhang, Y. Bai, Y. Luo, L. Ran, Q. Jiang, and J. A. Kong, "Experimental retrieval of the effective parameters of metamaterials based on a waveguide method," *Optics Express*, vol. 14, no. 26, pp. 12944-12949, Dec. 2006.
 - [141] S. S. Mohan, M. del Mar Hershenson, S. P. Boyd, and T. H. Lee, "Simple accurate expressions for planar spiral inductances," *IEEE Journal of solid-state circuits*, vol. 34, no. 10, pp. 1419-1424, Oct. 1999.
-

-
- [142] D. W. Knight, "An introduction to the art of solenoid inductance calculation with emphasis on radio-frequency applications," Feb. 2016, [Online]. Available: http://g3ynh.info/zdocs/magnetics/part_1.html
 - [143] I. S. Y. M. R. Stroobandt, "The Effective Diameter of a Single-Layer Helical Coil Inductor as a Function of the Proximity Factor," Jul. 2007, [Online]. Available: https://hamwaves.com/inductance/doc/effective_diameter.pdf
 - [144] D. W. Knight, "Solenoid Impedance and Q," Jan. 2016, [Online]. Available: <http://g3ynh.info/zdocs/magnetics/solenz.html>
 - [145] H. A. Wheeler, "Formulas for the skin effect," *Proceedings of the IRE*, vol. 30, no. 9, pp. 412-424, Sep. 1942.
 - [146] D. W. Knight, "The self-resonance and self-capacitance of solenoid coils: applicable theory, models and calculation methods," May 2016, [Online]. Available: <http://g3ynh.info/zdocs/magnetics/appendix/self-res.html>
 - [147] M.-L. Kung, and K.-H. Lin, "Enhanced analysis and design method of dual-band coil module for near-field wireless power transfer systems," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 3, pp. 821-832, Mar. 2015.
 - [148] J. C. Lin, *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*, 1st Edition, CRC Press, 2017.
 - [149] L. H. Jung, P. Byrnes-Preston, R. Hessler, T. Lehmann, G. Suaning, and N. H. Lovell, "A dual band wireless power and FSK data telemetry for biomedical implants," in *29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Oct. 2007, pp. 6596-6599.
 - [150] P. Oltulu, B. Ince, N. Kokbudak, S. Findik, and F. Kilinc, "Measurement of epidermis, dermis, and total skin thicknesses from six different body regions with a new ethical histometric technique," *Turkish Journal of Plastic Surgery*, vol. 26, no. 2, pp. 56-61, Apr. 2018.
 - [151] S. Gabriel, R. Lau, and C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz," *Physics in Medicine & Biology*, vol. 41, no. 11, pp. 2251, Nov. 1996.
 - [152] M. Ghovanloo, and K. Najafi, "A wideband frequency-shift keying wireless link for inductively powered biomedical implants," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 51, no. 12, pp. 2374-2383, Dec. 2004.
 - [153] A. D. Rush, and P. R. Troyk, "A power and data link for a wireless-implanted neural recording system," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 59, no. 11, pp. 3255-3262, Nov. 2012.
 - [154] E. K. Lee, "A discrete controlled fully integrated class E coil driver with power efficient ASK modulation for powering biomedical implants," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 62, no. 6, pp. 1678-1687, Jun. 2015.
 - [155] G. L. Barbruni, F. Asti, P. M. Ros, D. Ghezzi, D. Demarchi, and S. Carrara, "A 20 Mbps, 433 MHz RF ASK transmitter to inductively power a distributed network of miniaturised neural implants," in *IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, Jul. 2021, pp. 1-6.
 - [156] G. L. Barbruni, F. Rodino, P. M. Ros, D. Demarchi, D. Ghezzi, and S. Carrara, "A Wearable Real-Time System for Simultaneous Wireless Power and Data Transmission to Cortical Visual Prosthesis," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 580-591, Jun. 2024.
 - [157] M. Catrysse, B. Hermans, and R. Puers, "An inductive power system with integrated bi-directional data-transmission," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 115, no.
-

-
- 2-3, pp. 221-229, Sep. 2004.
- [158] K. Chen, Y.-K. Lo, Z. Yang, J. D. Weiland, M. S. Humayun, and W. Liu, "A system verification platform for high-density epiretinal prostheses," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 7, no. 3, pp. 326-337, Jun. 2013.
- [159] J. Olivo, S. Carrara, and G. De Micheli, "A study of multi-layer spiral inductors for remote powering of implantable sensors," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 536-547, Aug. 2013.
- [160] J. Lim, and B. Lee, "Carrier Harmonic Modulation for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 135568-135574, Nov. 2023.
- [161] D.-H. Yao, T.-N. Liu, M. Takamiya, and P.-H. Chen, "A 6.78-MHz Wireless Power Transfer System With Dual-Output Resonant Current-Mode Regulating Rectifier and Transmission Power Regulation," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 70, no. 12, pp. 4986-4998, Dec. 2023.

ABSTRACT

In this thesis, a transmitter is proposed for simultaneous transmission of power and data with FSK modulation for cochlear implants with only one inductive link. This transmitter includes class-E power amplifier, dual-band inductive link, modulator, and demodulator. The combination of PCB coils and solenoids in this link results in two resonant frequencies and the required power is transmitted to the load with high efficiency in both FSK carriers. Selection of 5 MHz and 10 MHz as FSK carriers makes the tissue thermal losses negligible, and also, for the data rate of 2.5 Mbps, the DRCF ratio will be 33.3%. The proposed transmitter is implemented using COTS components and a ribs portion of beef with thickness of 4 mm in a polyethylene bag is used to emulate the scalp tissue. Also, biocompatible silicone with 1 mm thickness is used as the hermetic insulation of PCB coils against body tissue and fluids. The permittivity of silicon is very low and minimizes the parasitic effects of beef ribs. For a transmission of pseudorandom bit stream with 2.5 Mbps data rate, the measured PDL and PTE are 48.2 mW and 38.8%, respectively. Also, the measured BER is less than 10^{-5} . In the next step, a voltage rectifier is added in the receiver side and both the modulator and receiver are implemented in TSMC CMOS 180 nm using cadence. Spice models of COTS components has also been used for the power amplifier. Considering the rectifier, for a transmission of pseudorandom bit stream with 2.5 Mbps data rate and separation of 6 mm between the coils, the simulated PDL and PTE in TT corner and 27 °C are 34.97 mW and 33.55%, respectively. The BER is also less than 10^{-5} .

In design of inductive links for biomedical prosthesis, it is necessary to use an iterative process to achieve the desired goals such as PTE and PDL. FEM based simulations in extraction of the electromagnetic parameters is one of the main reasons slowing this process. In this thesis, a two-dimensional axisymmetric modeling is proposed for PCB coils and solenoids in COMSOL Multiphysics that its capability in converting the three-dimensional geometric volume into two-dimensional regions speeds up the FEM based simulations. In order to investigate the accuracy of the proposed model, a PCB coil and a solenoid with suitable geometric parameters for implanting in body has been fabricated. The measurement results and the two-dimensional modeling based simulation results are in good agreement and confirm each other. As a result, while the proposed model reduces the required time in design process of inductive link and FEM based simulations by about 90%, it also has a good accuracy in extracting the electromagnetic parameters of coils such as coupling coefficient, series AC resistance, inductance, parallel parasitic capacitance, and quality factor.

Keywords: Cochlear Implant, Dual-Band Inductive Link, Simultaneous Transmission of Power and Data, FSK Modulation, Power Transmission Efficiency, Two-Dimensional Axisymmetric Modeling.



Amirkabir University of Technology
(Tehran Polytechnic)
Department of Electrical Engineering

Ph.D. Thesis

**Efficiency Enhancement in Simultaneous
Transmission of Power and Data Through an
Inductive Link for Cochlear Implants**

By
Farshad Gozalpour

Supervisor
Dr. Mohammad Yavari

Summer 2024