

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04130

研究課題名(和文) 電池レス無線充電医療センサーを実現する偏波制御DRレクテナの開発

研究課題名(英文) A study of polarized control DR rectenna for wireless charging medical sensor

研究代表者

小川 晃一 (Ogawa, Koichi)

富山大学・学術研究部工学系・教授

研究者番号：60601854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：無線電力伝送において高周波を直流に変換する検波回路(レクテナ)について高効率化を実現するメカニズム解明を実施した。RLC並列共振回路を用いることにより $\sqrt{4}$ 同軸誘電体共振器の等価回路モデルを構築できた。高いQファクターを有する同軸誘電体共振器を用いた新しいレクテナを腕振りのみならず脚振りも考慮できる電磁ファントムの腕に装着して無線電力伝送実験を実施した。より高いQファクターを有する同軸誘電体共振器を用いて新しいレクテナを製作し、 -10dBm で13%の変換効率向上を達成した。30分間充電した時の充電電圧は 0.37V となり、従来レクテナの 0.32V と比較して 0.05V 向上した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Body Area Network(BAN)技術はICT技術を医療に役立てるものであり、身体の様々な場所に装着した各種無線センサーによって脳波、心電図、心拍数や血圧等のバイタルデータを取得して治療等に用いる、医療IoTを支える基盤技術である。生体無線センサーは常にバイタルデータを測定して送信する必要があるため、動作し続けなければならない。センサーを電池で駆動させた場合、電池の消費により使用中で動作しなくなる。本研究課題では、無線充電により動作するセンサーについて検討する。

研究成果の概要(英文)：This study investigates the voltage amplification phenomenon by deriving equivalent circuit parameters for a coaxial dielectric resonator, where the equivalent circuit parameters were compared with the measured results. Furthermore, experimental studies on improving the radio frequency (RF)-direct current (DC) conversion efficiency using a $\sqrt{4}$ -coaxial dielectric resonator with a higher Q factor were carried out. The results show that the RF-DC conversion efficiency is improved by 13% at -10 dBm , as compared to that for a conventional dielectric resonator with a lower Q factor. Moreover, the $\sqrt{4}$ -coaxial dielectric resonator with a higher Q factor can produce a higher voltage than a conventional dielectric resonator with a lower Q factor at any charge-up time, indicating that a large amount of charge is accumulated in the capacitor.

研究分野：アンテナ・伝播

キーワード：無線充電医療センサー 偏波制御DRレクテナ 歩行人体ファントム 3次元OTA評価装置

1. 研究開始当初の背景

『日本再興戦略』改訂 2015』において、医療分野における ICT の活用を推進する方針を掲げており、医療情報の分析により健康管理を行うサービスの発展を目指している。Body Area Network(BAN)技術は ICT 技術を医療に役立てるものであり、身体のような場所に装着した各種無線センサーによって脳波、心電図、心拍数や血圧等のバイタルデータを取得して治療等に用いる、医療 IoT を支える基盤技術である。

生体無線センサーは常にバイタルデータを測定して送信する必要があるため、動作し続けなければならない。センサーを電池で駆動させた場合、電池の消費により使用途中で動作しなくなる。従って、無線充電により永久に動作するセンサーの開発が望まれている。無線充電を行うレクテナは受信アンテナと整流回路で構成されるが、アンテナは到来波電波に応じて受信信号を最適制御し、整流器は高周波を高効率で直流に変換する必要がある。双方が高い技術レベルでなければ高効率レクテナとして実用化できない非常に困難な課題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、「電池いらず」で動作し続ける無線充電医療センサーを実現する『偏波制御 DR レクテナ』の開発である。これを実現するための課題は、①電波を直流に変換する整流器の高効率化、②人体装着時に生じる人体の動きとセンサーに到来する電波の偏波特性の相互作用による受信電力の低下、③人の歩行動作に起因する電波シャドウイングによる激しい信号瞬時遮断現象の克服の3点である。

3. 研究の方法

電波を直流に変換する整流器について、更なる高効率化を目指してより高い Q ファクターを有する同軸誘電体共振器を用いて新しいレクテナを開発する。

腕振りファントムの開発で得た知見と歩行動作の統計データを基に腕のみならず脚の動きを制御できる世界に類を見ない歩行人体ファントムを開発する。

高い Q ファクターを有する同軸誘電体共振器を用いた新しいレクテナを腕振りのみならず脚振りも考慮できる電磁ファントムの腕に装着して無線電力伝送実験を実施する。

4. 研究成果

図 1 に開発した誘電体共振器レクテナの構造を示す[1]。このレクテナの特徴として、LC 共振器より高い Q 値をもつ同軸誘電体共振器を用いることで、ダイオードに加わる信号の振幅を増大している。さらに、シャントキャパシタの代わりに誘電体フィルムを用いたキャパシタを適用することにより、電流を分散させ、抵抗損失の影響を最小限に抑えている。これらの効果により高い変換効率を実現している。

図 2 に製作した誘電体共振器レクテナの写真を示す。従来のレクテナで使用していた Q 値が 425.8 の同軸誘電体共振器を Q 値が 890 のものに変更し、新たに同軸誘電体共振器レクテナを製作した。従来のレクテナと比較して同軸誘電体共振器の Q 値をさらに高くすることで変換効率の向上を図った。使用した同軸誘電体共振器（大研化学製）は、長さ 13 mm × 縦 12 mm × 横 12 mm の大きさで、内径が 3.5 mm、比誘電率 ϵ_r が 38 である。従って、同軸誘電体共振器の底面積は $13 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} = 156 \text{ mm}^2$ である。

同軸誘電体共振器と SMA コネクターに半田付けされた銅板との間に誘電体フィルムを挟み、アクリル板とプラスチックねじで圧着して同軸誘電体共振器の底面全体をキャパシタとした。誘電体フィルムの素材はポリ塩化ビニリデン（食品包装用ラップ）であり、比誘電率 4.5、厚さ $10 \mu\text{m}$ のものを用いた。誘電体フィルムの大きさは、同軸誘電体共振器が銅板と短絡しないよう、同軸誘電体共振器の底面積より一回り大きい $15 \text{ mm} \times 14 \text{ mm} = 210 \text{ mm}^2$ とした。キャパシタの容量は 569.8 pF、負荷抵抗 R_L は 820Ω である。アンテナとダイオード回路の整合は、入力端に接続された空芯コイル L_m によって図っている。

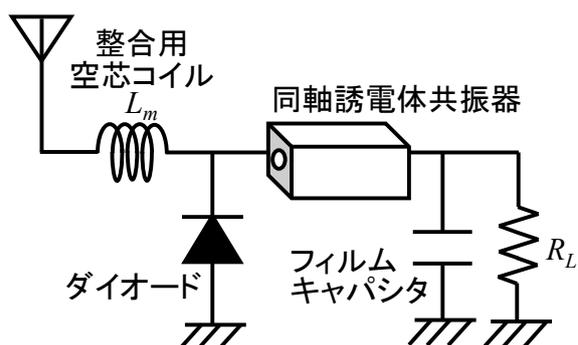


図 1 誘電体共振器レクテナの構造

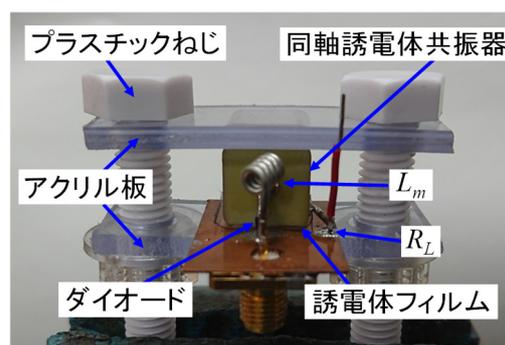


図 2 製作した誘電体共振器レクテナ

図3に誘電体共振器レクテナのVSWR特性を示す。青線が新たに製作したQ値が高い同軸誘電体共振器を用いたレクテナ、赤線が従来のレクテナの測定結果である。図より、新たに製作したレクテナは使用している同軸誘電体共振器の特性により、周波数930MHzにおいてVSWRが1.09であった。従来のレクテナも872MHzにおいてVSWRが1.04であり、2つのレクテナとも極めて良好な整合状態が得られていることがわかる。VSWRが2以下の周波数帯域は19MHz、3以下の周波数帯域は33MHzである。従って、帯域幅が33MHz程度の電波を高効率で変換可能であることがわかる。また、従来のレクテナと比較してVSWRが3以下の周波数帯域幅が2倍程度広い。

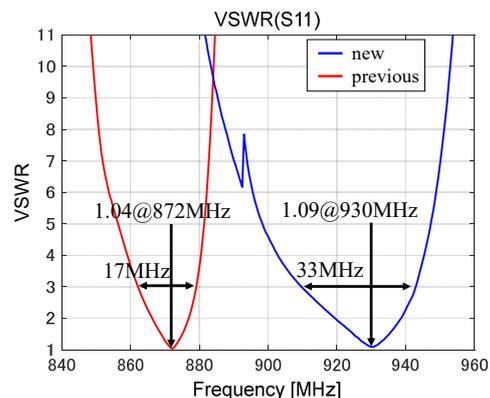


図3 誘電体共振器レクテナのVSWR特性

シグナルジェネレータからレクテナへの入力電力を-30 dBm から 10 dBm まで変化させたときの出力電圧 V_{DC} の測定を行った。ここで、出力電圧とは負荷抵抗 R_L の両端に発生する直流電圧である。測定周波数はそれぞれの誘電体共振器レクテナの共振周波数 930 MHz、872 MHz とした。ケーブル損を考慮してスペクトラムアナライザで測定した電力 P_{in} をレクテナへの入力電力とした。

以下の式を用いて計算したレクテナの直流変換効率を図4に示す。

$$\eta[\%] = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{V_{DC}^2 / R_L}{P_{in}} \times 100$$

図中の青線は新たに製作した誘電体共振器レクテナ、赤線は従来の誘電体共振器レクテナである。図より、新たに製作したQ値が高い同軸誘電体共振器を用いたレクテナは入力電力が-10 dBm (0.1 mW) の時におけるRF-DC変換効率が44.9%であり、従来の誘電体共振器レクテナからの効率改善率は13.3%となった。入力電力0 dBm (1 mW) では改善率が23.4%、入力電力10 dBm (10 mW) では改善率が20.9%となり、全入力電力範囲において高効率を実現できることを確認した。

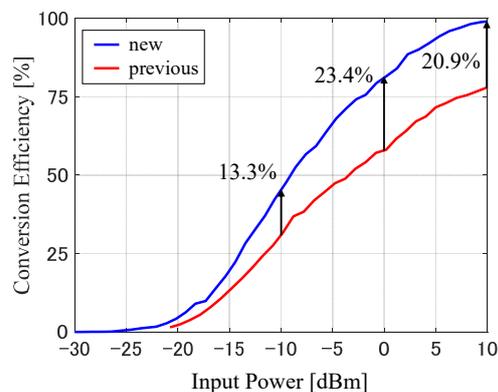


図4 レクテナのRF-DC変換効率

歩行動作中における足首-手首間のOn-Body通信を検討するには、腕と脚の動的特性について知る必要がある。そこで、歩行動作時の腕と脚の動的変化について統計解析を行った[2]。

歩行動作の撮影にはモノクロ高感度CMOSカメラ(DIRECT, HAS-L1M2)を用いた。その際、フレームサイズは1024×768ピクセル、フレームレートは150フレーム/秒に設定して撮影を行った。撮影した人数は10名(富山大学男子学生)である。

腕振り角度は前方向の最大値は平均角度が+58.5°、標準偏差が11.4°となり、後ろ方向は平均角度が-28.0°、標準偏差が4.3°であることが確認できた。

脚角度は前方向の最大値は+11.5°、標準偏差は4.3°、後ろ方向の最大値は-59.0°、標準偏差は3.6°であることがわかった。脚は腕と異なり、後ろ方向に大きく動いていることが統計結果より明らかとなった。

以上の歩行動作の統計データと従来の腕振りファントム[3]の開発で得た知見とを基に開発した、腕のみならず脚の動きを制御できる歩行人体ファントムの写真を図5示す。



図5 歩行人体ファントム

誘電体共振器レクテナを用いて無線電力伝送にてキャパシタ (Panasonic 製, EECF5R5H10, 容量 1 F) の充電実験を実施した。送受信アンテナには半波長スリーブアンテナを用い、受信アンテナは開発した歩行人体ファントムの左腕に装着した。ファントムの左腕の角度 α は床と垂直の時を 0° と定義した。送信電力は 10 dBm、送受信アンテナ間の距離は 15 cm とした。周波数は 930 MHz である。

受信アンテナ (左腕) の角度を変化させ、アンテナ傾き角の違いによる蓄積電圧特性を測定した。その結果を図 6 に示す。図より、アンテナ角度が大きくなるにつれ蓄積電圧が小さくなっていることがわかる。これは、送受信アンテナ間の偏波ミスマッチが原因である。

また、開発した歩行人体ファントムの左腰に 2 本の半波長スリーブアンテナを装着した際の受信電力測定を実施した。その結果を図 7 に示す。図中の実線はアンテナ間隔が 80° 、点線は 20° である。青線は胸側に装着したアンテナ、赤線は背中側に装着したアンテナの受信出力であり、黒線は 2 本のアンテナのうち高い受信電力を選択した場合の結果である。

図より、アンテナ間隔が狭い場合は腕によるシャドウイングが同時に発生するので、選択ダイバーシチを用いても受信電力の劣化が大きいが、アンテナ間隔を大きくすることで、受信電力の落ち込みが小さくなることが明らかとなった。

図 6 および図 7 の結果より、偏波制御アンテナを用いて選択ダイバーシチを構成することにより、高い受信電力を維持できることが期待できる。本研究室では偏波制御アンテナの実用化を目的として小型・低背化を実現するためパッチ付き円板装荷折り返しモノポールアンテナ (DLMP : Disk-Loaded Monopole Stacked with Patch Antenna) を開発している[4]。高さは 1cm と低背化に成功しているが、地板サイズは 10 cm × 10 cm と大きいこと、また設計周波数が 2 GHz と誘電体共振器レクテナの周波数と異なっている。設計周波数が 930 MHz かつ人体に装着できるサイズのパッチ付き円板装荷折り返しモノポールアンテナを開発することは今後の課題である。

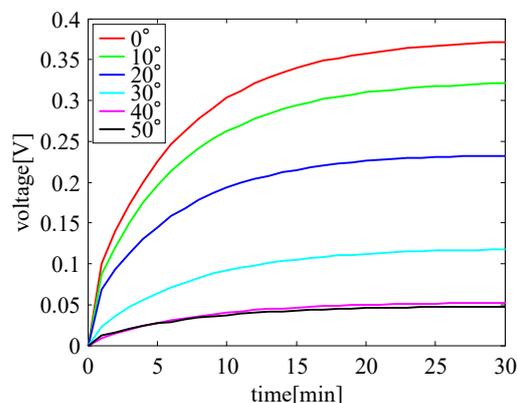


図 6 アンテナ傾き角の違いによる蓄積電圧特性

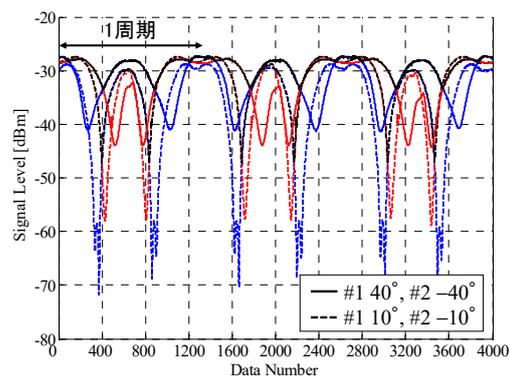


図 7 腕振り時の受信出力測定結果

- [1] K. Honda, T. Yamashita, and K. Li, "High efficiency mw-band dielectric resonator rectenna using distributed capacitors," IEICE ComEx, Vol. 5, No. 8, pp. 254-259, Aug. 2016.
- [2] 本田和博, 武林龍太, 李鯤, 小川晃一, "歩行動作の統計データを用いた On-Body 通信における受信電力解析," 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 116, no. 408, MICT2016-71, pp. 35-40, Jan. 2017.
- [3] N. Yamamoto, N. Shirakata, D. Kobayashi, K. Honda, and K. Ogawa, "BAN Radio Link Characterization Using an Arm-Swinging Dynamic Phantom Replicating Human Walking Motion," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 61, No. 8, pp. 4315-4326, Aug. 2013.
- [4] K. Omote, H. Sato, K. Li, K. Honda, Y. Koyanagi, and K. Ogawa, "Disk-Loaded Monopole Stacked with Patch Antenna," 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting (APSURSI 2015, 19-24 July 2015, Vancouver, Canada), pp. 709-710, July 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 二木祐樹, 本田和博, 小川晃一
2. 発表標題 歩行動作を考慮した人体装着センサーの無線電力伝送特性
3. 学会等名 電子情報通信学会ヘルスケア・医療情報通信技術研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Futagi Yuki, Hori Tomohiro, Honda Kazuhiro, Ogawa Koichi
2. 発表標題 Evaluation of Received Signal Power in On-Body Dynamic Channel Considering Human Walking Motion
3. 学会等名 Progress in Electromagnetics Research Symposium 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Futagi Yuki, Honda Kazuhiro, Ogawa Koichi
2. 発表標題 Wireless Power Transmission to a Body-Attached Vital Sensor Considering the Human Walking Motion
3. 学会等名 IEEE International Workshop on Electromagnetics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 二木祐樹, 本田和博, 小川晃一
2. 発表標題 同軸誘電体共振器レクテナの等価回路化による高効率化検証
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Takakura, K. Honda, K. Ogawa
2. 発表標題 High-Q Characterization of MW-Band Dielectric Resonator Rectenna Using an Equivalent Circuit
3. 学会等名 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------