

28GHz帯におけるレクテナの高効率化

中村 拓真, 今野 佳祐, 陳 強 (東北大学大学院工学研究科)
袁 巧微 (仙台高等専門学校)

1. まえがき

近年,次世代通信システムである5Gの実現に向けた試みが盛んに行われている[1]. 従来通信システムである4Gと比較して,5Gは28GHz帯など高周波帯域の活用とMassive MIMO等の技術により「高速・大容量」「低遅延」「多数接続」という特長を持っている。

このような5Gの実現に伴い, IoT (Internet of Things) の普及が進むと予想されている[2]. IoTは, パソコンやスマートフォン, 車やセンサー類など, 様々なモノがインターネットに接続されることを意味する. IoTでは多数のデバイスが同時にインターネットに接続されることから, 5Gの持つ「多数接続」の特長が活かされ, 発電所と家庭や工場などがIoT機器でつながるスマートグリッドなど, 様々な応用が期待される. このようなIoTデバイスの端末数は年々増加傾向にあり, 2020年時点で400億台を超えるとされている[3].

その一方で, IoTの普及にはいくつかの課題が残されている. その中の一つがデバイスの電源確保の問題である[4]. 特に小形のIoTデバイスは有線での電力供給が困難であり, 電池によって駆動電力を確保するのが一般的であるが, それでも電池への充電の問題が残る. そのため, WPT (Wireless Power Transfer) による無線での電池への電力供給が期待されている[5]. WPTで電池の充電が可能になれば, 無数のIoTデバイスの電池交換が不要になるという大きなメリットが生まれる.

5Gに用いられる周波数帯, 例えば28GHz帯の電磁波を, 通信のみならずWPTに用いることができれば, IoTデバイスの電源を確保できる. ところが, このような非常に高い周波数の遠方界を用いたWPTによる給電では, 電磁波の高い直進性に伴う距離減衰が大きな問題となる. 例えば, 送信源と受信対象間に遮蔽物がある見通し外の環境や, 送受信間距離が長い環境では, 受信電力が極めて小さくなったりする.

従来の研究[6,7]では, 上記課題を解決する手法として高利得なりフレクトアレーおよびレクテナアレーの設計が行われた. これらの研究では, 高利得アンテナを用いたレクテナの特性が明らかにされているが, レクテナのRF-DC変換効率や受信アンテナについての検討が不十分であることから, システム全体の設計法が明らかにされているとは言えない. また, 28GHz帯においてはこのような高利得アンテナを用いた受信電力向上および高効率化の試みは見られない.

本報告では, 28GHz帯における高効率なレクテナ設計法を明らかにするための基礎検討として, 整流回路の設計およびシミュレーション結果について報告する.

2. 整流回路の原理

レクテナとは, 受信アンテナと整流回路が一体となったものをよぶ. レクテナで使用される整流回路は様々存在し, シングルシャント整流回路以外にもチャージポンプ整流回路やブリッチ型全波整流回路などがある. 本検討では, まず一つのダイオードで理論上100%の変換効率を実現することが可能なシングルシャント整流回路を採用し, その特性を明らかにする. その後, ダイオードを増加させることによる効率変化の検討も行う.

2.1 シングルシャント整流回路

図1にシングルシャント整流回路[8]を示す. この整流回路は負荷に対して整流用のダイオードが並列に接続されており, そのカソード直下には $\lambda/4$ 線路が接続されている. その後段に平滑コンデンサと負荷抵抗が接続されている. 無損失の伝送線路かつ理想的なダイオードの場合, この整流効率は100%となる. ダイオードから見た負荷側の入力インピーダンス Z_{in} は,

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan\left(\frac{\beta\lambda}{4}\right)}{Z_0 + jZ_L \tan\left(\frac{\beta\lambda}{4}\right)}$$

で与えられる. ここで, Z_0 は特性インピーダンス, Z_L は平滑コンデンサと負荷抵抗の合成インピーダンスである. ここで, C が十分大きいとすれば $Z_L=0$ となるから, 偶高調波では短絡となり, 奇高調波で開放となる. このため, ダイオードには奇高調波成分のみが印加されるため, その電圧波形は図2に示すように方形波になる. 電圧波形と電流波形の重なりがダイオードで消費される電力であり, この重なりがなくなることでよりダイオードにおける電力ロスがなくなるため, 1つのダイオードで100%のRF-DC変換効率を達成することができる.

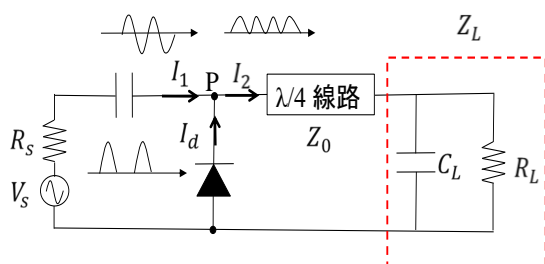


図1 シングルシャント整流回路

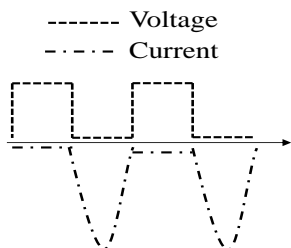


図2 理想ダイオードに印加する電圧と電流

2.2 F級負荷

2.1で述べたシングルシャント整流回路の原理では、平滑コンデンサがもつ静電容量が十分大きく、負荷が短絡とみなせることを前提としていた、しかし、実際のコンデンサが持つ静電容量は、高周波になるほど小さくなっていく。28GHzシングルシャント整流回路における平滑コンデンサの静電容量に対する最大RF-DC変換効率の変化の一例を図3に示す。図3より、平滑コンデンサの静電容量が1μFを下回ると著しく効率が減少していることがわかる。現状では28GHz帯において1μFを上回るような高い静電容量をもつコンデンサは存在しないことから、高周波帯における整流回路ではいわゆるF級負荷[9]が用いられることが多い。本検討における回路モデルにおいてもF級負荷を導入する。F級負荷の回路図を図4に示す。λ/4線路の後段に各高調波の波長に対応したオープンスタブを接続する。これらのオープンスタブがキャパシタンスとして働く。

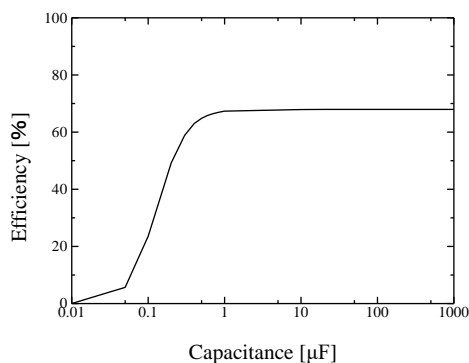


図3 平滑コンデンサ容量に対するRF-DC効率

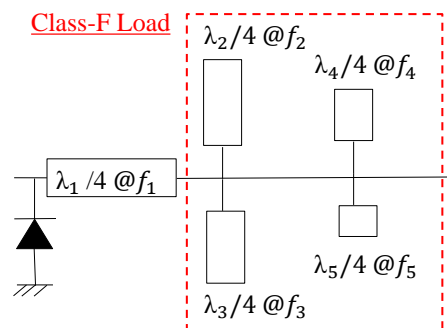


図4 F級負荷

3. シミュレーション結果

3.1 回路モデル

シミュレーションモデルを図5に示す。回路図の左端がRF入力部、右端がDC出力部である。RF入力部には、マッチングのためスタブと整流回路で発生した直流成分が流出しないようにDCカットコンデンサを配置している。DC出力部には、ダイオードで発生した高調波成分が流出しないようにオープンスタブフィルタを配置した。今回は第二高調波のみを考慮した設計としている。基板材料は利昌工業株式会社製のCS-3376Cとした。整流用のダイオードはMACOM製のMA4E1317である。Spice Parameterは表1に示す。

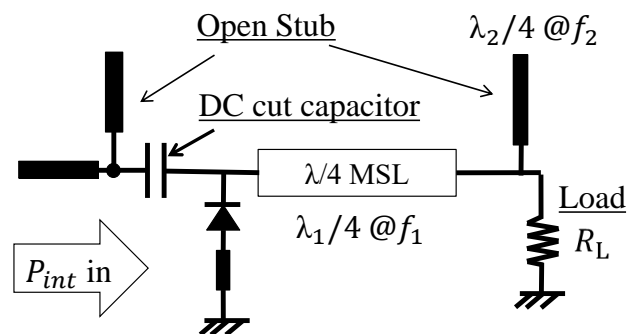


図5 シミュレーションモデル

表1 MA4E1317 Spice Parameter

Parameter	value	Unit
Reverse saturation current (I_s)	0.5	pA
Serious resistance (R_s)	4	Ω
Breakdown voltage (V_{bv})	7	V
Built-in voltage (V_{bi})	0.7	V
Junction capacitance (C_j)	0.02	pF

3.2 RF-DC変換効率

図6に設計したシングルシャント整流回路のRF-DC変換効率の、図7にDC出力電力のシミュレーション結果をそれぞれ示す。負荷抵抗 R_L は、50Ωから200Ωまで変化させた。図6から、RF-DC変換効率は負荷抵抗の値に依存していることがわかる。今回の場合では負荷抵抗 R_L が200Ω、入射電力が16dBm条件下でRF-DC変換効率が61.5%、DC出力電力が24.49mWとなった。また、図6および図7から入射RF電力が微弱な場合はRF-DC変換効率が悪いことが分かる。5Gで用いられる28GHz帯の電磁波は微弱なことが想定されるので、入射RF電力をアンテナによって大きくすること、入射RF電力に応じた負荷を接続することが重要と考えられる。

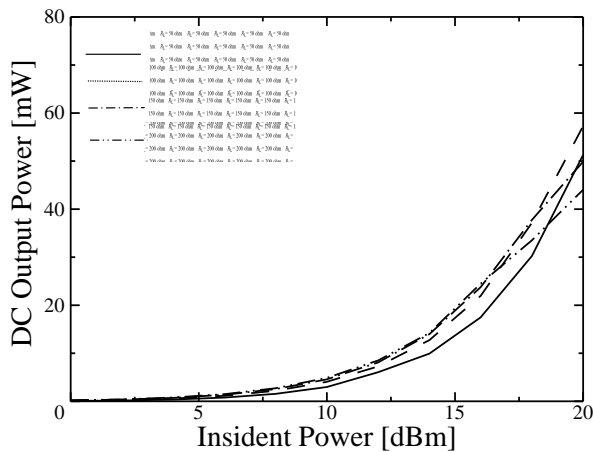


図6 DC出力電力

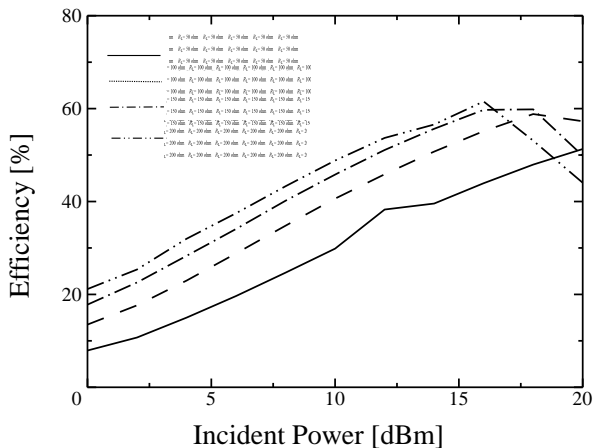


図7 RF-DC変換効率

3.3 複数ダイオードの並列接続による効率変化

整流回路におけるRF-DC変換効率低下の原因となるものは、主にダイオードでの損失である。ダイオードによる電力損失は主に二種類へ分類される。それ

は、ダイオードの直列抵抗による損失と接合容量による損失である。ダイオードを並列に接続した場合、直列抵抗による損失は軽減される一方、接合容量による損失は増加する。今回は並列接続するダイオード数を1,2,4個と変化させ、ダイオード並列接続によるRF-DC変換効率の特性を調べる。3.2と同様に負荷抵抗 R_L は、50Ωから200Ωまで変化させた。

ダイオードを2個および4個並列接続した場合のRF-DC変換効率を図8および図9に示す。ダイオード数を増加させることで最大RF-DC変換効率は増加していくことがわかる。ダイオードを4個並列接続した場合、負荷抵抗 R_L が200Ω、入射電力が16dBm条件下でRF-DC変換効率が73.2%となった。一方、8dBm以下の微小電力入射時は、ダイオードを2個並列接続させた場合のRF-DC変換効率が最もよい。微弱な電波の受信を前提しているため、本検討の整流回路にはダイオードを2つ使用することが最適であることがわかった。

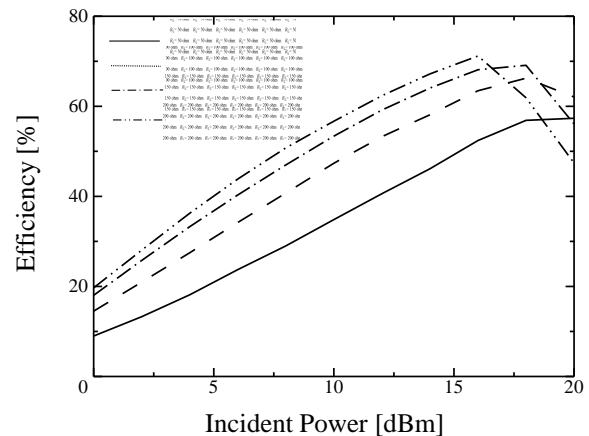


図8 RF-DC変換効率(ダイオード数:2)

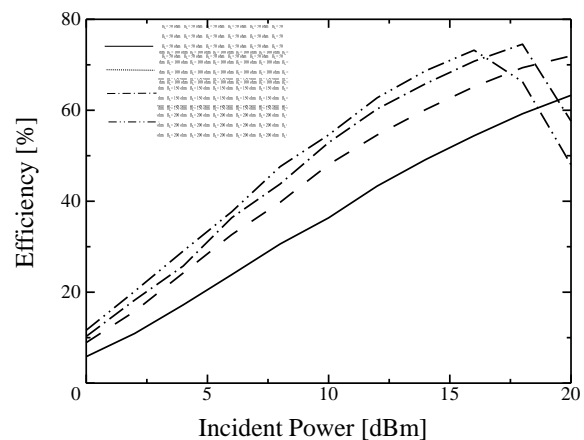


図9 RF-DC変換効率(ダイオード数:4)

4. まとめ

本報告では、28 GHz帯における高効率なレクテナ設計の基礎検討として整流回路の特性をシミュレーションで明らかにした。整流回路にはシンプルな構造であるシングルシャント整流回路を採用し、各負荷抵抗に対するRF-DC変換効率を示した。負荷抵抗 R_L が200 Ω 、入射電力が16dBm条件下でRF-DC変換効率が61.5%、DC出力電力が24.49mWとなった。また、効率改善の手法として複数のダイオードを並列接続した。ダイオードを4個並列接続した場合、負荷抵抗 R_L が200 Ω 、入射電力が16dBm条件下でRF-DC変換効率が73.2%となった。一方、ダイオードを2個使用した回路の方が微小電力入射に対するRF-DC変換効率がよいことがわかった。

今後は、シミュレーション結果をもとに実際の整流回路を製作し、その特性を今回の結果と比較する予定である。また、リフレクタレーの設計・製作を進め、レクテナのRF-DC変換効率を向上させる。

参考文献

- [1] J. G. Andrews et al., "What Will 5G Be?," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, June 2014.
- [2] M. M. Alsulami and N. Akkari, "The role of 5G wireless networks in the internet-of- things (IoT)," 2018 1st International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS), Riyadh, 2018, pp. 1-8.
- [3] 総務省 平成30年版情報通信白書
- [4] Mahmoud Shuker Mahmoud et al. "A Study of Efficient Power Consumption Wireless Communication Techniques/ Modules for Internet of Things (IoT) Applications"
- [5] L. Roselli et al., "WPT related applications enabling Internet of Things evolution," 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Davos, 2016, pp. 1-2.
- [6] C. Ahn, S. Oh and K. Chang, "A high gain rectifying antenna combined with reflectarray for 8 GHz wireless power transmission," 2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Charleston, SC, 2009, pp. 1-4.
- [7] H. A. Malhat, H. A. El-Araby and S. H. Zainud-Deen, "Circularly polarized rectifying reflectarray antenna at C-band," 2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science

(URSI GASS), Montreal, QC, 2017, pp. 1-4.

[8] J. Guo, H. Zhang and X. Zhu, "Theoretical Analysis of RF-DC Conversion Efficiency for Class-F Rectifiers," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 4, pp. 977-985, April 2014.

[9] K. Hatano, N. Shinohara, T. Mitani, K. Nishikawa, T. Seki and K. Hiraga, "Development of class-F load rectennas," 2011 *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications*, Uji, Kyoto, 2011, pp. 251-254.