

小型飛行体へのマイクロ波無線電力伝送における受電用超高利得アンテナの開発

奥田 健太[†] 名古 正太郎[†] 小紫 公也[‡] 小泉 宏之[†]

[†] 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

[‡] 東京大学大学院新領域創成科学研究科 〒277-0882 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

E-mail: [†] k.okuda@al.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし 現在, 我々の研究室では, 小型飛行体(MAV: Micro Aerial Vehicle)へのマイクロ波無線電力伝送を想定し, 研究開発を行っている. MAV を含め, 無線電力伝送の対象となるデバイスは, 今後さらに小型化していくことが予想されるため, 小型かつ, 大きな電力を取得できる受電デバイスが必要である. そこで, 当研究では, サイズの自由度が大きく, 小型なものも実現可能で, かつ, 大きな利得をもつスーパーゲインアンテナを, 受電用アンテナとして MAV に搭載することを提案・検討した. また, 実際にその試作, 性能の測定を行い, 鋭い指向性が実現できたことを示すと同時に, 今後より理想的な特性を得るための考察を行う.

キーワード マイクロ波, 無線電力伝送, MAV, スーパーゲインアンテナ

Development of Super-gain Antenna as Receiving Antenna for Wireless Power Transmission to MAV

Kenta OKUDA[†] Shotaro NAKO[†] Kimiya KOMURASAKI[‡] Hiroyuki KOIZUMI[†]

[†] Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656

[‡] Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-0882

E-mail: [†] k.okuda@al.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract Now system of microwave power transmission to MAV (Micro Aerial Vehicle) is developed in our research project. Devices for which the power supplied, including MAV are getting smaller and smaller. So, developing receiving-device which is small and get high power is necessary. In this research, Using super-gain antenna as receiving antenna of wireless power transmission system for MAV is suggested and considered. Super-gain antenna is the antenna which can be developed as small antenna and has high directive gain. In this research, also, prototype of super-gain antenna is developed, and characteristics of that are measured. Then, ideal power directivity are shown, and consideration for higher power transmission are presented.

Keyword Microwave, Wireless Power Transmission, MAV (Micro Aerial Vehicle), Super-gain antenna

1. はじめに

近年, マイクロ波を用いた無線電力伝送の研究が注目を集めている. 例えば, 宇宙太陽光発電衛星とよばれる, 宇宙空間で太陽光発電を行い, その電力を静止軌道から地上へ無線で伝送するシステムが考案されており, 地球のエネルギー問題の解決が期待されている. また, 電気自動車や電気飛行機への無線電力伝送も提案されており, 電気を動力源とするシステムの長時間稼働や完全自動化を可能にする試みがなされている. 本稿では, 当研究室で行っている小型飛行体への無線電力伝送を想定した研究について述べる. 小型飛行体への無線電力伝送は, 上記のように, 電気飛行機の可能性を拡大するものであるだけでなく, 三次元空間を移動する物体への無線電力伝送技術や, 物体に搭載する機器の大きさや質量等に制約があるときの無線電力伝送技術を向上させ, 無線電力伝送技術を, 従来な

ったアプリケーションに展開することも可能とするものである.

2. 研究背景

2.1. 小型飛行体へのマイクロ波無線電力伝送の研究開発

現在, 当研究室では, 小型飛行体へのマイクロ波無線電力伝送を想定し研究開発を行っている[1]. 研究は, 以下の図 1 のように, システム全体を送電システム, 受電システム, 追尾システムの三つの要素システムに分けて行っている. 送電システムは, 対象物に 5.8GHz のマイクロ波を照射し, 受電システムは, そのマイクロ波を受信し, RF 電力を DC 電力に変換する. また, 追尾システムは, 対象物から 2.45GHz のパイロット信号を受信し対象物の位置を推定, その情報を元に送電システムのビーム放射角を制御する.

This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

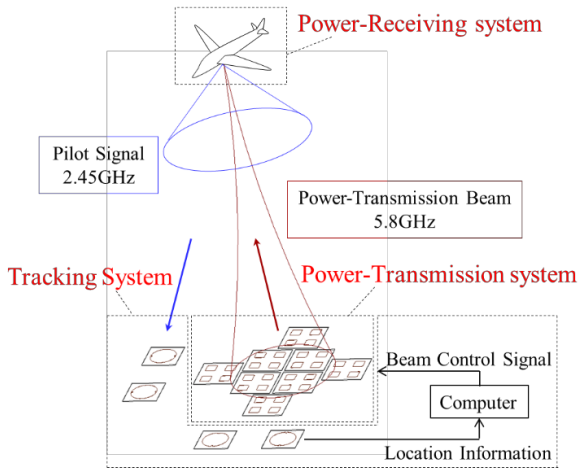


図 1 小型飛行体へのマイクロ波無線電力伝送の概念図

2.2. 受電システムの研究開発

当研究室の無線電力伝送システムでは、受電用アンテナとして方形パッチアンテナを用いている。しかし、小型飛行体への無線電力伝送や、今後進展するであろうその他の小型デバイスへの無線電力伝送を考えたとき、より小型で、かつより大きい受電面積を持つアンテナの開発が必要不可欠である。そこで、本研究では、小型飛行体への無線電力伝送における受電用アンテナとして、小型で超高利得が期待できるスーパーゲインアンテナの適用を提案・検討し、その開発を行った。図 2 は、スーパーゲインアンテナを搭載した場合に、期待される有効開口面積の拡大を模式的に示したものである。

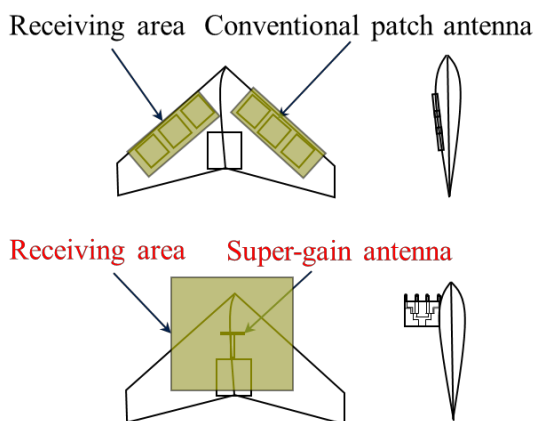


図 2 従来のパッチアンテナを用いた場合の有効開口面積(上)と、スーパーゲインアンテナを用いた場合の有効開口面積(下)の模式図

3. スーパーゲインアンテナ理論

3.1. 基礎理論

図 3, 図 4 に示すように、アンテナ素子を一列に並べ、それぞれにある適切な振幅と位相を持つ電流を励振すると、エンドファイア方向 ($\theta_0=\pi/2[\text{rad}]$, $\phi_0=\pi/2[\text{rad}]$) に最大電力利得を発生させることができる。このアンテナシステムをスーパーゲインアンテナと呼ぶ[2]。ここでは、その理論について簡単に説明する。まず、図 3, 4 の波源列が作る電界は、次の式で表される。

$$E(r, \theta, \phi, t) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{i} \cdot \alpha(\theta, \phi) \frac{1}{r} e^{j\omega t} \quad (1)$$

$$\mathbf{a} = [e^{-jk r_1} \quad e^{-jk r_2} \quad \dots \quad e^{-jk r_N}] \quad (2)$$

$$\mathbf{i} = [i_1 \quad i_2 \quad \dots \quad i_N]^T \quad (3)$$

ここで、 r_i ($i=1, 2 \dots N$) は各波源からの距離、 i_i ($i=1, 2 \dots N$) は各波源に励振される複素電流、 $\alpha(\theta, \phi)$ は波源の規格化電界指向性、 f は励振する電流の周波数である。また添え字 T は行列の転置を、* は複素共役転置を表す。式(1)を用いて、放射した全電力のうち、最大放射方向にどれだけ電力が集中しているかを示す最大電力利得を定義すると以下のようなになる。

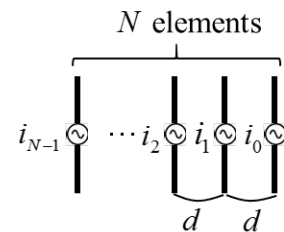


図 3 スーパーゲインアンテナの模式図

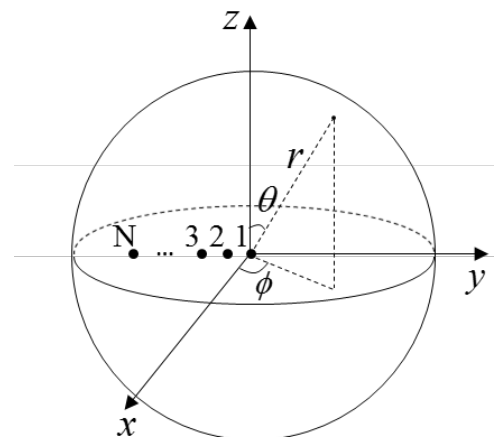


図 4 空間に配置されたアンテナ列

$$G_{dir} = \frac{4\pi r^2 P_{rad,max}}{P_{rad,all}} \quad (4)$$

$$= \frac{4\pi r^2 \cdot \frac{1}{2Z_0} |E(r, \theta_0, \phi_0, t)|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{1}{2Z_0} |E(r, \theta, \phi, t)|^2 r^2 \sin \theta d\theta d\phi} \quad (5)$$

$$= \frac{\mathbf{i}^* [4\pi \alpha(\theta_0, \phi_0)^2 \mathbf{a}(\theta_0, \phi_0)^* \mathbf{a}(\theta_0, \phi_0)] \mathbf{i}}{\mathbf{i}^* [\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \alpha(\theta, \phi)^2 \mathbf{a}(\theta, \phi)^* \mathbf{a}(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi] \mathbf{i}}$$

(6)

ただし、添え字 0 の付いた角度は最大電力放射方向を表す。式(6)はレイリー商と呼ばれ、この値を最大化するような複素ベクトル \mathbf{i} は、固有値問題によって求められることが知られている。したがって、あるアンテナ列に、それぞれ最適な複素電流 \mathbf{i} を励振することで、所望の方向に最大電力利得を持たせたアンテナシステムを構成することができる。この中でも特に、スーパーゲインアンテナは、エンドファイア方向に最大電力利得を持つように適切な複素電流が励振されたアンテナシステムである。

3.2. 素子数と素子間距離の決定

以上の理論に基づき、素子数と素子間距離の変化に対する、最大電力利得の変化を図 4 に示す。この結果と、伝送の対象物への搭載可能性から素子数と素子間距離を決定する。

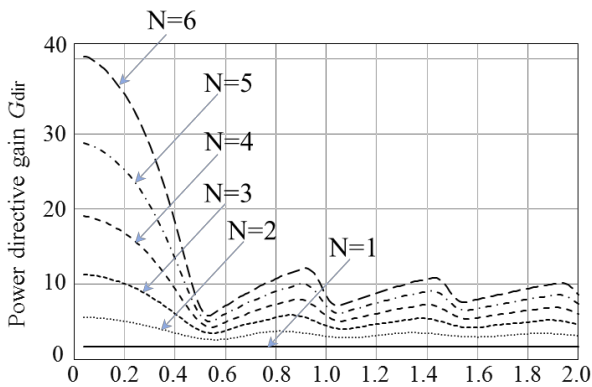


図 4 素子数と素子間距離に対する最大電力利得の変化 (アンテナ素子として半波長ダイポールアンテナを使用)

4. 給電系の検討

スーパーゲインアンテナ理論の研究では、最大電力利得が励振する複素電流のわずかな誤差によって劣化してしまうことが指摘されている[3]。そこで、実際に各アンテナ素子に理想的な複素電流を励振するための給電系を検討する。

4.1. 伝送線路の検討

伝送線路は、他の伝送系にはない以下の特徴を持つことから、高い精度で振幅比、位相差を確保しつつ電流を励振することが可能であると考え、マイクロストリップラインを採用した。

- ・基板加工機により高精度の加工が可能である
 - ・要素として必要な分配器、フェイズシフターがともに基板上にまとめて実装できる
 - ・伝送線路の構造によっては加工後の微調整が可能
- 以上に加え、伝送線路を全て基板上に実装したシステムは小型かつ軽量であるため、MAV への搭載を考慮しても有効であると考えられる。

4.2. 不等電力分配器の検討

伝送線路としてマイクロストリップラインを採用した場合、いかに高分配比で電力を分配するかという問題が発生する。スーパーゲインアンテナ理論では、表 1 にも示されているように、隣りあう素子間でも非常に高い振幅比での励振が要求される。しかし、電力分配器として一般的によく用いられる Wilkinson power divider は、図 5 のように、分岐後の線路幅の比で入力インピーダンスを調節し不等分配を実現する為、非常に高い分配比の場合構造的に実装が不可能になってしまう。そこで、図 6 のように、一部の線路の線路長を変化させるだけで入力インピーダンスを調節し、不等電力分配を行うパワーデバイダー[5]を導入することで、高い比率での電力分配を実現した。

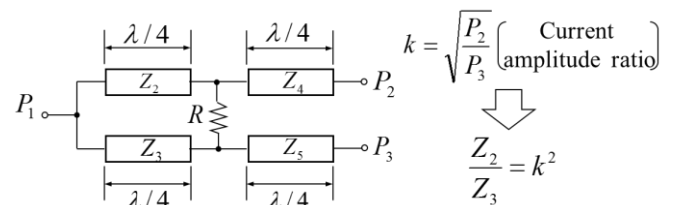


図 5 不等分配 Wilkinson power divider における分配比と分岐後の線路の特性インピーダンス比の関係

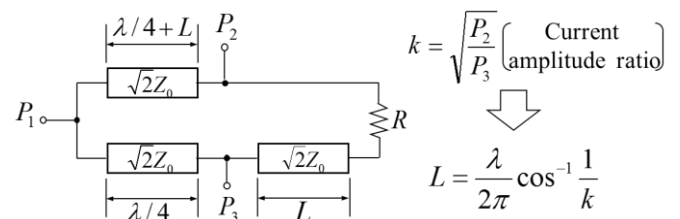


図 6 不等分配器[5]における分配比と線路長の関係

5. 製作・測定結果

以上までの検討に基づき、スーパーゲインアンテナの試作を行った。当研究では、アンテナ素子として、列にしたときにエンドファイア方向に放射可能で、小さな素子間距離でも構成可能なダイポールアンテナを用いた。また素子数と素子間距離は、図4の結果に加え、アンテナシステムが大きくなりすぎず、素子同士がぶつからないように、素子数 $N=4$ 、素子間距離 $d/\lambda=0.2$ を選択した。

5.1. 給電系

図7に製作したスーパーゲインアンテナを示す。また、表2に励振すべき最適な電流の振幅、位相と、試作した給電系が励振する電流の振幅、位相を比較した結果を示す。この電流値を理論に代入し、電力指向性と比較した結果が図8である。なお、電力指向性は最大放射方向の放射電力密度で規格化しており、大きさは表3に示している。これをみると、電力指向性はほぼ一致しており、最大放射方向の放射電力密度も、理想的な励振が施された場合の84.3%であり、非常に良い値が得られていると言える。

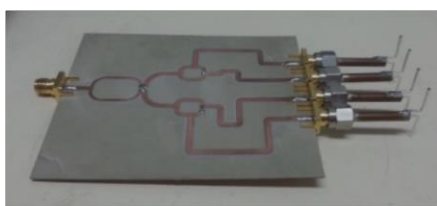


図7 製作したスーパーゲインアンテナ

表2 励振すべき電流と製作した給電系の励振する電流（上が振幅比、下が位相差。ただし全て素子1に励振される振幅と位相を基準とする）

Element No.	Amplitude ratio (Theory)	Amplitude ratio (Measured)	Gap (Measured-Theory) / Theory
1	1.000	1.000	0%
2	2.260	2.311	+2.2%
3	2.260	2.187	-3.2%
4	1.000	0.963	-3.7%

Element No.	Phase difference [deg] (Theory)	Phase difference [deg] (Measured)	Gap Measured - Theory [deg]
1	0	0	0deg
2	170.0	176.8	+6.8deg
3	340.0	347.3	+7.3deg
4	510.0	514.4	+4.4deg

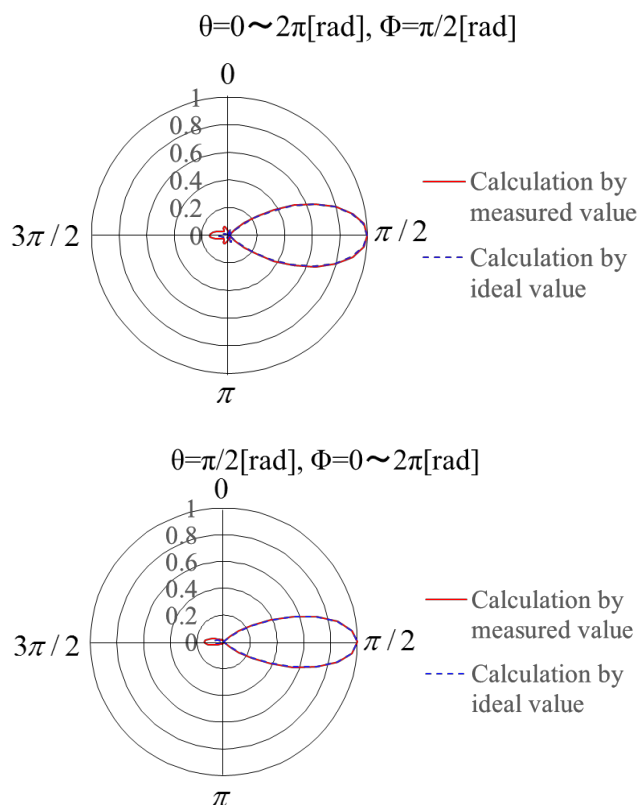


図8 測定した励振電流の振幅と位相から計算した電力指向性と、最適な励振電流の振幅と位相から計算した電力指向性(ともに最大放射方向の放射電力密度で規格化)

表3 最大放射方向の放射電力密度の比較 (入力電力1W)

	Power density in the direction of maximum radiation (W/m ²)
① Calculation by measured value	1.1270
② Calculation by ideal value	1.3370
① ÷ ②	0.8430

5.2. スーパーゲインアンテナの特性

製作した給電系にダイポールアンテナ素子を取り付け、性能を測定した結果を示す。図9は測定系の模式図で、ベクトルネットワークアナライザのポート1に製作したアンテナを、ポート2に参照アンテナを取り付け、距離を1m離し、どれだけの電力が伝送されているかを測定する。また、製作したアンテナを回転させることにより、電力指向性を測定する。

測定の結果、1Wを入力した時の最大放射方向の電力密度は表4のようになった。また、最大放射方向の電

力密度で規格化した電力指向性は図 10 のようになった。

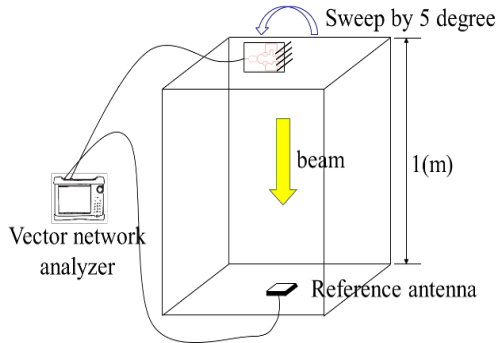


図 9 伝送電力と電力指向性の測定系

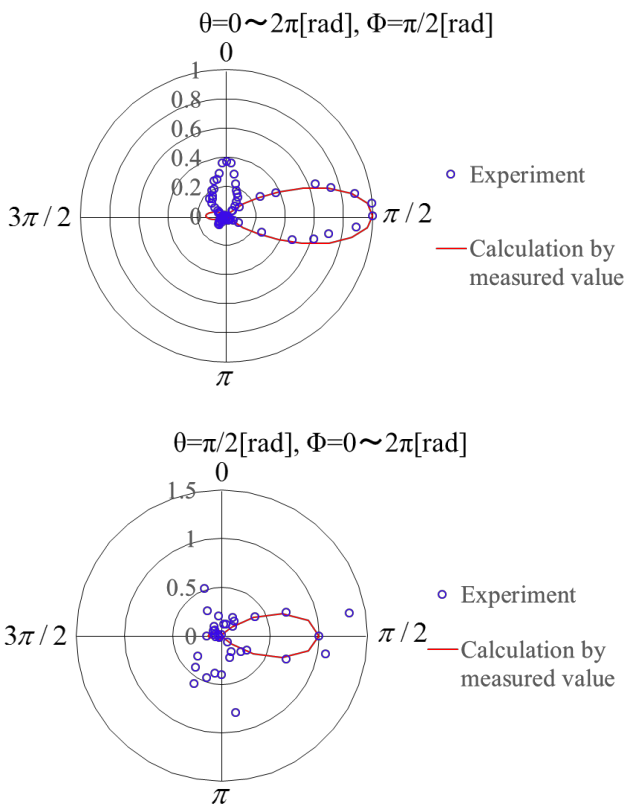


図 10 最大放射方向の電力密度で規格化した電力指向性

表 4 最大放射方向の電力密度の比較 (入力電力 1W)

	Power density in the direction of maximum radiation (W/m ²)
① Experiment	0.0318
② Calculation by measured value	1.1270
① ÷ ②	0.0282

6. 考察

実験結果より、最大放射方向の電力密度は、実験値が理論値の 2.82%の大きさであることが分かった。また、電力指向性は、図 10 の結果から、メインローブ以外の小さな放射を除けば、よく理論値と一致していることが分かった。以下、電力密度をより理論値に近づけるための考察と、メインローブ以外の放射についての考察を行う。

6.1 リターンロス

試作したスーパーゲインアンテナのリターンロス (S₁₁)を測定したところ、-2.78dB であり、入力した電力の 52.7%が反射電力となって放射に寄与していないことが分かった。そこで、伝送線路の反射特性と透過電力、アンテナ素子単体の反射特性をそれぞれ個別に調べたところ、表 5、表 6 の結果が得られた。この結果から、伝送線路は、23.1%の電力が散逸しているものの、残り 76.9%の電力は透過し、反射電力も小さいことが分かる。また、個々のアンテナについても、十分反射電力が小さいことがわかる。したがって、スーパーゲインアンテナのリターンロスは、これらを 1 つに統合した際に起こる、アンテナの相互結合が原因で起きているものと考えられる。これは、スーパーゲインアンテナが、非常に素子間距離の狭いアンテナアレイであることから理解できる。これを改善する為には、各アンテナ素子の入力インピーダンスに応じた整合回路を挿入すればよいのではないかと考えられる。ただし、正確な励振を行いつつ各素子の入力インピーダンスの測定を行うのは難しく、正確な推定方法が必要である。

表 5 伝送線路の反射特性と透過電力

S ₁₁	-23.31 dB	0.47 %
S ₂₁	-11.95 dB	6.38 %
S ₃₁	-4.67 dB	34.09 %
S ₄₁	-5.15 dB	30.53 %
S ₅₁	-12.28 dB	5.91 %
Total transmission power		76.91 %

表 6 各アンテナ素子の反射特性

Element No.	S ₁₁ [dB]	Return loss [%]
1	-22.2	0.6
2	-27.5	0.2
3	-27.0	0.2
4	-23.0	0.5

6.2 メインローブ以外の放射

図 10 上の実験値を見ると、 $\theta=0$, $\phi=\pi/2$ 方向に理論値には見られない放射が存在していることが分かる。これは、ダイポールアンテナ素子が電磁波を全く放射しない方向であること、また伝送線路が向いている方向であることから、伝送線路からの放射であると考えられる。すなわち、伝送線路上で上述の不整合による反射波と進行波が重ね合わさることで定在波が発生し、伝送線路が放射器として働いて、電磁波の放射が行われていると考えられる。したがって、同じく整合回路を挿入することによりこの放射もなくすことができると考えられる。

図 10 下の実験値では、 $\phi=\pi$ 方向付近に理論値にはない小さな放射が見られる。これは、ダイポールアンテナの軸やコネクタ、伝送線路が存在する方向で、適切に電磁場の重ね合わせが行われていないことで発生していると考えられる。

まとめ

本研究のまとめを以下に示す。

- ・小型飛行体への無線電力伝送系において、スーパーゲインアンテナを受電用アンテナとして用いることを提案・検討し、実際に試作・測定を行った。
- ・給電回路には、高精度の加工が実現可能なマイクロストリップラインと、線路長を変えるだけで任意の分配比での分配が可能な電力分配器を採用し、全て基板上に実装することで、理想的な電力指向性と、放射電力密度の 84.3%を得る伝送線路の製作を行うことができた。
- ・測定の結果、最大放射方向の電力密度は、実験値が理論値の 2.82%であり、規格化した電力指向性はほぼ理論値と一致した。
- ・電力密度の実験値が理論値より大幅に小さい理由として、相互結合によるリターンロスの増加や不要な放射が考えられ、これは、各アンテナ素子の入力インピーダンスを推定し、整合回路を挿入すれば解決されるのではないかと考えられる。

文 献

- [1] 小田章徳, 澤原弘憲, 石場舞, 小紫公也ら: “小型飛行体へのマイクロ波無線給電システム”日本航空宇宙学会誌, vol.59(691) pp.222-227, 2011.
- [2] 電子情報通信学会, アンテナ工学ハンドブック, オーム社, 2008.
- [3] N. Yaru, “A Note on Super-gain arrays,” Proc. IRE, vol.39, pp.1081-1085, September 1951.
- [4] A. Bloch, R.D. Medurst, and S. D. Pool, “A New Approach to the Design of Superdirective Aerial Arrays,” Proc. IEE (London), pt.III, vol.100, pp.303-314, September 1953.
- [5] Kwok-Keung M. Cheng, Pak-Wing Li, “A Novel