

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560444

研究課題名(和文) 集中定数素子内蔵多機能アンテナの研究

研究課題名(英文) Research on multi-functional antennas embedded with lumped elements

研究代表者

斉藤 昭 (Saitou, Akira)

電気通信大学・先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター・客員教授

研究者番号：80536920

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：内部に集中定数素子を配置し多周波化したアンテナに関して、解析モデルを導出し、所望の多周波で使用できるアンテナを高精度かつ短期間に設計できる設計手法を示した。実際に試作を行い、2.5/5GHz帯・0.86/2GHz帯の小型多周波アンテナ、周波数可変2周波アンテナを開発した。さらに放射パターンの制御のため、アンテナ間干渉の回路モデルを作成した。それに基づき、単方向性放射パターンを有するアンテナを開発し、このアンテナを背中合わせに配置したアレイでは、受信信号間の相関が低減されることを示した。この相関低減は、MIMO用アレイアンテナでは、伝送容量増大に有効なことを示した。

研究成果の概要(英文)：An analytical model for multi-band antennas, realized with embedded lumped elements, has been derived. With the obtained formulae, an accurate design method to develop multi-band antennas for arbitrary bands over a short term is clarified. With the method, dual-band antennas for 2.5/5 GHz bands and 0.86/2 GHz band have been developed. In addition, frequency reconfigurable dual-band antennas are demonstrated. Furthermore, to design radiation patterns, the mode-transfer behavior in the frequency range was analyzed. With the analysis, antennas appropriate for MIMO applications were designed and fabricated. Under the favor of the designed unidirectional patterns, correlation coefficients in 2.5 and 5 GHz bands were shown to be reduced. The reduction is expected to improve the data transmission rate by 2 bit/Hz.

研究分野：マイクロ波工学

キーワード：アンテナ理論 多周波アンテナ 集中定数素子 放射パターン 電磁界解析

1. 研究開始当初の背景

近年は、複数の無線システムをシームレスに接続するためのアンテナの多周波化、高速伝送のための MIMO 技術の採用等、多数のアンテナを搭載した無線システムのニーズが拡大している。このようなシステムで用いられるアンテナへの要求は、小型化、多周波化、高利得化、放射パターン制御等、システムによって極めて多様であり、その多様性に対応できるようなアンテナの設計手法が強く求められている。

2. 研究の目的

本研究では、第1に多周波で使用できるアンテナの回路モデルを解明し、所望の多周波で使用できるアンテナを高精度かつ短期間に設計できる設計手法を明らかにする。また実際に試作を行い、小型多周波アンテナが実現できることを実証する。

第2に MIMO 通信用アンテナに有効な、放射パターンが制御されたアンテナを実現するため、アンテナ間干渉の回路モデルを作成し、それに基づき放射パターンの制御手法を明らかにする。またこの手法を用いて、信号間の相関を低減した、MIMO 用アンテナの設計・試作確認を行い、伝送容量増大に有効なことを確認する。

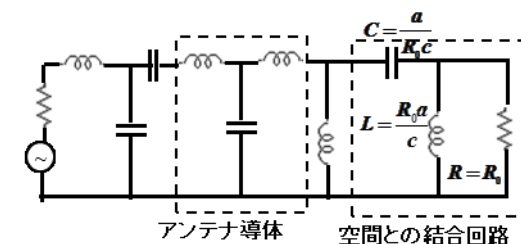
3. 研究の方法

アンテナ特性が直感的に把握でき、かつ多様な要求に対応した設計のできる手法を提案するために、アンテナと空間との結合を表す Chu の導いた等価回路を修正・発展させ、アンテナ導体も含めた解析モデルを導出する。導体から離れた領域（アンテナ球外）の電磁界は、自由空間の波動方程式の固有モードで展開できることは知られており、ここでは導体に近接した領域（アンテナ球内）でアンテナ導体に関する境界条件を満足する固有モードを考えることで、導体の寄与を取り込む。これらアンテナ球内外の電磁界が、境界条件を満足するように展開係数を求めることで、全領域の電磁界を決定する。求められた電磁界から、アンテナの入力インピーダンス、放射パターン等が定まり、アンテナの特性と導体構成との関係が一意に定められる。このようなモデルに基づき、アンテナ導体に関して、伝送線路と記述できる導体の中に集中定数素子を適切に配置することで、多様なアンテナ特性への要求に対応したアンテナを開発する。

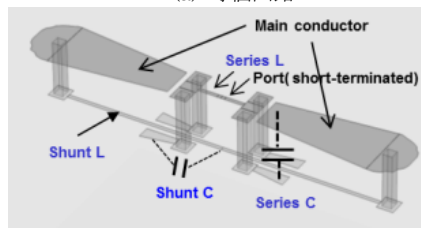
4. 研究成果

本研究では、第1にアンテナ等価回路を用いた、所望の多周波で使用できる小型多周波アンテナの実現を図った。アンテナは、伝送線路と考えられる導体と放射現象と関連する空間との結合回路との縦続接続として、記述できる。この空間との結合回路は、波動方程式の固有関数で展開できるが、アンテナサ

イズが小さい場合は、電磁界はほぼ基底モードが支配的となることから、図1(a)に示した回路で記述される。これに着目し、導体内に適切に配置された集中定数素子を用いて、所望の周波数において、空間との結合回路をインピーダンス整合させることで、2周波アンテナが実現できると考えその検討を行った。図1は、設計・試作した2周波アンテナの回路構成・試作品・特性を示す。集中定数素子を含まないアンテナを試作し、その実測値と等価回路特性を比べることで、空間との結合回路の素子値をフィッティングにより求めた。この回路に、集中定数素子を種々に配置した各構成に関して、反射損失が2周波で最適となるよう素子値の最適化シミュレーションを行った。この結果から、2周波アンテナが実現できる素子配置・素子値を決定した。またこの素子配置をアンテナパターンとして実現するため、図1(b)に示したパターンを考案した。試作・評価した結果、図1(d)に示すように、2.5GHz/5GHz帯の2周波アンテナが実現でき電磁界シミュレーションの結果とも良く合っている。またサイズは全長1/5波長と、ダイポールアンテナの約40%しかなく極めて小型である。さらにその集中定数素子値を変化させることで、両帯域の共振周波数が制御できることもシミュレーション並びに実測値で実証した。



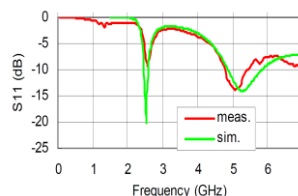
(a) 等価回路



(b) 等価回路を実現するレイアウト



(c) 2周波アンテナ写真

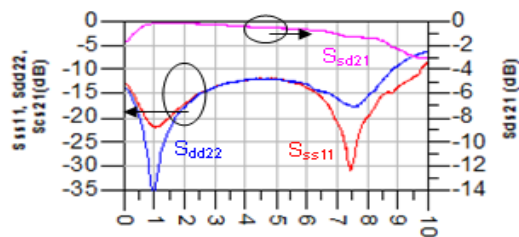


(d) 反射損失

図1 2周波アンテナの構成と試作・評価

上記のアンテナは差動信号で動作するアンテナであるため、良好に動作させるには、同軸ケーブルとアンテナの間に不平衡信号を差動信号に変換するバランを配置する必要がある。そのためブロードサイド結合線路を

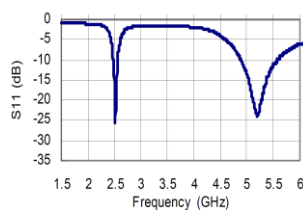
用いたアンテナ用のバランを考案し、図 2(a)に示したような広帯域特性を確認することでその有効性を理論・実験で実証した。さらに、図 2(b)(c)に示したアンテナと集積したバラン内蔵 2 周波アンテナを開発した。



(a)バラン単体の特性 (実測値)



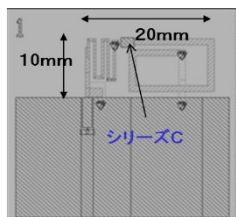
(b)バラン内蔵アンテナ



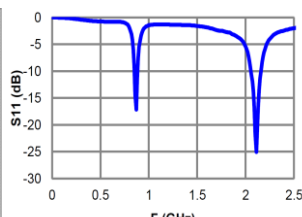
(c)反射損失 (実測値)

図 2 バラン内蔵 2 周波アンテナの構成と試作・評価

この 2.5GHz/5GHz 帯 2 周波アンテナの構成を用いて、0.86/2GHz 帯の小型 2 周波アンテナを設計・試作した。ここでは、一般には小型化とトレードオフとなる、放射効率低下を抑制することを目標とした。図 1 の等価回路の解析及び実測値との比較から、放射効率低下の最大の要因はシャントインダクタの損失であることを解明した。この対策として、図 3 に示したように、パターンの最適化/インダクタの線路幅最適化/線路長あたりのインダクタンス増大のためのスパイラル化/の設計・試作確認を行った。この結果、反射損失を含む総合効率の実測値が両周波数において 50%以上という、超小型・高効率 2 周波アンテナが実現できた。



(a)試作パターン

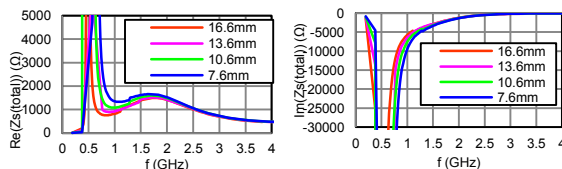


(b)特性 (実測値)

図 3 0.8GHz/2GHz 帯 2 周波アンテナ

以上の解析では、空間との結合回路の特性は、実測値とフィティングすることで求めていた。しかし、厳密には集中定数素子を変えると、導体の内側の電流分布が変化することで空間との結合回路の特性も変化する。このため、最終設計の段階で集中定数素子パターンを電磁界シミュレーションを用いて再調整する必要があった。この作業を不要とするために、導体幅は小さいという条件を課して、電磁界の多極展開の手法と Chu の等価回路の手法とを組み合わせることで、空間との結

合回路と導体上の電流分布の関係を導出した。導体幅が小さい条件は上記の 2 周波アンテナでは満足されている。この結果、内蔵した集中定数素子が空間との結合回路にどのように影響を及ぼすのかが解明でき、集中定数素子を変えた場合のアンテナ特性への影響が厳密に評価できるようになった。



(a)実部

(b)虚部

図 4 空間との結合回路インピーダンスの実部と虚部

例として、内蔵シャントインダクタの線路長を変えてインダクタンスを変化させた場合の、空間との結合回路の特性変化を図 4 に示す。シャントインダクタがない場合は、空間との結合回路のインピーダンスは比較的単調な変化を示すが、シャントインダクタが入ることによりかなりドラスティックな変化をもたらされることがわかる。この空間との結合回路を用いて、集中定数素子値を変化させた場合の共振周波数の変化を図 5 に示す。解析値と実測値は良く合っており、解析の妥当性が実証された。また解析値を検討すると、下側の共振周波数は、空間との結合回路とシャントインダクタで新たに作り出された反共振により実現されており、上側の共振周波数は、導体の長さでほぼ決まるダイポールアンテナと同様な共振周波数であることを示した。この 2 周波アンテナは、共振周波数の割には極めて小型である理由は、下側の共振周波数が集中定数素子で作りに出されたものであることも理論的に解明した。

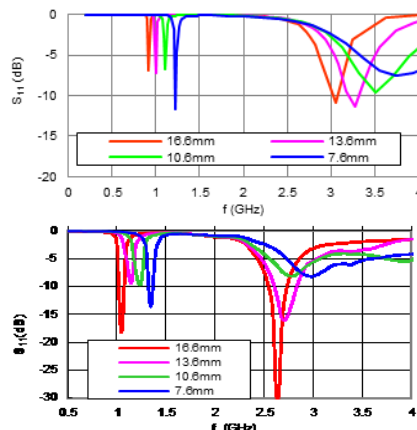


図 5 2 周波アンテナの特性

上側：解析値 下側：実測値

応用として、図 6 に示す 2 周波で共振周波数が可変にできるリCONFIGャラブルアンテナを開発した。集中定数素子のシリーズインダクタとシャントインダクタの各々にバラクタを直列接続して、等価的なリアクタンスをバラクタに印加する電圧で制御した。

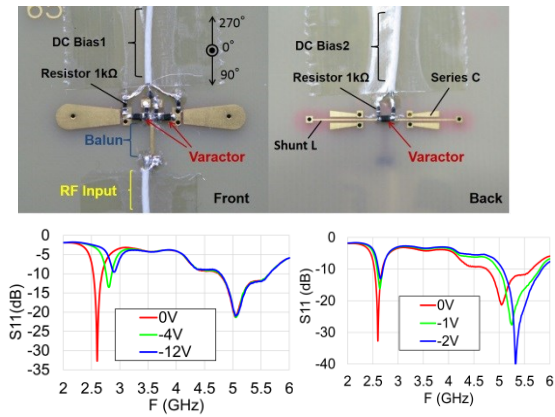


図6 試作したアンテナと特性実測値

素子値を適正に選んだ結果、他方の共振周波数には影響を与えず、片側だけの共振周波数のみが増減するという好ましい特性が実現されている。2.5GHz帯では2.6~2.9GHzの範囲で、5GHz帯では5.1~5.3GHzの範囲で共振周波数が制御でき、放射パターンはオムニ指向性が概ね維持された。オムニ指向性が維持される理由は、アンテナが小型であるため、5GHz帯でも基底モードの放射パターンに留まることによる。

第2の目標として、放射パターンの制御方法を明らかにすることを挙げた。その応用としては、アンテナ間の受信信号相関を放射パターン制御により低減しMIMO用アンテナアレイの伝送効率向上を図ることを目標とした。

アンテナ間の空間を介した結合のメカニズムは、有限距離における空間との結合回路と解されるので、図7に示す結合回路の微小区間の表現を求めた。これを距離で定積分することで有限距離の空間での結合が表現される。ここでaはアンテナ端子からの距離を示す。この等価回路は導波管内のTM波と素子配置は同じであるが、先頭の容量素子値は距離aに依存しており、これがアンテナの空間との結合回路の特徴となっている。アンテナ間干渉は、2つのアンテナ間距離aが有限の場合の回路間の結合と考えられるので、有限距離で解析できるこの等価回路が有効となる。

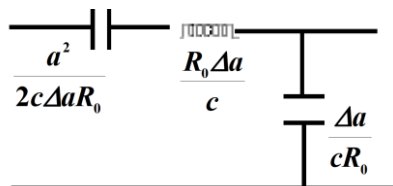
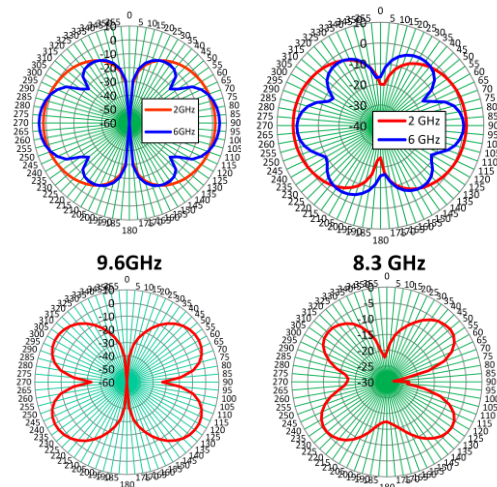


図7 空間との結合回路の分布定数回路表現

放射パターンは波動方程式の固有モードで決まる電界の方位依存性であり、電界は固有モードの1次結合で表現されることから、放射パターン制御は、モード励起比率制御で

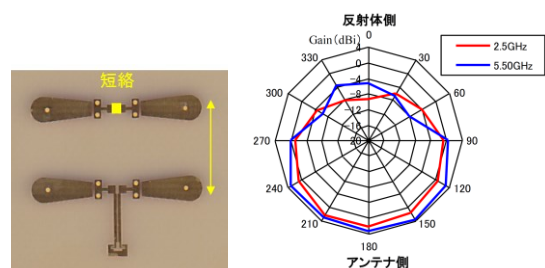
あるとも言える。2周波アンテナの項で既に導出したモード励起比率と導体上の電流分布の関係を用いると励起比率が定まる。この励起比率に、各モードの電界分布を掛けたものとして放射パターンが求められる。但し、2周波アンテナの場合は非常に小型であるため基底モードのみの解析でよいが、放射パターンの変化を見るには高次モードまでの評価が必要になる。図8は、集中定数素子を含まないアンテナに関して数値計算した放射パターンと試作したアンテナの実測値を比較したものである。上側は基底モードあるいは高次モードが支配的となる周波数での放射パターンを、下側は複数のモードが干渉合っ、両側の方位がヌルとなる周波数の放射パターンを示すが、いずれも解析値と実測値は良く合っており、解析の妥当性が実証された。



(a)解析式から計算 (b) 実測値

図8 空間との結合回路の分布定数回路表現

次に放射パターン制御の応用として、アンテナ間の受信信号相関を放射パターン制御により低減したMIMO用アンテナを開発し、その伝送効率の評価を行った。図9に示したように、開発した2周波アンテナを2素子並べ片側を短絡して他方を励振した場合、図9(b)に示したような単方向化された放射パターンが得られた。このアンテナを2素子背合わせに配置すると、2つのアンテナの放射パターンの重なりが小さいものができる。



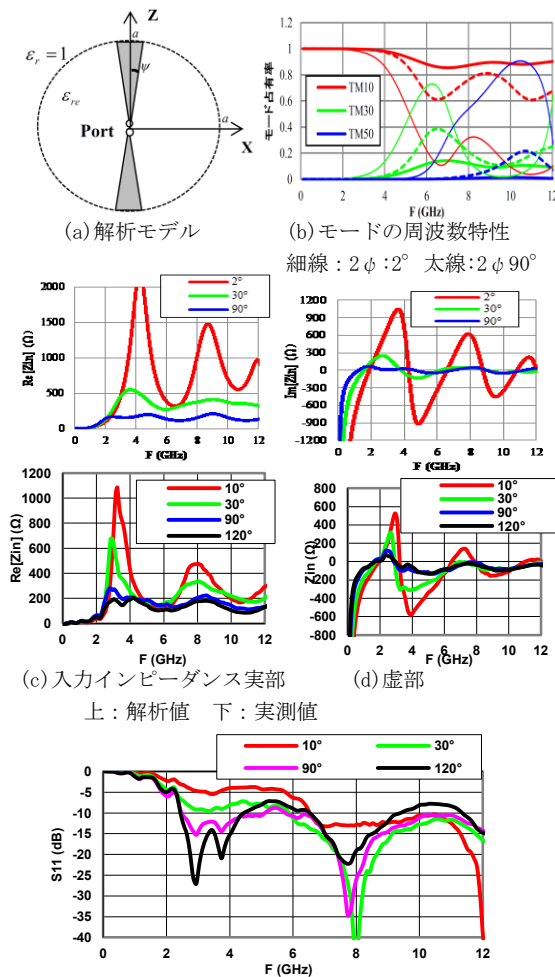
(a) 試作したアンテナ (b) 放射パターン実測値

図9 単方向化された放射パターンを有するアンテナ

このアンテナアレイに信号の載った電波が入射した場合、2つのアンテナが受信する信号の相関は、2.5GHz/5GHz帯ともに0.5以下の相関係数となった。この相関係数の低下は、MIMO通信では、信号雑音比(SNR)が20dBの場合2bit/Hzの伝送容量向上に相当することを確認した。

これまで述べた解析手法は導体幅が狭く比較的狭帯域のアンテナにしか適用できないものであった。この理由は、図10(a)に示したように、導体から離れた領域(アンテナ球外)は自由空間として記述できるが、導体に隣接するアンテナ球内では導体に応じた記述をしなければならないことに起因する。言い換えると、導体幅が狭い場合はその影響が小さいため、球内のモードも自由空間のもので近似できるが、導体幅が大きくなるとはやこの近似は許容できず、導体に応じた固有モードを考える必要がある。

この課題を解決し、自己補対アンテナ・ボウタイアンテナ等の、導体のなす角度 2ϕ が大きく導体が電磁界に大きく影響する場合にも適用できる解析手法を検討した。これは、導体幅の広い上記のようなアンテナが、



(e) 端子インピーダンス最適化時の反射損失 (実測値)
 Z_p : 10°: 300Ω, 30°: 300Ω, 90°: 190Ω, 120°: 170Ω
 図10 導体のなす角度 2ϕ とモード推移・入力インピーダンス・反射損失の周波数特性の関係

一般に広帯域特性を示すことから、広帯域アンテナの解析には欠かせないと考えられる。具体的には、大きな導体の端で電界の接線成分が0になる境界条件が、球内の電磁界分布に大きな影響を及ぼす。この球内の電磁界を導体の境界条件から解析し、各モードが周波数とともにどのように変化するかを解析的に求めた。その結果を用いて、平面扇型アンテナに関して導体のなす角度が大きくなると広帯域になることを、理論的に検証するとともに、実験的にも実証した。図10に、導体のなす角度が大きくなった場合の電磁界のモード推移と、アンテナの入力インピーダンスの変化を示す。角度が大きくなると、入力インピーダンスの実部・虚部とも一定に近づき、端子インピーダンス(Z_p)を最適にすることで広帯域となることがわかる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 11 件)

- (1) 齊藤昭, 小野寺祥一, 金龍, 石川亮, 本城和彦, "ワイドアングル平面扇型アンテナが有する広帯域特性の解析," 電子情報通信学会総合全国大会, 2015年3月11日, 滋賀県草津市
- (2) 金龍, 齊藤昭, 石川亮, 本城和彦, "平面扇型広帯域アンテナ特性の導体を挟む角度の依存性," 電子情報通信学会総合全国大会, 2015年3月11日, 滋賀県草津市
- (3) Akira Saitou, Shoichi Onodera, Ryo Ishikawa, and Kazuhiko Honjo, "Analytical Characteristic Expression for Dualband Antennas Embedded with Elements inside the Antenna," Proc. 2014 Asia Pacific Microwave Conference, pp. 971-973, Nov. 8th, 2014, Miyagi(Sendai)
- (4) 小野寺祥一, 石川亮, 齊藤昭, 本城和彦, "集中定数素子内蔵2周波アンテナの解析的検討," 2014 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014年9月23日, 徳島県徳島市
- (5) Shoichi. Onodera, Akira Saitou, Ryo Ishikawa, Kazuhiko Honjo, "Novel Design of Dual-band Reconfigurable Antennas Using Lumped-Elements and Varactors Located Inside Antenna's Conductor," IEEE-APS Top. Conf. on Ant. & Propag. in Wireless Communications pp. 434-437, August 7th, 2014, Aruba (Palm Beach)
- (6) 齊藤昭, 石川亮, 本城和彦, "扇型線状アンテナ放射パターンの多極展開を用いたモード推移の解析," 2014 電子情報通信学会総合大会, 2014年3月19日, 岐阜県岐阜市

- (7) Akira Saitou, Ryo Ishikawa, and Kazuhiko Honjo, "Analytical Expression of Linear Antenna's Characteristics Using Multipole Expansion and Chu's Equivalent Circuit," Asia Pacific Microwave Conference, pp. 585-587, Nov. , 2013, Korea(Seoul)
- (8) 小野寺祥一, 石川亮, 齊藤昭, 本城和彦, "2 帯域を独立に制御できるリコンフィギュラブル 2 周波アンテナ," 2013 電子情報通信学会ソサイエティ大会, p. 157, 2013 年 9 月 20 日, 福岡県福岡市
- (9) 齊藤 昭, 石川 亮, 本城 和彦, "多重極展開を用いた高次モードを含む擬似線状アンテナ特性解析の基礎検討," 2013 電子情報通信学会ソサイエティ大会, p. 148, 2013 年 9 月 17 日, 福岡県福岡市
- (10) Akira Saitou, Ryo Ishikawa, Kazuhiko Honjo, "Parameter Extraction of c - and π - modes for Broadband Balun" Proceedings of Asia-Pacific microwave Conference, pp.22-24, Dec. 2012, Taiwan(Kaoshiung)
- (11) 齊藤昭, 石川亮, 本城和彦, "中空配置非対称結合線路の広帯域バラシ特性に関する回路論的解析" 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2012 年 9 月 11 日 富山県富山市

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ

<http://www.mwsys.cei.uec.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 昭 (Saitou Akira)

電気通信大学先端・ワイヤレスコミュニケーション研究センター・客員教授

研究者番号：80536920

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

本城 和彦 (Honjo Kazuhiko)

電気通信大学・電気通信大学大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：90334573

高山 洋一郎 (Takaya Yoichiro)

電気通信大学先端・ワイヤレスコミュニケーション研究センター・客員教授

石川 亮 (Ishikawa Ryo)

電気通信大学・電気通信大学大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：30333892