

高周波標準

(High Frequency Standard)

光技術部, 大阪ライフエレクトロニクス研究センター

井上武海, 川上友暉, 中野 洋, 古屋克己, 岡野好伸,
アントン・ウィダルタ, 加藤吉彦

1. 研究の背景

高周波, マイクロ波等の電磁波は, 近年広い産業分野で利用されるようになり, ますます高周波化, 広帯域化してきた。それに伴って, 電磁波諸量の高度の計測技術や計測器が広く用いられている。RF(Radio Frequency: 高周波・マイクロ波周波数域)では, それ以下の周波数での集中定数的扱いと異なり, 分布定数的, 波動的な取り扱いが必要となる。このため, 低周波における電圧, 電流, 抵抗などに代わって電磁波の種々のパラメータが基本的な測定量として重要になる。これらには, エネルギー関連量として, 電力, 電磁界強度, 雑音等があり, 回路量として, インピーダンス, 反射率, 減衰量, 位相量等多くの種類がある。周波数領域で見ると, 1 MHz以上の高周波, マイクロ波, ミリ波を経て, 光の領域まで非常に広い範囲にわたる。一方, 電磁波は, 高周波, マイクロ波領域では周波数帯域に対応して, 各種の同軸, 導波管, 空間及び種々の線路が伝送媒体として使用される。近年, 細径同軸や平面回路の発達と高性能コネクタの実現等により, 数10 GHzに至る広帯域, 大容量の信号伝送, 高速デバイス間の信号伝送, 精密計測など利用範囲が急速に拡大している。導波管は, おもに10 GHz以上のマイクロ波, ミリ波領域で用いられ, 周波数帯域によって種々のサイズがあるが, 低損失伝送, 大容量伝送等の特徴を生かして, レーダ, マイクロ波通信, 衛星通信等, 従来から広く用いられている。このように電磁波諸量は, 周波数, 伝送路及び測定量等の組み合わせにより, 多様な広がりを持っている。

これら電磁波に関連する種々の量に対する計測の信頼性を確保するには, 基盤となる高度の標準及びトレーサビリティを確立し, 計測器の性能を保証することが不可欠である。一方, 標準を取り巻く内外の動向

は, 貿易のグローバル化と自由化の促進にあいまって, 近年大きく変化してきた。国内的には, 計量法に基づく新しいトレーサビリティ制度と試験所認定制度の整備が推進されつつある。国際的には, 昨年国立標準研究所のMRA(相互承認)に向けた合意がなされ, BIPM(国際度量衡局), 地域計量組織, 各国標準研究所の間で, MRA推進のための活発な活動が開始された。この動向に対応するには, 各国の標準とトレーサビリティの整備が急務である。

高周波標準に関し, 海外では, ヨーロッパ, アメリカ等の先進諸国はじめアジア諸国においても, 近年の高周波化及び広帯域化に対する要求に応えるため, RF標準の開発が積極的に進められている。一方, CIPM(国際度量衡委員会)のCCE(電気諮問委員会)GT-RF(高周波作業部会)やAPMP(アジア太平洋計量計画)等が主宰するRF標準の国際比較も種々計画されている。

電磁波標準に関し, これまでも当所では, いくつかの量について, 我が国独自の方式による高精度計測技術の研究を行い標準を開発するとともに, 国際比較にも参加した。また, 計量法による新しいトレーサビリティ制度が1993年から開始され, 高周波電圧, 電力及びレーザパワーについて特定標準器により指定校正機関の日本品質保証機構の副標準器への校正さらに認定事業者の特定二次標準器への校正と認定事業者のユーザへの校正が始まった。しかし, これまで必ずしもこの制度によるトレーサビリティ体制が十分ではなく, 2000年4月より改正計量法により事業者の範囲を拡大しトレーサビリティの充実が図られることになっている。

2. これまでの研究経過と現状

電子技術総合研究所では, これまで, 高周波標準の

開発のため、導波路系の電力、減衰量、インピーダンス、雑音及び自由空間中の電磁界強度等の精密計測技術の研究を行ってきた。

電力に関し、マイクロ波広帯域RF電力標準の研究の一環として、マイクロ波帯では、主に同軸系で、ミリ波帯では主に導波管系で研究を行ってきた。これまで、14 mm同軸の1.3 GHz及び導波管10 GHz電力標準を開発し、JCSS校正を行ってきた。また、ミリ波35 GHz及び94 GHzの電力標準を開発した。これらは、いずれも各ポイント周波数で開発されたが、今日、より広帯域化、高周波化が必要になっている。このニーズに応えるべく、10 MHzから40 GHzまでの同軸系で2種類の電力標準の研究を行い、校正システムを開発した。

7 mm同軸電力に関して、Fig.1に示す10 MHz～18 GHzの広帯域電力測定カロリメータに基づく校正システム¹⁻³⁾を開発し、広帯域同軸電力標準を確立した。これは、広帯域信号源、カロリメータ、自動計測制御装置等から成る。広帯域RF負荷をカロリメータの測定端に接続して等温制御方式のtwin型カロリメータによりRF

電力を測定し、同時にモニタ電力を測定して広帯域に被試験電力計を校正する。計測は、電力の精密自動コントローラとグラフィックプログラミングにより容易に実行できる。開発したカロリメータ、制御系などを統合して全帯域で校正実験及び不確かさの評価を行った。この結果、本システムの最良の標準不確かさとして周波数10 MHzから18 GHzにおいて、0.1～0.21 %が得られた。被試験電力計の校正の例では、校正標準不確かさ0.16～0.65 %が得られた。

2.9 mm同軸電力に関して、7 mm同軸と同様の原理により、カロリメータ及び校正システムを開発した。不確かさ評価の結果、本システムの最良の標準不確かさとして周波数10 MHzから40 GHzにおいて、0.2～0.6 %が得られた。被試験電力計の校正の例では、校正標準不確かさ0.2～1.1 %が得られた。

開発した7mm同軸校正システムを用いて、CIPM GT-RF 主宰の18 GHz帯RFパワー国際比較(CCEM. RF-K8. CL)に参加し、1999年末に2個のサーミスタマウント仲介器について周波数10 MHzから18 GHzまでの指定さ

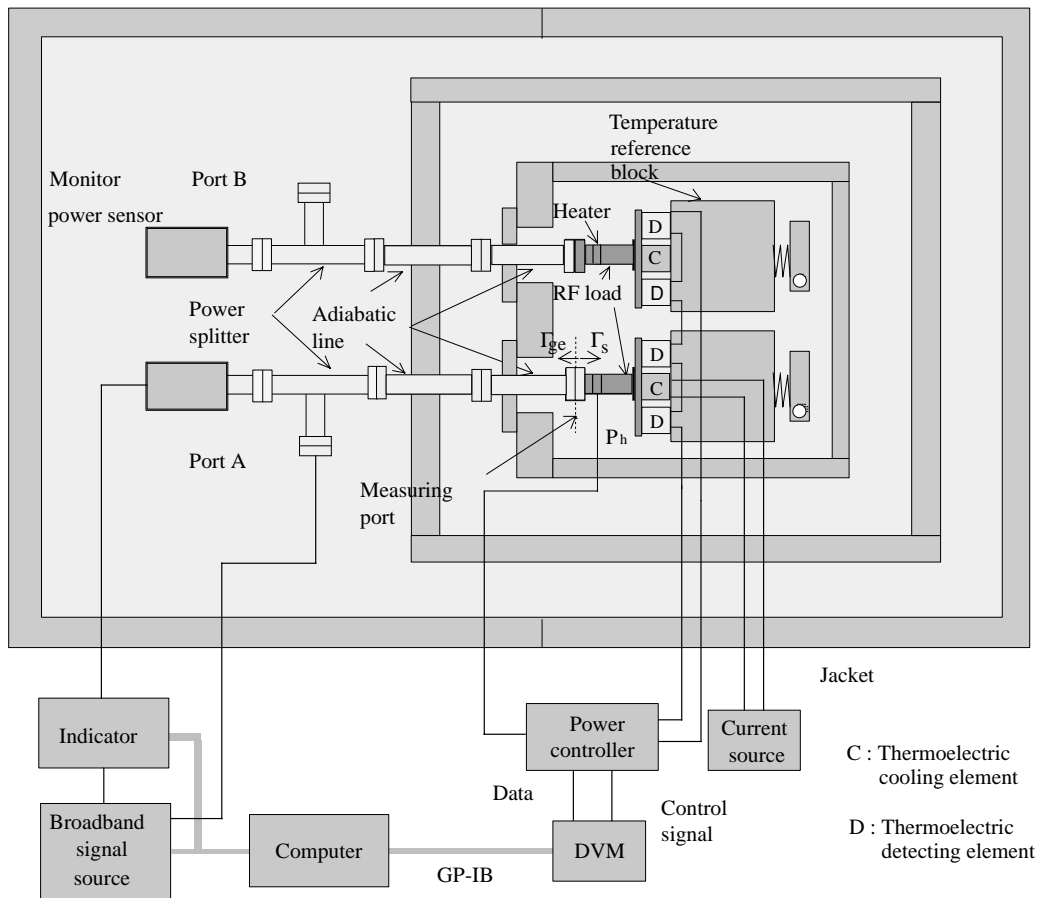


Fig.1 Automatic calibration system for a broadband power meter

れた周波数8点で校正係数の測定を行った。この比較は、現在進行中である。

2.9 mm 同軸電力校正システムを用いて、前述の比較と同じく、GT-RF主宰の26 GHz帯のRFパワー国際比較 (CCEM. RF-K10CL) に参加した。ドイツのPTBがパイロット研究所, ETL と NRC (カナダ) が協力研究所となって2000年7月から参加13研究所間の巡回比較が開始された。仲介者は、2個のサーモセンサでその校正係数を測定することになっている。2002年3月に完了する予定である。

ミリ波導波管系の広帯域電力標準の研究の一環として、周波数75 GHzから110 GHzまでのWバンド全帯域を対象として精密計測技術の研究を行った。原理は、マイクロカロリメータ方式により、広帯域でのポロメータマウントの実効能率測定及び校正を行う。グラフィックプログラミングにより1 GHz間隔40点の実効能率測定を約7時間で自動計測可能であり、実用的に優れていることが示された⁴⁾。今後、本システムにより測定したポロメータマウントを標準とし、位相シフトを利用して信号源不整合を低減させる比較測定方法により広帯域電力計の校正技術を開発する予定である。

減衰量標準に関しては、従来、機械的寸法や周波数などから減衰定数が高精度で算出できるピストン減衰器を基準とした標準が開発されてきた。しかし、その後、標準の高精度化・精度維持等により適した方式として、一次標準器の基準減衰器に低周波電気標準にトレーサブルな1 kHzのIVD (Inductive Voltage Divider) を採用し30 MHzピストン減衰器を二次標準器とする方式⁵⁾について研究を行っている。

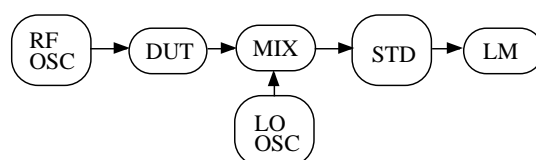
このなかで、IVDとホモダイン検波を利用した30 MHzと10 GHzのポイント周波数における減衰量標準を開発したが、広帯域な標準開発・供給の要求に対応するため、当面の目標周波数範囲を10 MHz～40 GHzに設定した研究を行っている。測定方法には、回路構成・回路素子の帯域特性などの点で広帯域化に適したヘテロダインを利用した中間周波置換法を採用した。中間周波置換法は、RFの被測定器 (DUT) の減衰量をヘテロダイン検波の直線性 (入力RF信号振幅と出力中間周波信号振幅の比例関係) を利用して、中間周波信号 (IF) の減衰量に変換し、中間周波数で動作する標準減衰器 (STD) の減衰量と置換して測定する方法である。

置換測定回路の概念図を Fig.2 (a), (b) に示す。図の

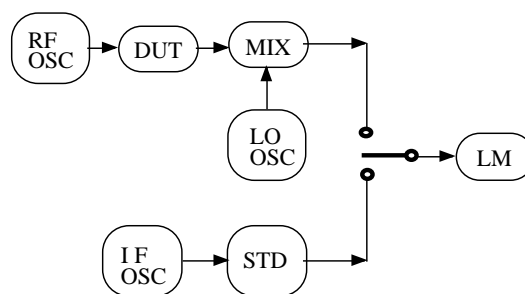
OSCは発振器, MIXはミキサ, LOOSCは局部発振器, LMはIFのレベルメータである。(a)直列型では, DUTの減衰量変化に対して, LMの入力が常に一定になるようSTDの減衰量を調整し, そのSTDの変化分からDUTの減衰量を決定する。(b)並列型では, DUTの減衰量変化に対して, MIX出力とSTDの出力が常に同じになるよう, LMで観測しながら, STDの減衰量を調整し, そのSTDの変化分からDUTの減衰量を決定する。直列型か並列型かは, IF増幅器の直線特性, STDの挿入損などの条件により決まる。実際の測定方法として (1) 中間周波数が1 kHzで, IVDを標準減衰器として利用する1 kHz中間周波置換法には, 直列型を, (2) 中間周波数が30 MHzで, ピストン減衰器を標準減衰器として利用する30 MHz中間周波置換法には, 並列型を採用した。

(1)の1 kHz中間周波置換法方法では, 高い減衰量を測定するため光ファイバの高アイソレーション特性を利用した中間周波置換法による10 MHz～100 MHz用の減衰量標準装置を開発した。測定値を検証するため, 30MHzピストン減衰器の寸法などから算出した減衰量と比較測定し, その偏差は妥当な範囲内にあることを確認した。また, 18GHzまでの周波数についても, 測定回路を試作, 実験し, ヘテロダイン検波の直線性, 雑音, 安定度等について, 必要な性能が得られた。

(2)の30 MHz中間周波置換法では, 4 GHz～40 GHz



(a) Serial intermediate frequency substitution method



(b) Parallel intermediate frequency substitution method

Fig.2 Intermediate frequency substitution methods of radio frequency attenuation measurement

で測定回路を構成し、ミキサについて局発信号の基本波モードと第3高調波モードで実験し、それぞれ60 dB、40 dBのダイナミックレンジや0.01 dB程度の再現性などの結果が得られ、基本波モードを利用すれば、ほぼ必要な特性が得られることを確認した⁶⁾。

2001年度に、当所も参加して、同軸線路系の60 MHz及び5 GHz減衰量国際比較(CCEM. RF-K. 19.CL)が予定されており、これら装置を用いて測定する予定である。

従来実験的な検討しかなかったヘテロダイン検波における高調波の影響について、新たに解析的な検討を行い、回路設計の条件を導いた⁷⁾。また、RFの減衰量測定を応用し、LDの変調特性を利用した光ファイバ減衰量測定方法⁸⁾等も開発した。

受信システムやデバイスの雑音特性を評価するためには、雑音の計測が必要である。その基準となる雑音標準の開発には、2個の雑音温度が既知の標準雑音源と、比較測定装置(ラジオメータ)が必要である。ラジオメータの入力に2個の既知の標準雑音源を接続した時のラジオメータの各々の出力値からラジオメータを校正した後、その入力に未知の雑音源を接続して、その雑音温度を計測するという手順をとる。このため、ラジオメータと雑音温度の異なる2個の標準雑音源を開発する必要があるが、特に広帯域化の観点から研究を行っている。具体的には、広帯域同軸型ラジオメータとして、トータルパワー型ラジオメータ及び相関型ラジオメータ及び広帯域標準雑音源について研究、開発を進めている。

トータルパワー型ラジオメータは、この方式の欠点

である非直線性の影響を軽減するため検出器部に差動検出方式を用い、使用する増幅器等の利得変動の影響を抑えるため温水循環による温度安定化を図った。X帯(8 GHz~12 GHz)ラジオメータを製作し、その特性を測定、評価した⁹⁾。この結果、本ラジオメータは雑音測定に充分使用可能であることが確認された。

また、相関型ラジオメータは、一般的なラジオメータの入力端に存在するアイソレータ等によって入力帯域幅が制限されることを解決するため、入力部に広帯域特性を持つ0°/90°ハイブリッド結合器を使用して広帯域化を可能にした。また、相関型にすることにより入力雑音信号と参照雑音信号の差を測定することにより安定化を図った。Fig.3に示す相関型ラジオメータのプロトタイプを製作し、6~12 GHz帯で良好な特性が得られることを確認した¹⁰⁾。さらに、この相関型ラジオメータを零位方式にするための、電子制御可能な広帯域可変減衰器を開発した¹¹⁾。

標準雑音源として、広帯域で使用可能な液体窒素冷却同軸雑音源の試作を行うとともに、この雑音源の値付けするための等価線路法による評価法を考案した。また、安定化した室温標準雑音源も開発している。

インピーダンス量標準に関しても、広帯域な標準の要求に応えるため、同軸系や導波管系について、測定回路・素子の調整機能の自動制御などによる広帯域かつ高精度な測定方法の研究、開発を行っている。

磁界測定に関しては、300 kHz~30 MHz帯で3アンテナ法によるループ・アンテナ校正のための研究を行っている。10 cm径ループ・アンテナのアンテナ間の伝搬

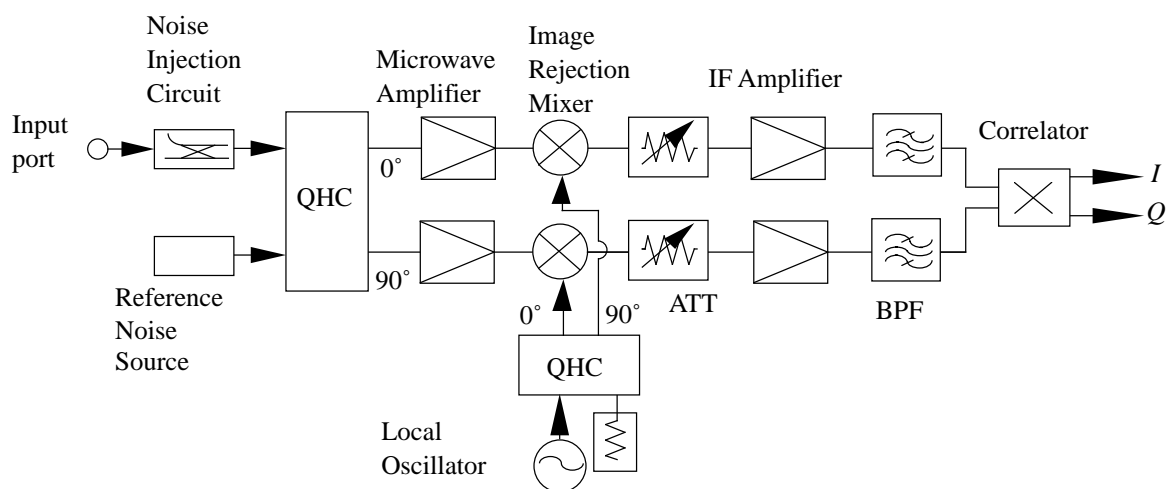


Fig.3 Circuit configuration of the correlation radiometer

損について、集中定数回路近似などによる理論値と実験値の比較検討を行った¹²⁾。アンテナ間距離20～40 cm、周波数1～30 MHzの場合は、集中定数回路近似が有効であることが分かり、測定系の設計に有効な手段が得られた。

可視・近赤外レーザー/光ファイバパワーのトレーサビリティの精度向上のため、ビーム・ファイバコンパクトカロリメータ¹³⁾を開発した。測定の原理は、等温制御方式のカロリメータであり、ツイン型として外乱に対する安定性を向上し、さらに前面でビーム用と光ファイバコネクタ用の2種のアダプタを交換することにより両者のパワーを同じ不確かさで測定することが可能となった。受光器を低反射のNiP合金(全反射率0.07%)で作成し、レーザーとDCパワーの等価性を1に極めて近く設計、製作し、等価性の違いは、時定数を精密に測定することにより評価した。総合的に不確かさの評価を行った結果、10 mWレベルで拡張不確かさ(信頼率95%)として0.05%が得られ、従来の6倍の高精度化が達成された。

3. 成果と効果

高周波計測技術と標準及びトレーサビリティは、直接的には、計測器メーカー等の計測技術の向上と各種の高周波計測器の性能向上に結びつくことにより各種の高周波利用技術と機器の高度化に寄与する。一方2.に述べたように産業、貿易のグローバル化に伴う基準認証の推進により、校正、試験の各国相互の受入れ体制が整えば、本研究の成果は、標準の確立とトレーサビリティの拡充を通して、わが国の貿易、産業競争力に大きく寄与すると考えられる。また、国際比較への参加は、この分野において国際的地位の向上と貢献が期待できる。

わが国の高周波・マイクロ波利用技術及びレーザー・光ファイバ関連技術は、世界でも最先端のレベルにあり、通信、情報処理、各種の電子機器、電子計測器、診断医療など非常に幅広い分野にわたっている。これらの技術の今後の発展には、高周波・マイクロ波の基本計測技術がその共通の基盤として必須である。また、関連する規格により代表されるいわゆる標準化が、各分野において精力的に進められている。すなわち、IEC、ISO、JIS等の規格化において多くの関連製品、技術の

試験、測定方法が制定されているが、これらは、標準とトレーサビリティが前提となっている。これらに対する技術基盤として大いに寄与できる。

具体的な例として、精密測定技術の研究の成果として、当所のマイクロ波電力標準に関する研究で得られた標準ボロメータマウントは、PTB(ドイツ)の新しいマイクロ波広帯域電力標準の開発に取り入れられ、これを用いて26 GHz帯の国際比較が提案された。また、当所の高周波電力標準に用いているカロリメータの等温制御方式は、NIST(アメリカ)及びLCIE(フランス)の各標準研究所でも採用されつつある。国内では、当所が技術指導により横河電機とともに開発したレーザーパワー標準装置が製品化され、JCSS指定校正機関であるJQA(日本品質保証機構)をはじめ企業内標準として用いられている。

4. 今後の研究展開の方向

2001年4月に、組織が再編され、標準分野は、一つのNMIとして統合される。今後は、研究開発のミッションがより明確になり、その課題として標準の研究・開発・維持・供給がある。このうち、研究の目標は、初めに述べたような技術の発展に対応して、より広帯域、高精度の精密計測技術に基づく標準の開発と、国際整合性と有用なトレーサビリティ拡充に必須となる校正システムと校正技術の開発である。また、その成果の一つとして国際比較への参加は、技術レベルの確認と国際的な寄与として重要である。また、品質システムへの適合は、国際整合性のとれたトレーサビリティを築く上で必要である。これらを整えてMRAの校正能力リスト(Appendix C)へ登録することが求められている。これらの条件のもとで貿易の基準認証が進められる。今日、国際的にそのルールを確立しようとしており、新組織は、その技術基盤を担うこととなっている。

具体的な研究の展開として、特に、広帯域、高精度化の観点から次のような標準の研究と開発を行う予定であり、国際比較、トレーサビリティの実現を目指す。電力は、110 GHzまでの各種の同軸、導波管系の広帯域標準の研究、開発を行う。減衰量、インピーダンス、位相を含むSパラメータに関し、ANA(自動ネットワークアナライザ)やレベルメータ等の自動測定器の校正・試験が可能な広帯域標準を研究、開発する予定であ

る。高周波雑音について、40 GHz, 12000 Kまでの同軸系及び導波管系の雑音標準の研究、開発を行う。RF計測器のトレーサビリティ技術向上のため、仲介器、校正、研修、訓練等に必要な技術のハード・ソフトの開発を進める。レーザ関連では、CO₂レーザの100 Wレベルハイパワー標準及び近年必要性の高いレーザビームプロファイルの精密計測技術の研究、開発を推進する予定である。

参考文献

- 1) T.Inoue: "Broadband RF power standard for 7 mm coaxial waveguide in the frequency range of 10 MHz-18 GHz-Design and fabrication-", Bulletin of the Electrotechnical Laboratory, Vol. 64, No.1, pp.3-10, January 2000
- 2) T.Inoue: "Broadband RF power standard for 7 mm coaxial waveguide in the frequency range of 10 MHz-18 GHz -Evaluation of uncertainty-", Bulletin of the Electrotechnical Laboratory, Vol. 64, No.1, pp.11-17, January 2000
- 3) T.Inoue: "Evaluation of uncertainty due to excess heating by an adiabatic line in calorimetric measurement of RF power", CPEM 2000 Sydney, Conference Digest, MO3C-3, pp.164-165, May 2000
- 4) Y.Okano and T.Inoue: "Automatic microcalorimeter system for broad band power measurement in 75-110 GHz", CPEM 2000 Sydney, Conference Digest, THP9-10, pp.652-653, May 2000
- 5) A. Widarta, 川上: 「マイクロ波減衰量標準-1 kHz中間周波置換法の検討」電子技術総合研究所彙報 Vol.64, No.1, pp.23-30, 2000.1
- 6) R.Singh and T.Kawakami: "A broadband attenuation measurement system in the frequency range from 4 GHz to 40 GHz", Bulletin of the ETL, Vol.64, No.1, pp.19-22, 2000.1
- 7) 岡野, 川上: 「ヘテロダイン検波を利用した高周波測定回路における高調波成分の影響に関する検討」電子技術総合研究所彙報 Vol.64, No. 1, pp. 33-39, 2000.1
- 8) R. Singh and T. Kawakami: "New fiber-optic attenuator calibration technique using linear intensity modulation characteristics of a laser diode", RSI, Vol.70, No.7, pp. 2910-2911, 1999.7
- 9) 中野, 井上, 加藤: 「マイクロ波雑音測定用トータルパワー型ラジオメータ」, 電気学会論文誌C, Vol. 120-C, No. 11 2000.11

- 10) H. Nakano and Y. Kato: "A Broadband Microwave Radiometer Using Correlation Technique", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 48, No. 2, pp. 631-633, 1999.4
- 11) H. Nakano and Y. Kato: "Electrically controlled broadband microwave attenuator with p-i-n diode switches", Rev. Sci. Instrum., Vol. 70, No. 6, pp. 2864-2865, 1999.6
- 12) 古屋, 川上, 矢島: 「磁界強度標準のための送受信ループアンテナ間挿入損についての集中定数回路モデルによる検討」電子技術総合研究所彙報 Vol. 64, No. 1, pp. 69-78, 2000.1
- 13) 宮脇, 井上: 「NiP吸収体による光パワー測定用カロリメータの高精度化」電気学会計測研究会IM-0022, 2000.6

関連ラボ

RF計測ラボ
(RF Measurement Lab.)

研究項目及び研究期間

高周波計測標準の高度化に関する研究
(平成12年度～17年度)
マイクロ波・ミリ波電力のトレーサビリティ範囲の拡大
(平成8年度～12年度)
高周波電力・レーザパワー校正
(平成6年度～)
拡大領域における光子線標準の設定に関する研究
(平成11年度～16年度)

当該研究担当者等

ラボ構成員(総数7名)
職員(6名) 井上武海*, 川上友暉(光技術部), 中野 洋
(大阪LERC), 古屋克己, 岡野好伸, アントン・ウイ
ダルタ(光技術部)
職員以外(1名) 加藤吉彦(菊水電子工業 客員研究員)
*ラボリーダー