

端末アレーアンテナ評価用光モジュールの開発

Development of Optical Module for Evaluation of Handset Array Antennas

天 利 悟
Satoru Amari

山 本 温
Atsushi Yamamoto

岩 井 浩
Hiroshi Iwai

小 川 晃 一
Koichi Ogawa

要 旨

端末アレーアンテナの性能を評価する上で、放射指向性における位相の測定が重要である。この位相を含めた複素指向性を精度よく測定することを目的に、電磁的影響の少ない光ファイバを用いた光測定系が開発されている。光測定系を端末アレーアンテナの評価で使用可能とするために、筆者らは小型PD (Photo Diode) モジュール (22 mm × 22 mm × 7 mm) の開発を行った。開発したPDモジュールは、周波数帯域470 MHz ~ 2700 MHzにおいて、小型電池による連続駆動時間：2時間41分、振幅の変動：±0.1 dB未満、位相の変動：±1°未満、 $VSWR$ (Voltage Standing Wave Ratio)：1.1以下を得た。次に、光測定系を用いて2素子端末モデルの放射測定を行った。その結果、従来の測定系より振幅：2.4 dB、位相差：74°精度が向上した。最後に、端末アレーアンテナの評価に光測定系を適用した場合の一例として、MMSE (Minimum Mean Square Error) アダプティブアレーの干渉波抑圧効果を算出し、モーメント法による結果との一致を確認したので報告する。

Abstract

This paper presents a small Photo Diode (PD) module for an antenna radiation pattern measurement system using an optical fiber. The PD module (driven by a voltaic cell) with dimensions of 22 mm × 22 mm × 7 mm was developed successfully. This module provides a Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) of better than 1.1 over the frequency range of 470 MHz to 2.7 GHz, satisfying broadband impedance characteristics from digital television broadcasting to 3rd-generation cellular radio. Moreover, the module features time stability, providing an amplitude variation in the output signal of less than 0.1 dB and a phase variation of only 1 degree in more than 2.5 hours. We measured the complex radiation patterns of a handset adaptive array using the PD module. It was found from the experiment that the adaptive array interference reduction characteristics using the measured data are in good agreement with those calculated by the moment method. As a result, the effectiveness of this module was confirmed for handset array antennas.

1. はじめに

3GPP-LTE (3rd Generation Partnership Project Long Term Evolution) やモバイルWiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) では、100 Mbpsの通信速度が求められている。この要求を達成するために、アダプティブアレーやMIMO (Multiple-Input Multiple-Output) アンテナの開発が進められている。これらのシステムは、従来と異なり複数のアンテナが同時動作する。このようなアレーアンテナの評価には、振幅特性に加えてアンテナ間の位相差を精度よく測定すること (複素指向性測定) が不可欠である。

これまでの複素指向性測定は、アンテナに同軸ケーブルを接続しネットワークアナライザを用いて振幅と位相特性を測定する方法 (以下、同軸測定系と記す) が用いられてきた。同軸ケーブルは、高周波で用いられる一般的な伝送線路であって内導体を誘電体で包み、その上を外導体で覆った多重構造のケーブルである。同軸ケーブルは、小型アンテナの評価では漏れ電流が外導体に流れるために外導体が二次放射源となる。さらに、外導体が散乱体にもなることから小型アンテナの放射特性に大きく影響を及ぼす。

一方、放射特性を高精度に測定する方法として電池駆動の小型発振器を用いた測定法がある¹⁾。しかしながら、位相特性を測定するには小型発振器と受信機間の同期をとる必要があり困難が伴う。また、小型発振器の帯域は数十MHzであって、複数の無線システムに対応した広帯域アンテナの測定の際には、複数の小型発振器を付け替えての測定が必要である。近年、携帯端末に搭載される無線システムが増加しており、端末アンテナの評価に多大な時間を要している。

そこで、電磁的影響の少ない光ファイバケーブルを用いたアンテナ測定法 (以下、光測定系と記す) が提案されている^{2,3)}。光測定系は、主に以下の特長を有し、複素指向性を測定するのに適している。

- (1) 光ケーブルは非金属製のため漏洩電流の影響を受けない。
- (2) 光ケーブルによる電波の散乱が小さい。
- (3) 数GHzの広帯域特性を有するため、広帯域アンテナの測定の際にPDモジュールの付け替えが不要である。

文献2) は、アンテナの評価に光ファイバを導入することを提案している。しかし、外部変調器を使った測定システムであり、非常に高価であるとともに小型化が困難

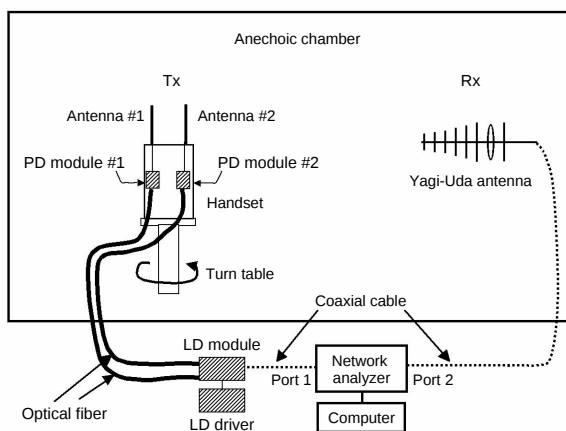
である。また、文献3)では、携帯端末の金属筐体(きょうたい)内に光モジュールを内蔵する構成である。実際の端末評価では、モジュールを外部に接続する必要がある。そのため、光モジュールの小型化が急務であった。

本稿では、まず開発した小型PDモジュールの特性を示す。次に、1/4波長モノポールアンテナと板状逆Fアンテナ(PIFA: Planar Inverted F Antenna)を搭載した2素子端末モデルの複素指向性測定を行い、同軸測定系との精度比較をする。最後に、端末アレーアンテナの評価に光測定系を適用した場合の一例として、MMSEアダプティブアレーアンテナの干渉波抑圧効果を算出したので報告する。

2. 光測定系

2.1 測定系

本稿における光測定系の構成を、第1図に示す。光ファイバケーブルを被測定アンテナ側のみに用いた。図中の実線は光ファイバケーブルを表し、点線は同軸ケーブルを表している。ネットワークアナライザのPort 1から出力された高周波信号を、LD (Laser Diode) モジュールを用いて光信号に変換し、光ファイバケーブルを介してPDモジュールまで光信号を伝達する。上記PDモジュールで光信号を高周波信号に戻した後、その出力をアンテナに入力する。アンテナから放射された電波は受信用の指向性アンテナにて受信され、ネットワークアナライザのPort 2に入力される。ネットワークアナライザの通過特性より、複素指向性の測定を行う。なお、LDモジュールは、モニタリング用のPDとクーラーおよびサーミスタを備えることで光信号出力を安定させた。



第1図 光測定系の構成

Fig. 1 Optical measurement system.

2.2 PDモジュールに求められるスペック

端末アンテナの評価を行う上でPDモジュールに求められる必要条件を、以下に示す。

- (1) 携帯端末に搭載される無線システムに対応した470 MHz ~ 2500 MHz (Digital TV ~ Bluetooth, Wireless Local Area Network) の広帯域特性
- (2) 端末アンテナを測定する上で必要とされる連続駆動時間(2時間以上)および測定精度(時間変動が振幅: ± 0.1 dB以下, 位相: $\pm 2^\circ$ 以下)
- (3) PDモジュールは、被測定アンテナに直接接続されるため、PDモジュールの金属筐体が大い被測定アンテナと電磁的に結合し、アンテナ特性に大きく影響を与える。そのため、金属筐体の小型化(アンテナは1/4波長で共振して電波を効率よく放射するため、金属筐体は1/4波長未満を目標値とした)

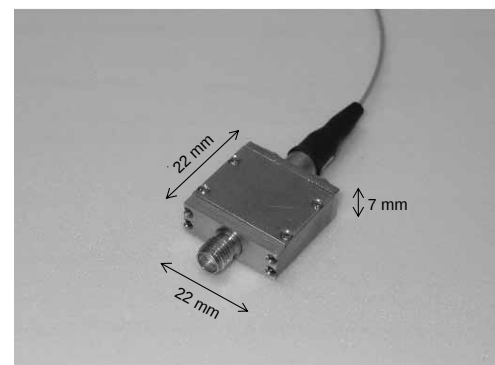
2.3 開発したモジュールの性能

開発した小型PDモジュールの外観を、第2図に示す。PDの駆動部(駆動回路、整合回路および電池)は22 mm $\times$ 22 mm $\times$ 7 mmの金属筐体内に内蔵している。そのため、端末アンテナと駆動部の間には非常に高いアイソレーションが実現できている。

開発したPDモジュールおよびLDモジュールを直接接続した状態での変換利得の周波数特性(S_{21})を、第3図に示す。

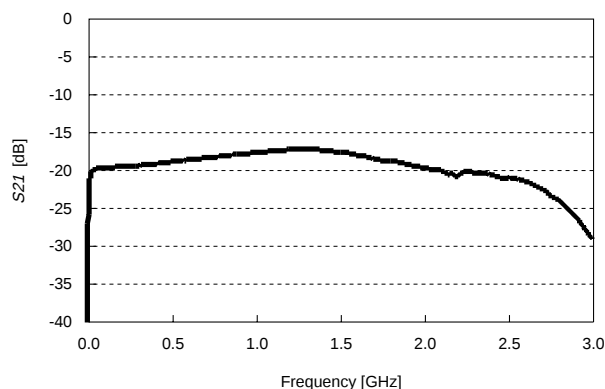
第3図より、10 MHz ~ 2700 MHzにおいて変換利得が -20 ± 2 dBのフラットな周波数特性が得られていることがわかる。PDモジュールにはアッテネータが内蔵されており、上記、周波数帯において V_{SWR} は1.1以下となっている。

2 GHzにおいて内蔵電池で連続駆動した場合の S_{21} の時間特性(振幅と位相特性)を、第4図に示す。第4図より、内蔵電池による連続駆動時間は9665 s(約2時間半)で、



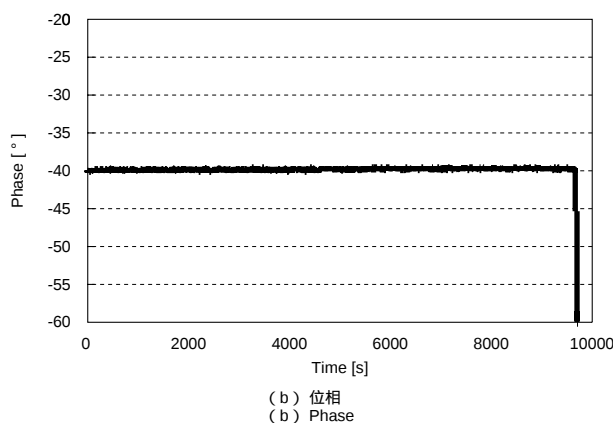
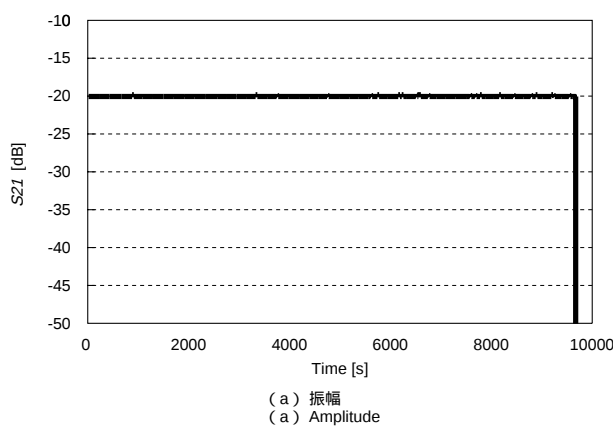
第2図 小型PDモジュールの外観

Fig. 2 Developed small PD module.



第3図 小型PDモジュールの周波数特性

Fig. 3 Frequency characteristics of optical module.



第4図 小型PDモジュールの時間特性

Fig. 4 Time characteristics.

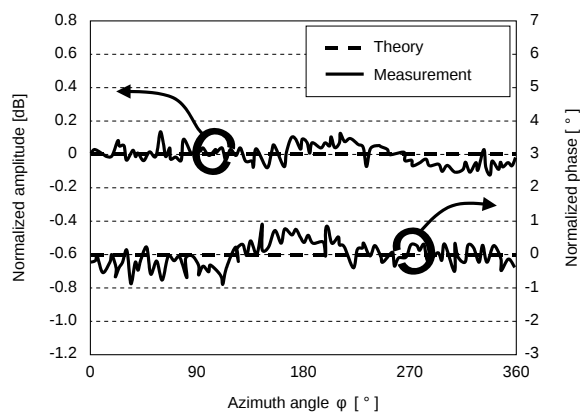
振幅変動： ± 0.1 dB未満，位相変動： $\pm 1^\circ$ 未満である。また，駆動開始から9665 sで S_{21} の低下が始まり5 s後には30 dB以上のレベル低下が生じた（位相も同様に 20° 以上変化）。これより，2時間半以上に渡り，安定した複素指向性の測定を行うことが可能であることがわかる。

2.4 ダイポールアンテナの複素指向性測定

次に，開発したPDモジュールを用いて電波暗室にて放射測定を行った。測定系を，第1図に示す。ここでは被測定アンテナとして，水平面において無指向性を有する1/2波長ダイポールアンテナを用いた。垂直偏波成分の振幅および位相特性の測定結果を，第5図に示す。周波数は2 GHzである。

測定は被測定アンテナを回転させて行い，第5図の横軸は回転角 φ である。第5図には，理論値も共に示している。測定値は振幅，位相共に平均値で規格化している。

第5図より，振幅特性は理論値との差が ± 0.2 dB以内で，位相特性は理論値との差が $\pm 1^\circ$ 以内であり高い精度が得られていることがわかる。以上の結果より，開発したPDモジュールは安定した放射指向性の測定が可能である。



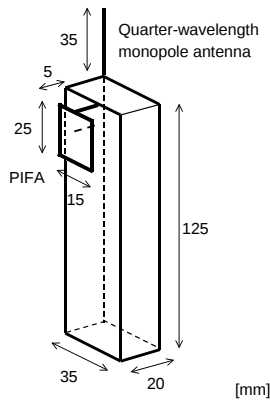
第5図 1/2波長ダイポールアンテナの複素指向性

Fig. 5 Complex radiation pattern of half-wavelength dipole antenna.

3. 端末アレーアンテナの評価

3.1 端末モデル

本章で用いる2 GHz帯端末モデルを，第6図に示す。第6図に示すように金属性の筐体（125 mm×35 mm×20 mm）上に1/4波長モノポールアンテナ（長さ：35 mm）とPIFA（25 mm×15 mm）を約1/4波長離隔して配置した端末アダプティブアンテナを用いた。この端末モデルを鉛直方向から 60° 傾けた状態の通話姿勢とし，回転角方向を φ とした。

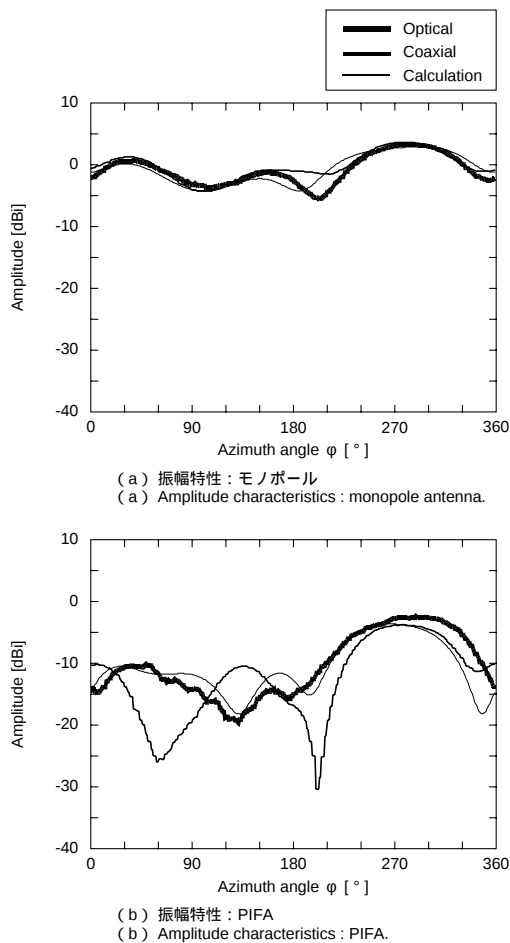


第6図 端末モデル

Fig. 6 Handset adaptive array antenna.

3.2 端末モデルの複素指向性

第7図に、各アンテナの水平面内指向性における垂直偏波成分の振幅特性を示す。測定周波数は2 GHzである。また、アレーアンテナの評価を行う上で、アンテナ間の



第7図 端末モデルの振幅特性

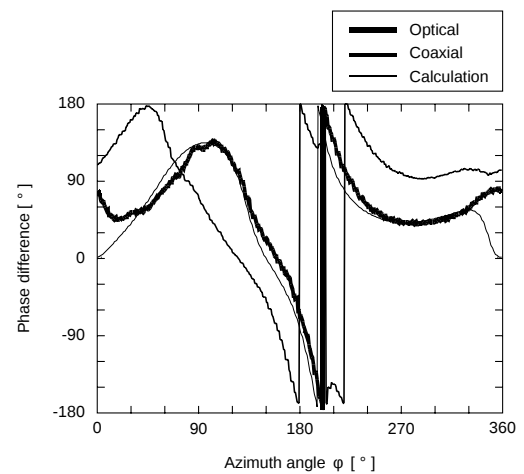
Fig. 7 Amplitude patterns of handset.

位相差が重要である。第8図に、モノポールアンテナとPIFAの位相差特性を示す。比較のためにモーメント法による計算値と同軸測定系の測定結果を併せて示す。図中のOpticalは光測定系、Coaxialは同軸測定系による測定系結果である。ここで、同軸測定系の場合、放射ノイズ対策としてフェライトコアを同軸ケーブルに接続した。第1表に、測定と計算における振幅および位相差の方位角ごとの差分（絶対値）の平均値 $|\Delta\alpha|$ 、 $|\Delta\phi|$ を示す。

まず、第7図、第8図より光測定系は計算に対して各アンテナの振幅および位相差のパターン形状が計算と概ね一致していることがわかる。また、第1表より、 $|\Delta\alpha|$ は2.0 dB以下、 $|\Delta\phi|$ は16.3°である。

これに対して、第7図より、同軸測定系ではPIFAの振幅特性が計算値と大きく異なっている。一方、第8図より、位相差はすべての角度で大きく異なる結果となっている。さらに、第1表から $|\Delta\alpha|$ が4.4 dB以下、 $|\Delta\phi|$ が90.1°と光測定系と比較して計算との差が大きいことがわかる。

以上の結果より、光測定系は同軸測定系と比較して、端末アレーアンテナの複素指向性測定を精度よく行えることがわかる。



第8図 端末モデルの位相差特性

Fig. 8 Phase patterns of handset.

第1表 各測定系と計算の複素指向性比較

Table 1 Comparison of measured data in each system.

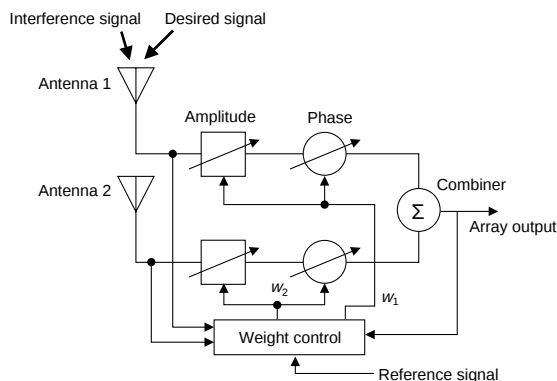
system	$ \Delta\alpha $ [dB]		$ \Delta\phi $ [°]
	Monopole	PIFA	
Optical	0.9	2.0	16.3
Coaxial	0.9	4.4	90.1

4. アダプティブアレーアンテナの干渉波抑圧効果の計算

本章では、端末アレーアンテナの評価に光測定系を適用した場合の一例として、3章の複素指向性の測定結果を用いてアダプティブアレーアンテナの干渉波抑圧効果の計算を行った⁴⁾。第9図に、アダプティブアレーアンテナの構成を示す。アダプティブアレーアンテナとは、さまざまな電波が飛び交う環境の中で干渉となる電波を抑圧し、所望となる電波のみの受信を可能とする。一例として、第9図に示す2つのアンテナで構成されるアダプティブアレーアンテナの動作原理を説明する。両アンテナで受信された信号に、振幅と位相の重みづけ (w_1, w_2) を行った後に合成する。この重みづけ量を変えることで、受信できる電波の方向を制御する。重みづけの最適化アルゴリズムとしては、MMSEを採用した⁵⁾。

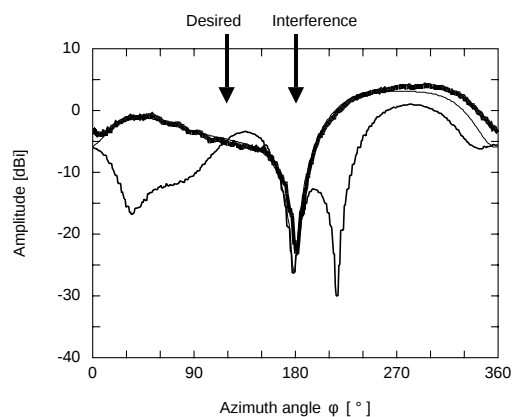
本章での計算諸元は、入力SNR (Signal to Noise Ratio) =20 dB, 入力SIR (Signal to Interference Ratio) =0 dBとし、水平面において所望波と干渉波が $\phi=120^\circ$ および $\phi=180^\circ$ から1波ずつ到来したときのMMSE制御後の指向性を、第10図に示す。ここで、入力電力は無指向性アンテナを受信アンテナとして用いたときの受信電力と定義する⁶⁾。また、第2表に、測定値と計算結果に基づいて算出されたMMSE後の振幅の方位角ごとの差分(絶対値)の平均値 $|\Delta MMSE|$ を示す。

第9図より、同軸測定系を用いた場合のMMSE制御後の指向性は、干渉波方向にヌルの形成がみられるものの、その他の角度においては計算と大きく異なる分布となっている。これに対して、光測定系を用いた場合のMMSE制御後の指向性は、干渉波方向にヌルの形成がみられ、他の角度も計算と一致していることがわかる。また、第2表より $|\Delta MMSE|$ も0.6 dBである。以上より、開発した小型PDモジュールを用いて高精度に端末アレーアンテナの評価が可能であることがわかる。



第9図 MMSEアダプティブアレーアンテナの構成図

Fig. 9 Structure of MMSE adaptive array.



第10図 MMSE後の振幅特性

Fig. 10 Amplitude characteristics of adaptive array.

第2表 各測定系と計算におけるMMSE制御後の振幅比較

Table 2 Comparison of controlled data in each system.

	光測定系	同軸測定系
$ \Delta MMSE $ [dB]	0.6	6.0

5. まとめ

本稿では、光測定系を端末アンテナの評価での使用を可能とする小型PDモジュール (22 mm × 22 mm × 7 mm) を開発した。小型PDモジュールは、周波数帯域470 MHz ~ 2700 MHzにおいて、小型電池による連続駆動時間: 2時間半以上、振幅変動: ± 0.1 dB未満、位相変動: ± 1 dB未満、VSWR: 1.1以下を得た。また、端末アレーアンテナの評価に光測定系を適用した場合の一例として、MMSEアダプティブアレーの干渉波抑圧効果を算出し、モーメント法による結果との一致を確認した。以上より、本方式を用いた複素指向性の測定結果は、端末アレーアンテナの評価に大いに期待ができる。

参考文献

- 1) 小川晃一 他: 人体頭部に近接したダイポールアンテナの多重波中実効利得特性に与える肩の影響に関する基礎検討 信学論 (B) J82-B, No.10, pp.1847-1856(1999).
- 2) M. L. VanBlaricum: Photonic systems for antenna applications. IEEE Antennas Propag. Mag. 36, No.5, pp.30-38(1994).
- 3) 深沢徹 他: 小形無線端末用のアンテナ測定における高精度測定法 信学論 (B) J86-B, No.9, pp.1895-1905(2003.9).
- 4) Satoru Amari, et al.: Complex radiation pattern measurement using an optical-fiber cable applicable to a handset adaptive array. Proceedings of ISAP2007, Niigata, Japan, 1B4-4.
- 5) 菊間信良: アレーアンテナによる適応信号処理 (科学技術出版) pp.13-66(1998).

- 6) Koichi Ogawa, et al. : Multipath performance of handset adaptive array antennas in the vicinity of a human operator. IEEE Trans. Antennas Propag. Mag. AP-53, No.8, pp.2422-2436(2005.8).

著者紹介



天利 悟 Satoru Amari
ネットワーク開発センター
Network Development Center



山本 温 Atsushi Yamamoto
ネットワーク開発センター
Network Development Center



岩井 浩 Hiroshi Iwai
パナソニックエレクトロニックデバイス（株）開発技術センター
Corporate Components Development Center,
Panasonic Electronic Devices Co., Ltd.



小川晃一 Koichi Ogawa
ネットワーク開発センター
Network Development Center
工学博士