

5Gモバイルフロントホールおよびバックホールの測定に対応したMU100011A 100G モジュールの開発

伊藤智宏 Tomohiro Ito, 古木 敦 Atsushi Furuki, 佐伯北斗 Hokuto Saeki, 露木明宜 Akinobu Tsuyuki

[要旨]

5G モバイルフロントホール通信では、要求案件である eMBB(超高速大容量:enhanced Mobile Broad-Band)を低コストで実現するため、eCPRI(Common Public Radio Interface), RoE(Radio over Ethernet)の採用が見込まれている。また 5G モバイルネットワークにおいて、基地局間の時刻同期精度の向上が課題に挙げられている。これら新たな市場要求にいち早く取り組むため、MT1000A 用 100G モジュールとして MU100011A を新規開発した。さらに、eCPRI/RoE の測定機能の追加と、遅延測定および時刻同期測定機能の向上を行った。

1 はじめに

第 5 世代移動通信システム(5G)ネットワークは、これまでの進化の延長である「高速・大容量(eMBB: enhanced Mobile Broad-Band)」に加え、新たなネットワーク要件として「高信頼・低遅延(URLLC: Ultra-Reliable and Low Latency Communications)」を挙げている。さらにもう 1 つの要件である「多数同時接続(mMTC: massive Machine Type Communications)」と合わせ、5G の導入は 4K 映像配信、センサービジネスに代表される IoT の活用、自動運転などのサービス基盤になると期待されている^{1) 2)}。

eMBB を実現するため、モバイルフロントホール(MFH)では、4G までの主流だった CPRI(Common Public Radio Interface)から、eCPRI あるいは RoE(Radio over Ethernet)への置換が検討されている。eCPRI や RoE は、市場に多く流通している 10GbE(Gigabit Ethernet)や 25GbE などの高速イーサネットインターフェースを活用した通信方式である。モバイルフロントホール(MFH)の大容量化に伴い、それらを集約するモバイルバックホール(MBH)では、100GbE の採用増加により高速化が予想される。これら高速大容量化の一方、URLCC は、自動運転などの新たなニーズに対して優れた信頼性と応答時間提供するため、1 ms の低遅延を求めていている。

モバイルネットワークの高速化や低遅延化の要求に対し、ネットワーク通信品質を評価する測定器には、高速化、高機能化、高性能化に加え、敷設現場での使用を想定して小型・軽量化が求められている。我々は、MT1000A ネットワークマスタプロシリーズを 5G MFH および MBH の評価に対応させるため、以下を行った。

- (1) 25GbE および 100GbE に対応した小型・軽量の MU100011A モジュールの開発
- (2) eCPRI および RoE のフレーム生成および解析機能の追加

(3) 遅延測定の機能強化および時刻同期精度向上

2 章では、MFH 規格動向を記載する。3 章では、(1) の MU100011A のハードウェア設計の要点を説明する。4 章では(2) のフレーム生成機能、5 章では(3) の機能改善について記載する。

2 5G モバイルフロントホールネットワーク規格動向

MFH の要求伝送帯域および許容遅延は、集約ノード CU(Central Unit)と分散ノード DU(Distributed Unit)の機能分担によって異なる。RF(Radio Frequency)側に近いほど要求伝送帯域が高く、許容遅延条件は厳しくなる。CU-DU 間の機能分割点(functional split)が MAC(Media access Control) レイヤ・PHY(Physical)レイヤ間(図 1 中 Option 6)より下位(RF 側)の場合、要求伝送帯域は 10 Gbit/s を超える。例えば、既存の MFH インタフェースである CPRI と同様に Option 8 で分割する場合、160 Gbit/s 程度の帯域が求められる¹⁾。

このように現在の技術延長で MFH を構築した場合、必要帯域が大幅増加となる。所要伝送帯域を低減するため、モバイル基地局間の無線ヘッドとベースバンド処理ユニットの機能分離が見直されている¹⁾。また新たな MFH インタフェースとして、広帯域で安価なイーサネットベースの eCPRI と RoE が、CPRI および IEEE1914 ワーキンググループにおいて標準化されている。

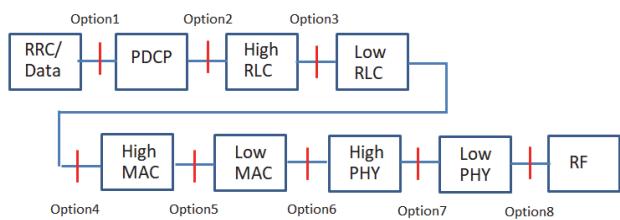
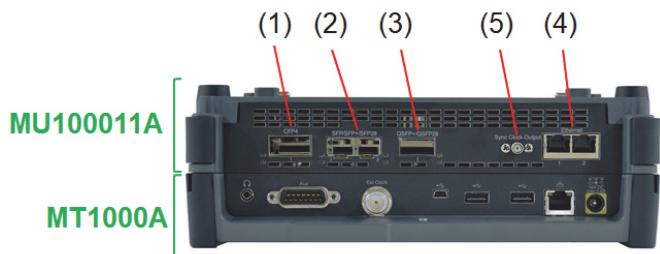


図 1 CU-DU 間の機能分担³⁾

3 MU100011A 100G Multirate Module

3.1 MU100011A 概要

図2にMU100011Aを搭載したMT1000Aの外観を示す。MU100011Aは、100 Gbit/sまでのマルチインターフェースをもちながら、小型・軽量も実現した。インターフェースは、CFP4、QSFP28、SFP28規格に準拠した各種トランシーバ用の電気インターフェースとRJ45インターフェースを持ち、100GbE/40GbE/25GbE/10GbE/1GbE/1000MbE/100MbE/10MbEなどのイーサネットやOTN(Optical Transport Network)、Fibre channel、CPRIなどのトランスポートネットワークで使用されているプロトコル試験に対応している。測定用インターフェース以外にもSync Clock Output端子を設けている。本端子を外部の光波形観測用サンプリングオシロスコープのトリガ信号に用いることで、各種インターフェースに接続された光トランシーバから出力される光波形を観測できる。



(1) CFP4, (2) SFP28, (3) QSFP28, (4) RJ45, (5) Sync Clock Output

図2 MU100011Aを搭載したMT1000Aの外観(上面)

3.2 25 Gbit/s 電気インターフェース設計

CFP4、QSFP28、SFP28用電気インターフェースは、各レーンごとに25 Gbit/sの伝送速度をもつ。図3にMU100011Aの25 Gbit/s電気インターフェース回路のブロック図を示す。25 Gbit/s電気インターフェースの電気的および機械的仕様はそれぞれの光モジュール規格のMSA(Multi Source Agreement)やSFF(Small Form Factor)で規定されており、主にOIF(Optical Internetworking Forum)CEI-28G-VSRに準拠することが求められている。

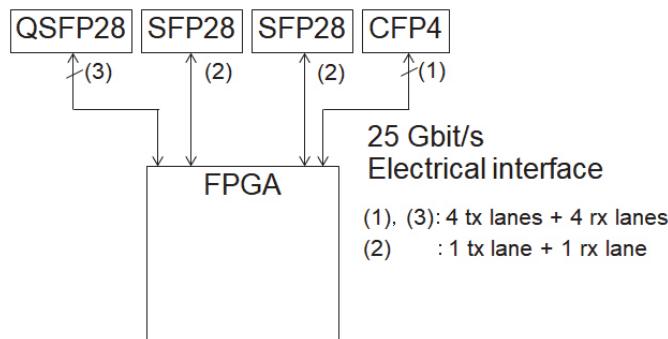


図3 25 Gbit/s 電気インターフェース回路ブロック図

3.3 部品レイアウトと放熱・空冷

小型の測定器であるため、内蔵されるプリント基板は部品実装面積が限られている。25 Gbit/sの高速電気信号は、高速伝送用の基板材であっても配線の引き回しが冗長になれば波形劣化が顕著に表れる。部品レイアウトの自由度が低い中で高速電気信号の品質確保が課題であった。波形劣化を最小化するため、以下に留意してプリント基板設計を行った。設計には3次元電磁界解析ツールを活用した。

- ・配線の最短化
- ・不要な内層配線の回避
- ・不要なビアとビアスタブの排除

図4に設計したFPGAからCFP4コネクタへのプリント基板配線パターン、図5に配線部の3次元解析結果(Sパラメータ)を示す。25.78125 Gbit/s NRZ(Non-return-to-zero)信号のビットレートの半分の基本周波数の約13 GHzにおいて、3 dB以下の挿入損失と18 dB以上の反射損失が得られている。

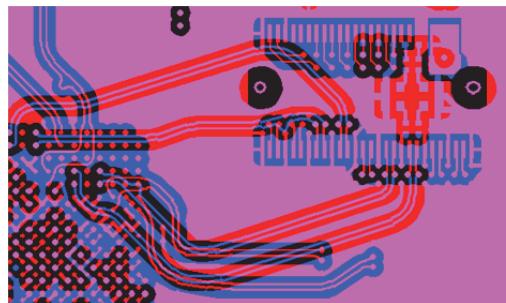


図4 CFP4コネクタへのプリント基板配線パターン

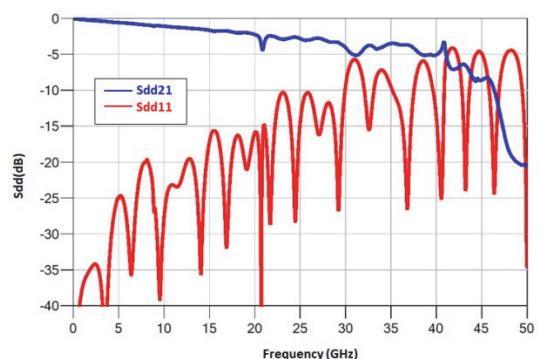


図5 3次元解析結果 Sパラメータ(差動信号)

CFP4やQSFP28などの光モジュールやFPGAの放熱・空冷方法も課題であった。小型・軽量化ため、大きなファンを用いた空冷や銅板を用いた放熱は採用できなかった。そのため以下の指針で放熱・空冷設計を行った。

- ・ケース一体型導風板
- ・熱抵抗が小さく軽量なヒートシンク

- ・ハンディを意識した吸気口と排気口の配置
- ・小型かつ風量の大きいファンの採用

図 6 に熱シミュレーションモデルによる解析結果を示す。この結果、MU100011A の使用上限温度においても、FPGA および光モジュールの発熱による温度上昇を抑えることを検証した。

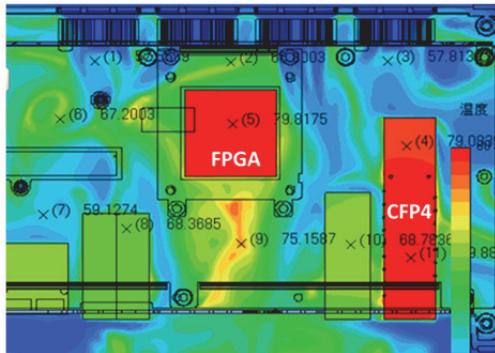


図 6 热シミュレーション結果の一例

4 eCPRI/RoE 測定機能

4.1 eCPRI/RoE のフレーム構造

図 7 に eCPRI/RoE のフレーム構造を示す^{4), 5)}。eCPRI/RoE フレームは、イーサネットヘッダ、eCPRI/RoE ヘッダ、ペイロードで構成される。eCPRI/RoE ヘッダは、共通ヘッダと固有ヘッダで構成され、ペイロードには、IQ(In-phase and Quadrature)データ等が格納される。

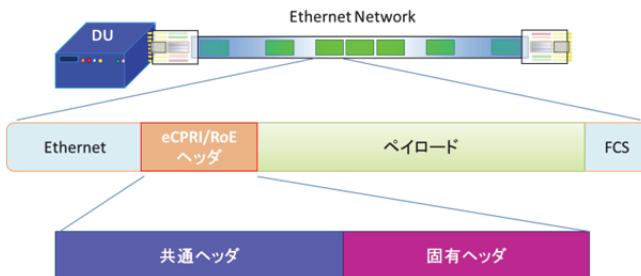


図 7 eCPRI/RoE のフレーム構造

4.2 eCPRI/RoE フレーム送信

eCPRI/RoE に対応したネットワークおよび装置を試験するには、試験用フレームを作成・送信できる測定器が必要となる。MT1000A は、eCPRI/RoE フレームを任意のヘッダを作成・送信する。eCPRI では共通ヘッダで指定した Message Type に基づいて、固有ヘッダの構造が切り替わる。一方、RoE では Sub Type に基づいて、固有ヘッダの構造が切り替わる。表 1 に対応する Message Type、表 2 に対応する Sub Type を示す。

表 1 Message Type 一覧

Message Type
IQ Data
Bit Sequence
Real-Time Control Data
Generic Data Transfer
Remote Memory Access
One-way Delay Measurement
Remote Reset
Event Indication

表 2 Sub Type 一覧

Sub Type
RoE Control sub type
RoE Structure-agnostic data sub type
RoE Structure-aware CPRI data sub type
RoE Slow C&M CPRI sub type
RoE Native time domain data sub type
RoE Native frequency domain data sub type
RoE Native PARCH data sub type
RoE Control sub type

4.3 画面設定

図 8 に eCPRI の設定画面を示す。共通ヘッダ、固有ヘッダ、ペイロードの設定がタブごとに分割表示される。図 8 の左側の画面は、共通ヘッダタブが選択された状態であり、送信するフレームの Message Type や Sub Type を選択できる。図 8 の右側の画面は固有ヘッダタブが選択された状態であり、Message Type に対応した設定ができるよう画面が自動的に切り替わる。ペイロードタブではペイロードに挿入する PRBS(Pseudo Random Bit Sequence)のパターンが選択できる。



共通ヘッダ設定画面

固有ヘッダ設定画面

図 8 eCPRI 送信フレーム設定画面

図 9 に RoE の設定画面を示す。RoE の規格は策定中であることから、規格変更に柔軟に対応できるフレームの送信機能が必要と

される。そこで、MT1000A では任意の Message Header や Sub Header に、任意のデータ構造を定義できる機能を実現している。

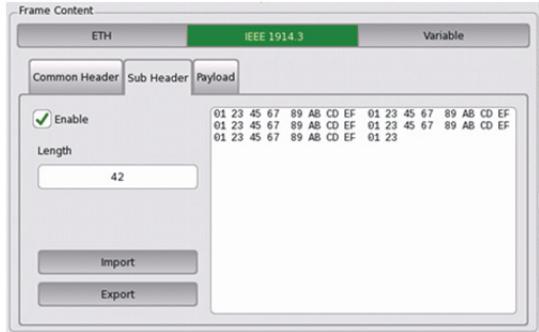


図 9 RoE 送信フレーム設定画面

5 遅延測定および時刻同期測定機能の向上

5.1 遅延測定機能

5G モバイルネットワークでは「End-to-End で 1 ms 以内の遅延時間」が求められる。これは無線区間を含めた要求であり、有線区間に要求される遅延時間は片方向 100 μ s 程度となる。このため通信ネットワークの評価に際し、より高精度の遅延時間測定を行う必要性が生じている。

本開発において、大きく 2 項目の改善を行った。1 つ目は、遅延測定分解能の向上である。具体的にはイーサネット測定用フレーム内の時刻情報の分解能を 100 ns から 5 ns に改善した。2 つ目は、片方向遅延測定における Far-End 測定の対応である。片方向遅延測定は、送信元と受信先の 2 つの MT1000A の時刻を正確に同期させる必要がある。表 3 に示すように、片方向遅延測定において、従来から同一筐体での Near-End 測定(表 3 A)には対応していたが、今回 Near-End 機能強化拡張(表 3 B)と Far-End 測定(表 3 C)にも対応できるようにした。詳細を以下に説明する。

表 3 片方向遅延測定の同期方法と測定対象

同期方法	測定対象	MT1000A 対応
A 同一筐体	Near-End	従来対応済み
B 1PPS-10 MHz	Near-End	本開発での対応
C GPS	Far-End	本開発での対応

A:同一筐体での片方向遅延測定(Near-End)

Near-End 測定とは、デバイスの評価や小規模な通信ネットワークの検証など、評価対象の測定端が近い場合の測定方法である。MU100011A は 10GbE 以下のレートでは、2 つのポートを同時に使用できる。2 つのポートのうち片方から送信し、もう一方で受信することにより片方向遅延測定は可能となる。同一筐体の場合、送信元と受信先の時刻は同一である。

B:1PPS-10 MHz 同期を用いた片方向遅延測定(Near-End)

図 10 に 2 筐体を用いた片方向遅延測定系を示す。この測定は、特に 25GbE/40GbE/100GbE で用いられる。図中の雲は被測定対象(DUT: Device Under Test)を、緑の線はテストパケットの経路を示し、2 台の MT1000A はそれぞれ MU100011A を搭載している。さらに左側の MT1000A は MU100090A(高精度 GPS(Global Positioning System)同期発振器)を搭載し、そこから分配した 10 MHz と 1PPS(Pulse Per Second)の信号で同期する。時刻同期信号源に「1PPS(外部基準 10 MHz)」を設定すると、測定用のクロックカウンタは外部 10 MHz を基準とし、1PPS でリセットされる。こうして 2 つの筐体の時刻は同期する。

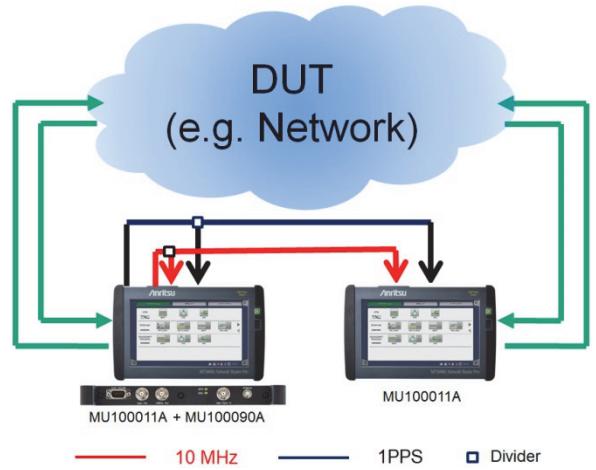


図 10 個体での片方向遅延測定系

C:GPS 同期による片方向遅延測定(Far-End)

実際の通信ネットワークにおいて、評価対象の測定端が遠い場合の測定方法を図 11 に示す。2 台の MT1000A に搭載された MU100090A を GPS 信号で同期させる。時刻同期信号源の選択肢に「GPS(外部基準 10 MHz)」を追加することで、Far-End における遅延測定が可能となった。

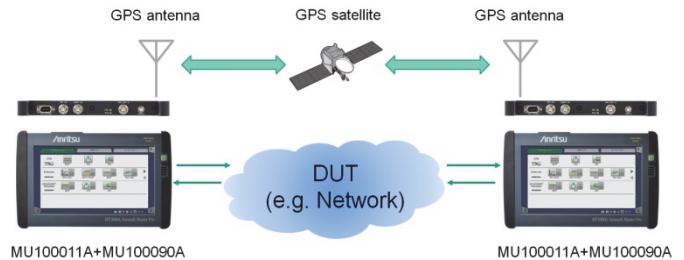


図 11 Far-End での片方向遅延測定系

5.2 時刻同期測定機能の向上

MT1000A シリーズでは、以前より LTE(Long Term Evolution)-Advanced 特に TD(Time Division)-LTE 方式で採用された、PTP(Precision Timestamp Protocol)を使用した時刻

同期測定に取り組んできた⁶⁾。本開発では、5GでのMFHの市場要求にこたえるために以下の課題に対応した。

- ・25GbEでのPTP測定
- ・時刻精度の向上

25GbEに関しては、3章で記載したMU100011Aで対応した。

表4に5Gでの時刻精度要求を示す⁷⁾。従来のLTE TDD(Time Division Duplex)に対し5Gの時刻精度要求は高い。

表4 時刻精度要求

Category	Typical applications	TAE (Typical applications and time alignment error)
A+	MIMO or TX diversity transmissions, at each carrier frequency	65 ns
A	Intra-band contiguous carrier aggregation, with or without MIMO or TX diversity	130 ns
B	Intra-band non-contiguous carrier aggregation, with or without MIMO or TX diversity, and Inter-band carrier aggregation, with or without MIMO or TX diversity	260 ns
C	3GPP LTE TDD	3 μs

PTPパケットを用いた時刻・位相評価のうち、代表的な評価の指標としてTerr(Time transfer Error)の測定メカニズムを図12に示す。TerrはPTP通信の上り方向のDelay_Reqパケットと下り方向のSyncパケット、それぞれの時刻・位相差(Time Error), TE4, TE1の平均値として算出される。

$$\text{Time Error(TE)} = \text{OWD} - [\text{ideal cable delay}]$$

$$\text{Terr} = (\text{TE1} + \text{TE4}) / 2$$

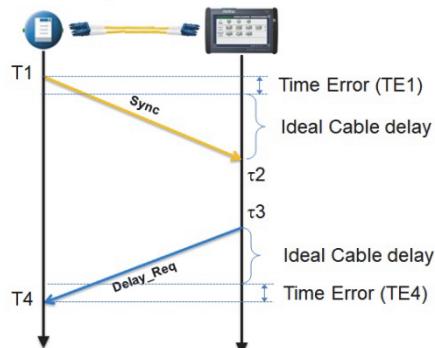


図12 PTPのTime Error

時刻精度向上のために、図12のMT1000A側で取得する受信時間τの測定方法を改善した。改善前後のブロック図を図13に示す。改善前は、Syncパケットの受信時間τ1計測するのに時刻測定の揺らぎの大きいバッファの後で実施していた。τ1計測をバッファより以前に実施することにより、バッファの影響を受けないようにした。

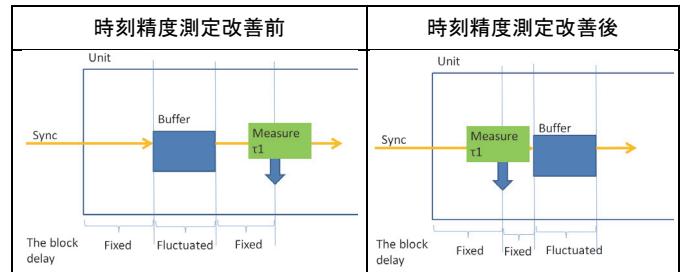
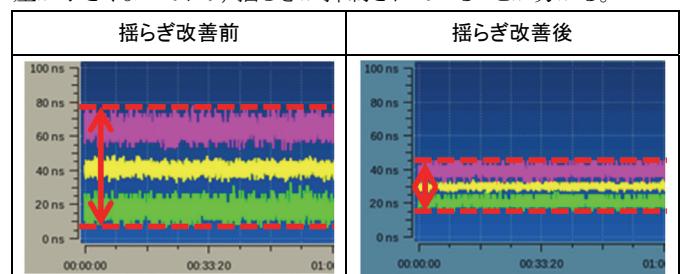


図13 時刻測定改善前後の比較

図14および表5にTerrの改善効果を示す。図14は、1GbEで同じPTP Masterを用いた際の改善前後の結果の比較である。横軸は時間[s], 縦軸はTerr[ns]を示す。グラフ中、3本のラインがあり、上から順に単位時間当たりのTerrの最大値、平均値、最小値をそれぞれ表す。改善前後を比較すると、最大値と最小値との差が小さくなっていることが分かる。



(赤:最大値、黄:平均値、緑:最小値)

図14 Terr結果の改善結果

表5に改善前後の性能とその実測値を示す。内部打刻誤差性能は、10MHzおよび1PPSといった外部リファレンス信号の精度に依存する。表中に示した値は外部リファレンスの誤差要因を含まないMU100011Aとしての公称値であり、結果(実測値)は図14の結果値である。この結果から、「計測時間でのTerrの最大値と最小値との差」では約41%、「計測時間でのTE1の最大値と最小値との差」では約55%改善したことが分かる。

表5 測定精度改善の結果

	精度改善処置前	精度改善処置後
内部打刻誤差	±100 ns	±35 ns
結果(実測値) Max Terr	81 ns	47 ns
結果(実測値) 計測全区間でのTerrの最大値と最小値との差	68 ns	30 ns
結果(実測値) 計測全区間でのTE1の最大値と最小値との差	85 ns	45 ns

6 むすび

5G モバイルフロントホールおよびバックホールの検証用に、25GbE および 100GbE に対応した小型の MU100011A を開発した。また、5G フロントホールで採用される eCPRI および RoE の測定機能追加と、遅延測定および時刻同期測定の機能改善を行った。

5G のサービス運用に向けてのトライアルがはじまっている。今後も測定ニーズに対応し、5G ネットワークのサービス品質向上に貢献したい。

参考文献

- 1) A.Mikuchi, S.Isobe, H.Takahashi, S.Nagata, "5G Standardization Trends at 3GPP", NTT DOCOMO Technical Journal Vo.19 No.3,pp2-12(Jan.2018)
- 2) 3GPP TS22.261 Version 15.5.0, "Service requirements for next generation new services and markets" (July.2018)
- 3) 情報通信技術委員会, "次世代移動体網のフロントホール／バックホールにおけるアクセス網の課題に関する調査報告書", 第 1.0 版 (2017/3/31)
- 4) IEEE1914.3, "IEEE Standard for Radio over Ethernet Encapsulations and Mappings" (Sep.2018)
- 5) Common Public Radio Interface, "eCPRI Interface Specification V1.1"
- 6) 薄葉光弘, 杉山修, 石塚康二, 古木敦: "高精度な網同期検証に対応したネットワーク試験器の開発", アンリツテクニカル 92 号, pp.1-9(2017.3)
- 7) Common Public Radio Interface, "eCPRI Transport Network V1.0"

※ 「Ethernet」および「イーサネット」は、富士ゼロックス株式会社の登録商標です。

執筆者



伊藤智宏
計測事業グループ計測事業本部
サービスインフラストラクチャーソリューション事業部
商品開発部



古木 敦
計測事業グループ計測事業本部
サービスインフラストラクチャーソリューション事業部
商品開発部



佐伯北斗
計測事業グループ計測事業本部
サービスインフラストラクチャーソリューション事業部
商品開発部



露木明宜
計測事業グループ計測事業本部
サービスインフラストラクチャーソリューション事業部
商品開発部

公知