



高い信頼性と可用性を備えた小型・高密度の高速イーサネット装置

High-Speed Ethernet Equipment with High Reliability and Availability

濱田 洋平*

Yohei Hamada

芝 晋吾

Shingo Shiba

神山 真一

Shinichi Kouyama

齊藤 裕也

Yuya Saito

滝澤 康裕

Yasuhiro Takizawa

井上 徹

Toru Inoue

近年、様々なサービス分野と情報通信技術が融合し私達の生活に深く浸透することで便益がもたらされる一方で、通信インフラの障害が日常生活に及ぼす影響は大きく、通信機器はより高い信頼性、可用性が求められている。当社は高品質な5G無線システムの運用に貢献する高速イーサネット装置を開発した。本稿では可用性に加えて上位通信装置の通信帯域に合わせた送信制御が可能なMC-LAG、高精度時刻同期の高信頼化の実現について述べる。

In recent years, the convergence of several services and information technologies has revolutionized our daily lives. However, failures in communication infrastructures can have profound consequences, necessitating higher reliability and availability of communication equipment. This paper focuses on our research and development efforts for high-speed Ethernet equipment, specifically addressing MC-LAG (multi-chassis link aggregation) and precision time synchronization in supporting high-quality 5G wireless systems.

キーワード：イーサネット装置、高可用性、高精度時刻同期、装置冗長、MC-LAG

1. 緒言

現代社会においてネットワークは不可欠な存在となっている。インターネットやクラウドサービスなど、様々なサービスがネットワークを通じて提供されるようになり、私たちの日常においてネットワークは必要不可欠なインフラストラクチャーに位置づけられる。ネットワークを利用するサービスは、高画質な映像や音声など、データ量の大きいコンテンツが増加し、また、IoT (Internet of Things) やビッグデータなど、データの収集や処理が必要な分野のサービス利用が増加している。

これらのサービスには、高速なネットワークが必要であり、年々ネットワークの帯域は増えている。令和4年版情報通信白書では、新型コロナウイルス感染症の感染拡大直前の2019年11月から2021年11月までの2年間の間に、国内のインターネットトラフィックは約2倍に増加している⁽¹⁾。

また、企業や組織においては、クラウドサービスやSaaS (Software as a Service) などネットワークを利用するサービスが普及している。従来のオンプレミス環境に比べてコスト低減や柔軟性の向上などのメリットはある一方、ネットワークの信頼性が重要視されるようになってきている。例えばクラウドサービスの利用には常にインターネットに接続している必要があり、ネットワークの不具合やトラブルが業務の支障へ繋がる恐れがある。このような背景から、ネットワークの信頼性への要求が高まっており、特にリアルタイム性が求められるサービスや、クラウドサービスを利用する企業や組織においては、高い信頼性が求められて

いる。

インターネットを含めたネットワークで広く利用されている通信規格としてイーサネットがある。イーサネットはIP (Internet Protocol) との親和性が高いことにより、家庭内やオフィス内などのLAN (Local Area Network) のみならず、データセンター間や5Gモバイルフロントホールなど多岐のネットワークで汎用的に利用されるようになってきた。

当社がイーサネットを利用した製品として、各家庭と通信局舎間を接続するFTTH (Fiber To The Home) 向けシステムがあり、2006年に開発したGE-PONシステム⁽²⁾、ならびに2017年に開発した10G-EPONシステム⁽³⁾が挙げられる。これらのシステムでは、物理的なネットワークの接続形態とは独立した仮想的なLANセグメントを作ることができるVLAN (Virtual LAN) や、ネットワークポートの冗長性を向上させるLAG (Link Aggregation) などのイーサネットに関する技術を利用してきた。

ネットワークの高速化や様々なネットワークにイーサネットを利用するという社会ニーズに対し、当社が保有するイーサネット技術を利用したイーサネット装置を開発したので、本稿で報告する。

本稿の構成は以下の通りである。第2章では開発した高速イーサネット装置の装置仕様と、利用されるシステム構成を述べる。第3章ではネットワークの高信頼化を実現するMC-LAG (Multi Chassis LAG) 機能と、ネットワーク内で高精度な時刻同期を実現する時刻同期機能 (SyncE/PTP) を紹介する。

2. 高速イーサネット装置

2-1 装置構成

当社の高速イーサネット装置の筐体外観を図1に、筐体諸元を表1に示す。

本高速イーサネット装置の筐体は、制御ユニットが実装される制御用スロット1つと複数サイズのラインユニットを実装できるライン用スロット4つを持つ。

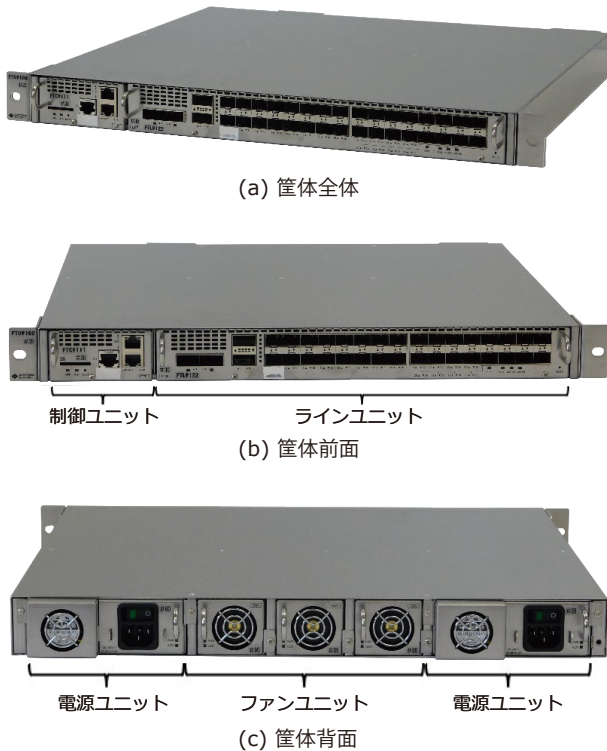


図1 筐体外観図

表1 筐体諸元

項目	仕様
装置サイズ (単位: mm)	筐体 (19インチラック 1RU) 440 (W) × 450 (D) × 44 (H) ※突起部含まず
スロット構成	制御用 1スロット ライン用 4スロット
電源	DC48VまたはAC100V 冗長構成/ユニットタイプ
空冷方式	ファンによる強制空冷 ユニットタイプ、3スロット
消費電力	最大400W

本筐体では、制御部にもスロット方式を採用しており、用途に応じた装置制御インタフェースをもつ制御ユニットに入れ替えることを可能とする。制御ユニットの諸元を表2に示す。本制御ユニットは保守管理ポートとして、監

視制御網と接続するためのSSHポートを2つと制御端末と直接接続するためのシリアルポートを1つ持つ。また、外部インタフェースとしてストレージ用のSDカードスロットを持つ。

表2 制御ユニット諸元

項目	仕様	
ユニットサイズ (単位: mm)	79.0 (W) × 203.0 (D) × 37.5 (H) ※突起部含まず	
保守管理ポート	イーサネット (管理用)	RJ45 2ポート
	RS-232C	RJ45 1ポート
外部ストレージ	SDカード	SDHC 1スロット

ラインユニットの諸元を表3に示す。本ラインユニットは4スロット分のサイズがあり、筐体あたり1個のラインユニットが実装できる。本ラインユニットは光トランシーバ用ポートとしてSFP28、QSFP28及びQSFP-DDフォームファクタに対応したポートを搭載する。転送能力は最大800Gbpsのスイッチ容量と2GBの packetsバッファを持ち、多数のユーザが同時に通信する状況においてもユーザごとに専用バッファを割り当て、公平な通信を実現することが可能である。

表3 ラインユニット諸元

項目	仕様	
ユニットサイズ (単位: mm)	330.4 (W) × 200.0 (D) × 37.5 (H) ※突起部含まず	
スイッチ容量	800Gbps	
パケットバッファ	2GB	
MAC登録数	256千件	
インタフェース	1/10/25GbE	SFP28 × 32ポート
	100GbE	QSFP28 × 2ポート
		QSFP-DD × 2ポート

本装置の基本機能諸元を表4に示す。ネットワークポロジに合わせて活用可能なEthernet ServiceやVLANごとに8classのQoS (Quality of Service) 制御、L2接続の管理・監視を可能とするCFM (Connectivity Fault Management) などの機能を持つ。

表4 基本機能諸元

項目	仕様	
Ethernet Service	MEF, E-LAN, E-Line, E-Tree	
QoS	Classification	8 class/VLAN
	Ingress Policer	Port, VLAN, Class
	Egress Shaper	Port, VLAN
Ethernet CFM	IEEE 802.1ag MEP/MIP	
高精度時刻同期	IEEE 1588v2 BC/TC (Telecom Profile) G.8273.2 Class C, SyncE	

2-2 システム構成例

本高速イーサネット装置を用いたシステム構成例として図2にモバイル基地局例を示す。

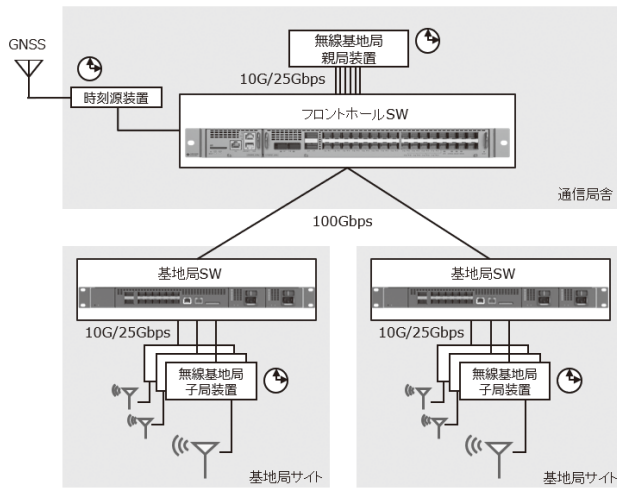


図2 システム構成例 (モバイル基地局)

本構成例では、通信局舎の局側SWとして本装置を用いる。本装置はO-RAN アライアンスに準拠しており、異なるベンダー間の相互運用性に対応する。5G以降では基地局サイトのセル範囲が狭まり、基地局サイト数が増加することから少ない光ファイバにより経済的かつ効率的に基地局サイトを収容するネットワーク網の構築が求められる。通信局舎において本装置を組み合わせることで冗長構成を持たせ、いずれかの経路が不通になった場合でも他の経路を通すことでサービスを継続することが可能である。また、親局装置の物理的なポート数が限定されている場合であっても本装置をハブとして用いることでより多くの子局装置を同時に接続することが可能とする。

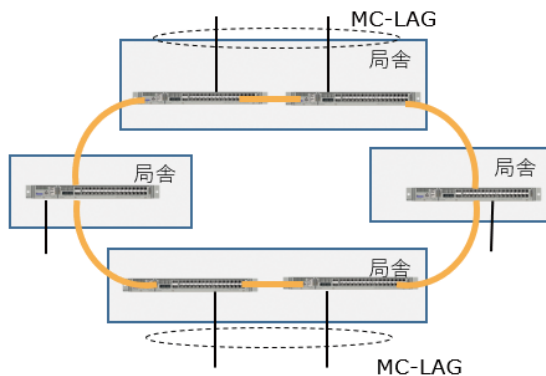


図3 システム構成例 (地域内網)

地域内網で活用するシステム構成例を図3に示す。本構成例では局舎間を結ぶように本装置を用いる。MAC学習を不要としたVLANベースのリング転送機能で通信することで、MAC学習による意図せぬループトラフィックの増殖を抑止する機能を将来開発する予定である。

3. 高信頼性・可用性機能

3-1 MC-LAG

MC-LAGとは、マルチシャーシ・リンクアグリゲーションの略であり、2台のイーサネット装置を接続・連携させたリンクアグリゲーションを指す。リンクアグリゲーションとは、複数のポートを束ねて論理的に1リンクとして扱う技術である。一般的に、リンクアグリゲーションには2つの目的があり、第一に通信帯域の負荷分散、第二に冗長性の向上である。本稿では冗長性の向上（装置故障や装置停止を伴うメンテナンスによる通信サービスへの影響を最小化する）について述べる。

イーサネット装置を単独で運用したとき、装置あるいは接続経路で障害が生じた場合にはサービスを維持することが困難となる。MC-LAGによる冗長性の向上について図4に概要図を示す。

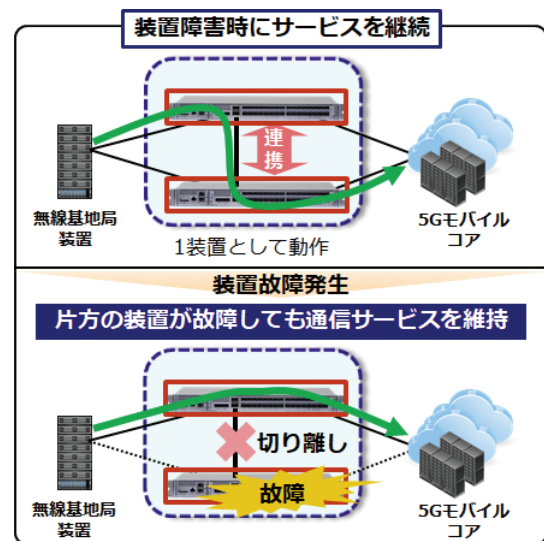


図4 MC-LAG 冗長性の向上

本装置間をインターフェースポートを介して接続し、装置間連携としてIEEE802.1AX-2020で規定された静的なリンクアグリゲーション、あるいはプロトコル (LACP: Link Aggregation Control Protocol) のハンドシェイクを用いた動的なリンクアグリゲーションのいずれかを選択することができる。いずれのリンクアグリゲーションであっても2台の本装置が仮想的な1台として振る舞うため、2台の本

装置の状態を意識することなく、対向装置（図中の5Gモバイルコア）を運用することが可能である。本装置間ではプロトコル（DRCP: Distributed Relay Control Protocol）を用いて対向装置との経路状態を含む情報を常に相互伝達しており、経路障害が生じた場合には装置間で通信経路を調停の上、新たな通信経路を取り決める。また、装置故障により装置間の相互伝達が一定時間途絶えた場合、装置を跨ぐ通信経路を切り離し、各装置が独立して送受信する。

本装置のMC-LAGを利用した冗長性能として、障害発生時の切替性能を図5に示す。計測方法は、通信経路に1秒間に1000フレームを疎通させた状態から光ファイバを抜き、経路障害として経路切替時のフレーム欠損を測るものとした。

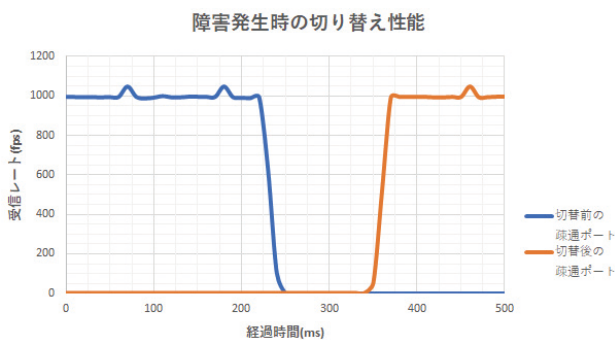


図5 通信経路切替性能

経路障害により経路切替が動作し、切替後のポートから疎通開始までは90ミリ秒、切替前と同等のレートに回復するまで120ミリ秒、フレーム欠損数は121であった。切替性能はフレーム欠損数から121ミリ秒となる。

MC-LAGによる冗長性の向上について述べてきたが、冗長化の経路変更に伴うリンクの帯域変動が好ましくないケースが存在する。リンクアグリゲーションは複数のポートを論理的に1リンクに束ねているが、リンクを構成している一部のポートで障害や復旧が生じたとき、リンクの最大帯域が上下し、それに連動してリンクに流れるトラフィックのレートが上下した場合、対向装置の受信部にて輻輳が生じかねない。輻輳は、通信障害のよく知られているトリガーである。また、輻輳が想定される場合、その対応として受信側の装置に、例えば、高優先度トラフィックだけは遅延させないようにするための複雑な優先制御などが必要になり、ネットワークの設計が複雑になるだけでなく、高度なQoS機能を備えたデバイスが必要になってコスト増につながる。

無線基地局装置と5Gモバイルコア網の間に本装置を設置した場合を例にとって説明する。5Gモバイルコアの高負荷は通信障害に繋がるため、本装置から5Gモバイルコア網への送信レートは、平常時とメンテナンス時のいずれ

も一定の送信レート上限を保つことが望ましい。これを実現するために、ポートの障害の前後で、そのポートの属する論理的リンクの送信レートが上限帯域を超えないことを可能とする独自方式を組み込んでいる（図6）。

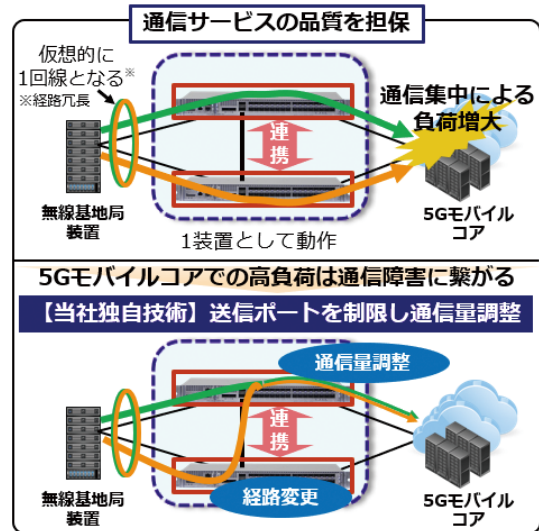


図6 当社独自 通信量調整

なお、論理的リンクの送信レート上限を一定に保つ独自方式は特許出願済みである。

3-2 高精度時刻同期

本装置はモバイルネットワークなど、高精度な時刻同期に対応するため、SyncE (Synchronous Ethernet)、およびPTP (Precision Time Protocol) をサポートする。それぞれの機能と本装置の性能を紹介する。

(1) SyncE

SyncE は ITU-T “International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector” (国際電気通信連合の電気通信標準化部門) で規定された同期イーサネット⁽⁴⁾の規格で、参照となる転送元ポートのイーサネット信号からクロック信号を抽出して、転送先ポートのイーサネット信号をクロック信号に同期させることでイーサネット網の周波数同期を可能にする（図7）。

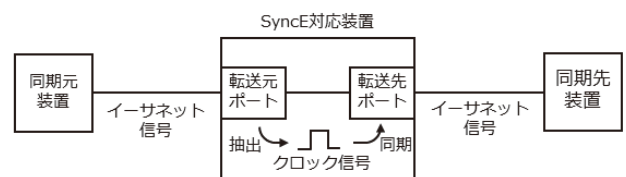


図7 SyncE機能

図8に本装置のSyncEの同期精度をTIE (Time Interval Error) の測定結果として示す。TIEは転送元のクロック信号に対する転送先のクロック信号のタイミングのずれで、クロック信号が完全に同期しているとTIEは変化しない。測定は10Gポート間で行い、SyncE無効の状態から測定を開始、約20秒後に有効、約40秒後に無効と変化させた。開始時は無効(非同期状態)で周波数オフセットが58ppb(parts per billion; 10億分の1)とずれておりTIEが増加している。有効(同期状態)に切り替わることでTIEが一定となり、周波数オフセットで-0.4 ppbと高い精度で同期している。無効(非同期状態)に戻した後もホールドオーバー機能で保持したクロック信号で動作しており、2.5ppbの周波数オフセットで動作できている。これは、ITU-T G.8262で規定される目標周波数精度の4600ppbを満足する。

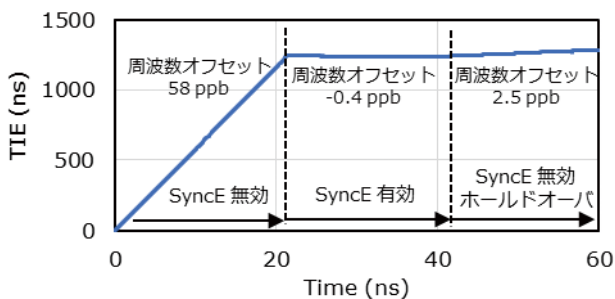


図8 SyncE同期精度 (TIE: Time Interval Error)

(2) PTP

PTPはIEEE1588で規定された時刻同期プロトコル⁽⁵⁾で、マスタ装置-スレーブ装置間でPTPメッセージを交換して伝送路遅延を算出して補正することで、スレーブ装置の時刻をマスタ装置に同期させる。

本装置はTelecom ProfileのPTPに対応しており、マスタ装置-スレーブ装置間に設置され、BC (Boundary Clock) とTC (Transparent Clock) の2種類のモードで動作することができる。

BCモードでは、マスタ装置に対して本装置がスレーブとなって時刻同期を行う。本装置がPTPパケットを終端して時刻情報を保存し、スレーブ装置に対しては本装置がマスタとなって時刻同期を行う(図9(a))。スレーブ装置が多数の場合、本装置がマスタ装置の処理を代替するため、マスタ装置の負荷を抑えることができる。

TCモードでは、マスタ装置-スレーブ装置間のPTPパケットを中継する際、PTPパケットの中継時間を計測し、PTPパケットの補正フィールドに打刻する(図9(b))。これにより、マスタ装置-スレーブ装置の時刻同期処理において、本装置の中継時間を除去できる。

本装置ではネットワーク構成に応じて、BCとTCを選択できる。また、高精度なハードウェア・タイムスタンプ機能を有しており、ナノ秒レベルの時刻同期が可能である。

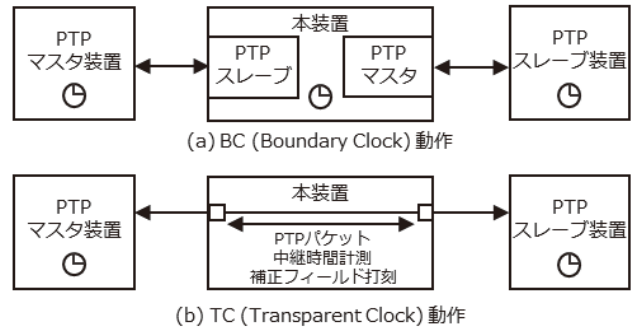


図9 PTP動作モード

本装置のPTPの時刻同期精度をMax|TE| (Time Error) の測定結果として表5に示す。Max|TE|はマスタ装置-スレーブ装置間の最大時刻誤差である。図10は測定系の構成であり、PTPテストの2つのポートがマスタ装置とスレーブ装置に相当し、2台の本装置に直列接続している。PTPテストと本装置は10Gイーサネットで接続し、本装置間は10G、もしくは100Gイーサネットで接続した。時刻同期精度は装置間の上り/下り伝搬遅延の差が誤差要因となる。本装置内のイーサネットLSI内の遅延は時刻同期処理で補正されるが、上り/下りのファイバ長のずれや、光トランシーバの電気処理に起因する遅延変動が誤差要因となる。例えば、100Gbps超の光トランシーバでは、電気インタフェースにマルチレーン伝送プロトコルが利用されており、アライメント処理による遅延変動が懸念される。また、光変調方式や誤り訂正処理等のデジタル信号処理によっても遅延変動が発生しうる。そこで、本装置間の伝送に種別の異なる4種類の光トランシーバを使用して、時刻同期精度への影響を検証した。

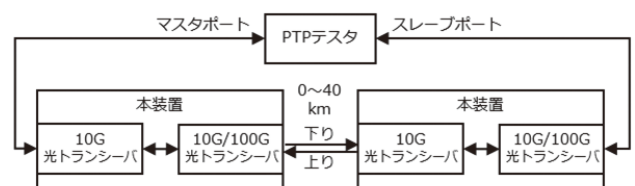


図10 PTP時刻同期精度測定系の構成

表5に、トランシーバ種別毎に伝送ファイバの芯数と長さ、PTPの動作モード(BC/TC)の条件を変えて測定したMax|TE|を示す。2芯の10~40km光ファイバを使用した場合、上り/下りのファイバ長差に相当する遅延分だけMax|TE|が増加している。サーキュレータを利用して1芯ファイバで伝送した場合にはMax|TE|は増加していない。

また、今回の測定では光トランシーバの種類と動作モード (BC/TC) による影響は小さく、Max|TE|が15ns以下の良好な結果が得られた。

これは、ITU-Tで規定される装置当たり最大時刻誤差30nsのClass Cを満足している。この結果は採用した光トランシーバでの結果で、適切な光トランシーバを選定することで、高精度な時刻精度を実現できることを確認した。また、ファイバ長差による時刻誤差は固定であり、オフセットとして補正することが可能と考える。

表5 最大時刻誤差Max|TE|測定結果

光トランシーバ		伝送ファイバ		Max TE (ns)	
種別	芯数	芯数	長さ (km)	BC	TC
10GBASE-LR	2	2	0	9	10
100GBASE-LR4*1	2	2	0	12	10
			10	41	37
100G Open ZR+*2	2	2	10	8	11
			0	15	7
100G-ER1-30*3	1	1	40	210	204
			0	17	7
100G-ER1-30*3	1	1	0	14	9
			30	12	10

(*1) 100Gbps伝送、強度変調型 (NRZ)、4波長、誤り訂正なし

(*2) 100Gbps伝送、コヒーレント型、1波長、誤り訂正あり

(*3) 100Gbps伝送、強度変調型 (PAM4)、1波長、誤り訂正あり

(*4) サーキュレータを利用して1芯ファイバに接続

執筆者

濱田 洋平* : 情報ネットワーク研究開発センター
グループ長



芝 晋吾 : 情報ネットワーク研究開発センター
主査

神山 真一 : 情報ネットワーク研究開発センター
主席



齊藤 裕也 : 情報ネットワーク研究開発センター



滝澤 康裕 : 情報ネットワーク研究開発センター
主査



井上 徹 : 情報ネットワーク研究開発センター
部長



4. 結 言

本稿ではモバイル基地局やメトロリングで利用できる、高い信頼性を備えた小型・高密度な高速イーサネット装置の装置仕様や高信頼性・可用性機能について説明した。

本装置はスロット型筐体を採用しており、社会ニーズに応じた通信速度やネットワークポート数のラインユニットを実装できる。今後は、プラグブルな光コヒーレントトランシーバが収容可能なユニットの検討を進め、高速化ニーズに対応する。

参 考 文 献

- (1) 総務省、情報通信白書、令和4年版
- (2) 村田拓史、「GE-PONシステムの開発」、SEIテクニカルレビュー第168号、p. 42-47 (2006年3月)
- (3) 清水浩行、「1G-EPONの更新と運用コストの低減を狙った10G-EPON局装置」、SEIテクニカルレビュー第191号、p. 27-31 (2017年7月)
- (4) ITU-T勧告、G.8261、G.8262、G.8264、G.8273 他
- (5) IEEE 1588, Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems

*主執筆者