

## TR-GSup.75

# TDM-PON を介した 5G スモール セルのバックホール/ミッドホール

5G small cell backhaul/midhaul over TDM-PON

第 1 版

2024 年 3 月 19 日制定

一般社団法人

情報通信技術委員会

THE TELECOMMUNICATION TECHNOLOGY COMMITTEE

本書は、一般社団法人情報通信技術委員会が著作権を保有しています。  
内容の一部又は全部を一般社団法人情報通信技術委員会の許諾を得ることなく複製、転載、改変、転用及びネットワーク上での送信、配布を行うことを禁止します。

## 目次

<参考>	5
1. 適用範囲	7
2. 参考資料	7
3. 定義	7
3.1 他で定義されている用語	7
3.2 本勧告で定義された用語	7
4. 略語及び頭字語	8
5. 慣例	13
6. 5G スモールセルシステムのレビュー	14
6.1 スモールセルの種類	14
6.1.1 3G/4G の時代の背景	14
6.1.2 5G 時代のスモールセルのタイプ	15
6.1.3 スモールセルとマクロ局の技術比較	19
6.2 スモールセルのアーキテクチャ	21
6.2.1 スモールセル及びバックホールユニットの物理的設計に関する要件	21
6.2.2 スモールセルのフォームファクタ (物理仕様) 及びアーキテクチャに関する主要なトレンド	21
6.2.3 異なる 5G RAN アーキテクチャに対応する機能アーキテクチャ	21
6.2.4 産業チェーンにおける主な製品アーキテクチャソリューション	22
6.2.5 ミリ波と組み合わせたいくつかのタイプのスモールセルの分析	23
6.3 スモールセルのための立地課題と、推奨される解決策	24
6.3.1 課題	24
6.3.2 計画・設計プロセス	25
6.3.3 推奨事項	25
6.3.4 サイトの計画と設計におけるバックホールの考慮事項	26
6.4 マクロステーションとスモールセルの屋内カパレージ能力の比較	26
6.5 スモールセルへの応用シナリオ	28
6.6 まとめ	29
7. スモールセルのバックホール及び無線アクセスポイントのミッドホールの要件	29
7.1 容量	29
7.1.1 単一基地局の推定モデル及び計算方法	29
7.1.2 エリアトラフィック容量のシミュレーション及びモデル	32
7.2 レイテンシ	34
7.3 時間及び周波数の同期	38
7.4 高可用性	40
7.5 セキュリティ	41
7.6 サービススライシング	42
7.7 伝送管理	43
7.8 バックホール要件とミッドホール要件の相違点	44
7.8.1 プロトコルスタックの分割オプション	44
7.8.2 伝送ネットワークと RAN 内部機能分割	45
7.8.3 その他の要件	47
7.9 まとめ	47
8. バックホール要件と PON 機能の比較	47
8.1 容量	47
8.2 レイテンシ	49
8.3 時刻と周波数の同期	51
8.4 高可用性	55
8.5 セキュリティ	57
8.6 共有アクセスドメイン	58
8.7 アクセスドメイン管理	59

8.8	まとめ	59
9.	推奨されるアプリケーションシナリオと要件	59
9.1	トポロジ	60
9.2	ユースケース	60
9.3	ネットワークリソースの共有	61
9.4	ファイバ使用率	62
9.5	まとめ	62
10	その他のトピック	63
10.1	5G DIS とベアラ技術	63
10.2	3G・4G 時代のスモールセルを支える PON の研究	65
10.2.1	技術的な利点	65
10.2.2	技術的なリスク、不利な点と提案	66
10.2.3	3G と 4G 時代のアプリケーション展開戦略	67
10.3	統合化アクセスとバックホール(IAB)と、スモールセル向けのバックホールをサポートする PON の比較	67
10.4	4G+5G デュアルモードのスモールセル	70
10.4.1	3GPP からのアーキテクチャ	70
10.4.2	BH 搬送の要件	71
10.5	5G ミリ波の開発と分析	71
	参考文献	74

## <参考>

### 1. 国際勧告等との関連

本技術レポートは、ITU-T 補足文書 G Supplement 75 (12/2021) に準拠したものである。

### 2. 上記国際勧告等に対する追加項目等

#### 2.1 オプション選択項目

なし

#### 2.2 ナショナルマター項目

なし

#### 2.3 その他

なし

#### 2.4 上記国際勧告等に対する変更事項

なし

#### 2.5 参照した国際勧告との章立て構成の相違

なし

### 3. 改定の履歴

版数	発行日	改版内容
第1版	2024年3月19日	制定

### 4. 工業所有権

本技術レポートに関わる「工業所有権等の実施許諾に係る声明書」の提出状況は、TTC ホームページでご覧になれます。

### 5. その他

#### (1) 参照している勧告、標準等

本文「2. 参考資料」及び「参考文献」を参照

### 6. 標準作成部門

アクセス網専門委員会

## <ITU-T G Supplement 75(12/2021) 和訳>

### TDM-PON を介した 5G スモールセルのバックホール/ミッドホール

#### 概要

ITU-T G シリーズ補足文書 Supplement 75 は、IMT-2020/5G のスモールセルシステムから生じるさまざまな要件を列挙しており、ネットワークの、バックホール及び Radio Access Point (RAP) のミッドホールの部分に注目し、勧告 [ITU-T G.9807.1] で定義された 10 ギガビット対応の対称パッシブオプティカルネットワーク (XGS-PON) や ITU-T G.9804.x シリーズで定義された 50G TDM-PON など、現在及び将来の時分割多重パッシブオプティカルネットワーク (TDM-PON) の機能と比較している。アプリケーションシナリオと関連する要件もガイダンスとして提案されている。

## 1. 適用範囲

本補足文書は、5G スモールセルのバックホール及びミッドホールにおける TDM - PON の最適な適用シナリオを研究し、関連する技術的要求事項を調査し、決めていく。

注-"Transport network and RAN internal functional split"に関する [b-3GPP TR 38.801] の Annex A は、機能分割の オプション 1-8 を考慮している。その分割は 5G RAN 内の内部分割であるため、ミッドホール [b-3GPP TS 38.470] として定義されているバックホール [b-3GPP TR 38.801] の F1 インタフェース (CU から DU への分割) に関するものではない。複数の RAN 展開シナリオの同時サポートについては、[b-ITU-T GSTP-TN5G] で概説されている。ITU-T の定義は O-RAN でも使用される。本文書では、時分割多重パッシブオプティカルネットワーク (TDM-PON) におけるミッドホールとバックホールに焦点を当てる。TDM - PON 上のフロントホールは他の補足文書で研究されている。

## 2. 参考資料

なし

## 3. 定義

### 3.1 他で定義されている用語

本補足文書では、他の箇所で定義されている以下の用語を使用する。

**3.1.1 eLTE eNB** [b-3GPP TR 38.801]: eLTE eNB は、EPC への接続と次世代コア (next generation core: NGC) をサポートする eNB を発展させたものである。

**3.1.2 evolved Packet Core** [b-3GPP TR 21.905]: 3GPP システムを、複数の RAT をサポートする高データレート、低レイテンシ、パケット最適化システムに進化または移行するためのフレームワーク。

**3.1.3 F1** [b-3GPP TR 38.472]: gNB-CU と gNB-DU との間のインタフェースで、gNB-CU と gNB-DU との間の相互接続点を提供する。

**3.1.4 F1-C** [b-3GPP TR 38.472]: gNB-CU と gNB-DU との間のコントロールプレーンプロトコルの基準点。

**3.1.5 F1-U** [b-3GPP TR 38.472]: gNB-CU と gNB-DU との間のユーザプレーンプロトコルの基準点。

**3.1.6 gNB** [b-3GPP TR 38.801]: NGC への接続性とともに対応したノード。

**3.1.7 new radio access network (RAN)** [b-3GPP TR 23.799]: NGC とのインタフェースとして NR 又は E-UTRA もしくはその双方をサポートする無線アクセスネットワーク。

**3.1.8 new radio** [b-3GPP TR 21.905]: 第 5 世代無線アクセス技術。

**3.1.9 next generation core (NGC)** [b-3GPP TR 23.799]: 本勧告で規定された次世代アクセスネットワークに接続するコアネットワーク。

**3.1.10 NG-U** [b-3GPP TR 23.799]: 新しい RAN と NGC の間の NG3 基準点で使用するユーザプレーンインタフェース。

### 3.2 本勧告で定義された用語

本勧告は、以下の用語を定義:

なし。

#### 4. 略語及び頭字語

10 GEPON	10 Gbit/s Ethernet Passive Optical Network
3D	3 Dimensional
3G	Third Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
5GC	Fifth Generation Core network
ACK	Acknowledgment
AES	Advanced Encryption Standard
AI	Artificial Intelligence
AN	Access Network
API	Application Platform Interface
AR	Augmented Reality
BAP	Backhaul Adaptation Protocol
BBU	Baseband Unit
BH	Backhaul
BRAS	Broadband Remote Access Server
BS	Base Station
CA	Carrier Aggregation
CAPEX	Capital Expenditure
CBRS	Citizen Broadband Radio Service
CC	Component Carrier
CDF	Cumulative Distribution Function
CEN	Carrier Ethernet Network
CHLI	Consecutive High Loss Intervals
CN	Core Network
CO	Central Office
CoMP	Coordinated Multiple Points
CP	Control Plane
CPRI	Common Public Radio Interface
CPU	Central Processing Unit
C-RAN	Centralized RAN
CRC	Cyclic Redundancy Check
CT	Channel Termination
cTE	constant Time Error
CU	Central Unit
DAS	Distributed Antenna System
DAW	Dedicated Activation Wavelength
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation
DBRU	Dynamic Bandwidth Report, Upstream
DC	Dual Connection



DCN	Data Centre Network
DF	Distribution Fibre
DIS	Digital Indoor System
DL	Down Link
DOW	Drift Of Window
D-RAN	Distributed RAN
DSP	Digital Signal Processing
dTEH	high-frequency sub-band of the dynamic TE
dTEL	low-frequency sub-band of the dynamic TE
DU	Distributed Unit
E2E	End-to-End
eCPRI	evolved Common Public Radio Interface
EEC	Ethernet Equipment Clock
eEEC	enhanced synchronous Ethernet Equipment Clock
eMBB	enhanced Mobile Broadband
EMS	Element Management System
eNB	evolved NodeB
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
EqD	Equalization Delay
ESMC	Ethernet Synchronization Message Channel
ESP	Encapsulating Security Payload
E-UTRA	Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access
EVC	Ethernet Virtual Circuit
F1AP	F1 Application Protocol
F1-C	F1 Control plane interface
F1-U	F1 User plane interface
FANS	Fixed Access Network Sharing
FAPI	Functional Application Platform Interface
FDD	Frequency Division Duplex
FEC	Forward Error Correction
FF	Feeder Fibre
FFT	Fast Fourier Transform
FH	Fronthaul
FISR	Fault Isolation and Service Restoration
FIT	Failures in Time
FPGA	Field Programmable Gate Array
FS	Framing Sublayer
FTS	Full Timing Support
FTTB	Fibre To The Block
FTTH	Fibre to the Home
FTTx	Fibre to the x
GE	Gigabit Ethernet

GEM	GPON Encapsulation Mode
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPON	Gigabit-capable Passive Optical Network
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphics Processing Unit
GSM	Global System for Mobile communications
GSMA	Global System for Mobile Communications Association
GSO	Geostationary Satellite Orbit
GTP-U	GPRS Tunnel Protocol for the User plane
HARQ	Hybrid Automatic Repeat request
HEO	Highly inclined Elliptical Orbit
HLI	High Loss Interval
HLS	High Layer Split
HMD	Head-Mounted Display
HRM	Hypothetical Reference Model
IAB	Integrated Access and Backhaul
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IP	Internet Protocol
IPRAN	IP Radio Access Network
IPSec	Internet Protocol Security
IWF	Interworking Function
JT	Joint Transmission
KPI	Key Performance Indicator
LAN	Local Area Network
LDPC	Low Density Parity Check
LEO	Low-Earth Orbit
LLS	Low-Layer Split
LOS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MCS	Modulation and Coding Scheme
MEC	Multiaccess Edge Computing
MEF	Metro Ethernet Forum
MH	Midhaul
MIC	Message Integrity Checks
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MLSE	Maximum Likelihood Sequence Estimation
MME	Mobility Management Entity
mMIMO	massive Multiple Input Multiple Output
mmW	millimetre Wave
MNO	Mobile Network Operator
MPM	Multi-Passive-Optical-Network Module

MT	Mobile Termination
MTBF	Mean Time Between Failures
MTIE	Maximum Time Interval Error
MTP	Motion To Photon
MTTR	Mean Time To Repair
MU-MIMO	Multiuser Multiple Input Multiple Output
NACK	Non-Acknowledgement
NAS	Non-Access-Stratum
NE	Network Element
nFAPI	network Functional Application Platform Interface
NFV	Network Function Virtualization
NGC	Next Generation Core
NGMN	Next Generation Mobile Networks
NG-PON2	40-Gigabit-capable Passive Optical Network
NIC	Network Interface Card
NR	New Radio
NSA	Non-Standalone
OAM	Operation Administration and Maintenance
ODN	Optical Distribution Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OLT	Optical Line Termination
OMCI	Optical network termination Management and Control Interface
ONT	Optical Network Termination
ONU	Optical Network Unit
O-RAN	Open-Radio Access Network
OSS	Operation Support Systems
OTA	Over-The-Air
P2MP	Point to MultiPoint
P2P	Point-to-Point
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PDU	Protocol Data Unit
PHY	Physical Layer
PNF	Physical Network Function
PoE	Power over Ethernet
PON	Passive Optical Network
PPP	Point-to-Point Protocol
pRRU	pico Remote Radio Unit
PRTC	Primary Reference Telecom Clock
PTN	Packet Transport Networking
PTP	Precision Timing Protocol
QL	Quality Level
QoE	Quality of Experience

QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RAP	Radio Access Point
RAT	Radio Access Technology
RF	Radio Frequency
RFIC	Radio Frequency Integrated Circuit
rHUB	remote HUB
RIB	Radiated Interface Boundary
RLC	Radio Link Control
ROW	Rights of Way
RRC	Radio Resource Control
RRH	Remote Radio Head
RRU	Remote Radio Unit
RS	Reed Solomon
RTD	Round-Trip Delay
RTT	Round-Trip Time
RU	Radio Unit
SA	Standalone
SC	Small Cell
SCF	Small Cell Forum
SCG	Secondary Cell Group
SCS	Subcarrier Spacing
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SDAN	Software-Defined Access Network
SDAP	Service Data Adaptation Protocol
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDN	Software-Defined Networks
SDU	Service Data Unit
SEC	SDH Equipment Clock
SGSN	Serving GPRS Support Node
SI	Study Item
SLA	Service Level Agreement
SoC	System on Chip
SOHO	Small Office / Home Office
SON	Self-Optimizing Network
SR	Service Router
SR-DBA	Status Reporting Dynamic Bandwidth Allocation
SRG	Shared Risk Group
SU-MIMO	Single-User Multiple Input Multiple Output
SWO	Switchover
SyncE	Synchronous Ethernet
TAB	Transceiver Array Boundary
TAE	Time Alignment Error

T-BC	Telecom Boundary Clock
TC	Transmission Convergence
TCO	Total Cost of Ownership
T-CONT	Transmission Container
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time-Division Duplex
TDEV	Time Deviation
TDM	Time-Division Multiplexing
TDMA	Time-Division Multiple Access
TDM-PON	Time-Division Multiplexing-Passive Optical Network
TE	Time Error
TEID	Tunnel End point Identifier
T-GM	Telecom Grand Master
TN	Transport Network
ToD	Time-of-Day
TRxP	Transmission Reception Points
T-TSC	Telecom Time Slave Clock
TWDM	Time and Wavelength Division Multiplexing
TX	Transmitter
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UL	Up Link
UMa	Urban Macro cell
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UNI	User Network Interface
UP	User Plane
URLLC	Ultra Reliable Low-Latency Communication
UTC	Universal Time Coordinate
UTM	UAV-Traffic Management
vAN	virtual Access Node
VLAN	Virtual Local Area Network
VNF	Virtual Network Function
VNO	Virtual Network Operator
VR	Virtual Reality
WDM	Wavelength Division Multiplexing
XG-PON	10-Gigabit-capable Passive Optical Network
XGS-PON	10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network

## 5. 慣例

なし

## 6. 5G スマールセルシステムのレビュー

### 6.1 スマールセルの種類

#### 6.1.1 3G/4G の時代の背景

IMT-2000 の [b-ITU-R M.1035]、すなわち 3G では、セル層はメガ (衛星) セル、マクロセル、マイクロセル、ピコセルの 4 つに分類できる。異なる IMT-2000 のサービスに使用されるセルの種類は、オペレータが決定する。しかし、セルのサイズは無線の範囲に関連しているため、無線インタフェースの設計にはいくつかの要件がある。これらのセルの種類に対するいくつかの典型的なセルのパラメータを表 1 [b-ITU-R M.1035] に示す。

表 1- 一般的なセルのタイプのパラメータの例 [b-ITU-R M.1035]

セルの種類	メガセル	マクロセル	マイクロセル	ピコセル
セル半径	100-500 km	35 km以下	1 km以下	50 m以下
設置	LEO/HEO/GSO	建物やタワーの頂 上部など	街灯柱/ ビルの壁面	建物の内部
端末の速度	-	≤500 km/h	≤100 km/h	≤10 km/h

注- 低地球軌道 (Low-earth orbit: LEO)：地表から高度約700 kmから3,000 kmの円軌道または楕円軌道。  
高傾斜角楕円軌道 (Highly inclined elliptical orbit: HEO)：地表からの近地点が500 km以上、遠地点が50,000 km以下で、赤道面からの傾斜角が40°を超える楕円軌道。  
静止衛星軌道 (Geostationary satellite orbit: GSO)：地球の赤道面上を周回する静止衛星の軌道。

4G 時代には、スマールセル (small cell: SC) を分類するために通常 4 つの方法がある。

- 方法 1: ベースバンドと無線周波数の組み合わせにより、SC を統合 SC とマイクロリモート無線ユニット (remote radio unit: RRU) に分割できる。
  - 統合 SC: ベースバンド及び無線周波数ユニットを含む装置で、基地局の主な機能を有し、コアネットワークに直接接続される。
  - マイクロ RRU は分散 SC とも呼ばれる。統合 SC はコアネットワークに直接接続されるが、マイクロ RRU はベースバンドユニット (baseband unit: BBU) に接続される [b-CCSA SR208]。
- 方法 2: 送信電力レベルに応じて、Long Term Evolution (LTE) SC は一般に次のように分類される。
  - ワットレベル、つまり電力の範囲は 1 から 10 W、標準値は 5 W。
  - ミリワットレベル、電力の範囲は 100-500 mW、標準値は 100 mW [b-CCSA SR208]。
- 方法 3: カバレッジのシナリオに従って、SC は屋外 SC と屋内 SC に分けることができる。方法 1 に基づいて、屋内 SC をさらに屋内統合 SC と屋内分散 SC に分割できる [b-CCSA SR208]。
- 方法 4: 3GPP における関連する定義と分類、及びベースバンドと無線周波数が共存するかどうかに従って、SC は次の 4 つのタイプに分けられる。つまり、統合 SC、マイクロ RRU、統合ピコセル、及びピコ RRU [b-CCSA 2014B3] である。その中で、統合 SC 及びマイクロ RRU は、3GPP における中距離の基地局 (BS) の要件を満たす必要があり、統合ピコセル及びピコ RRU は、3GPP におけるローカルエリア BS の要件を満たす必要がある [b-CCSA 2014B3]。

[b-3GPP TS 36.104] には、次の 4 つの BS クラスがある。

- 広域 BS は、BS からユーザ機器 (UE) への最小結合損失が 70 dB に等しいマクロセルシナリオから導き出された要件によって特徴付けられる。
- 中範囲 BS は、BS から UE への最小結合損失が 53 dB に等しいマイクロセルのシナリオから導

き出された要件によって特徴付けられる。

- ローカルエリア BS は、BS から UE への最小結合損失が 45 dB に等しいピコセルシナリオから導き出された要件によって特徴付けられる。
- ホーム BS は、表 2 [b-3GPP TS 36.104] に示すようなフェムトセルのシナリオから導き出された要件によって特徴付けられる。

BS の定格出力電力  $P_{\text{rated,c}}$  は [b-3GPP TS 36.104] に定める値とする。

表 2 - ベースステーションの定格出力 [b-3GPP TS 36.104]

BS クラス	$P_{\text{rated,c}}$
広域 BS	(注 1)
中範囲 BS	< +38 dBm
ローカルエリア BS	< +24 dBm
ホーム BS	< +20 dBm (送信アンテナポートが 1 つの場合) < +17 dBm (送信アンテナポートが 2 つの場合) < +14 dBm (送信アンテナポートが 4 つの場合) < +11 dBm (送信アンテナポートが 8 つの場合)
注 1- 広域 BS の定格出力電力に上限はない。	
注 2- この表は [b-3GPP TS 36.104] の表 6.2-1 である。	

### 6.1.2 5G 時代のスモールセルのタイプ

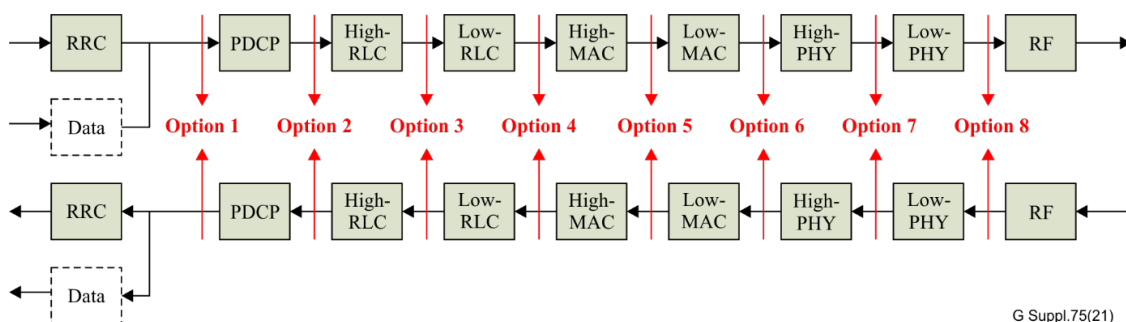


図 1-CU と DU 間の機能分割 [b-3GPP TR 38.801]

図 1 に示すように、[b-3GPP TR 38.801] で定義された無線アクセスネットワーク (RAN: radio access network) のプロトコル分割オプションから、F1 インタフェースという BS 分割としてオプション 2 が選択されている。残りの分割方法は、基本的に製造業者が定義する。オプション 2 は、基本的に、Central Unit (CU) と Distributed Unit (DU) の間の上位レイヤの分割インタフェースである。DU と Radio Unit (RU) の間の下位レイヤの分割ポイントは、オプション 6 (medium access control (MAC) /physical layer (PHY) の分割) /オプション 7 /オプション 8 (common public radio interface (CPRI)) とすることができる。オプション 6 及びオプション 7 は、evolved common public radio interface (eCPRI) と呼ばれることが多く、オプション 7 にはサブオプション 7.1、7.2、及び 7.3 が含まれる。

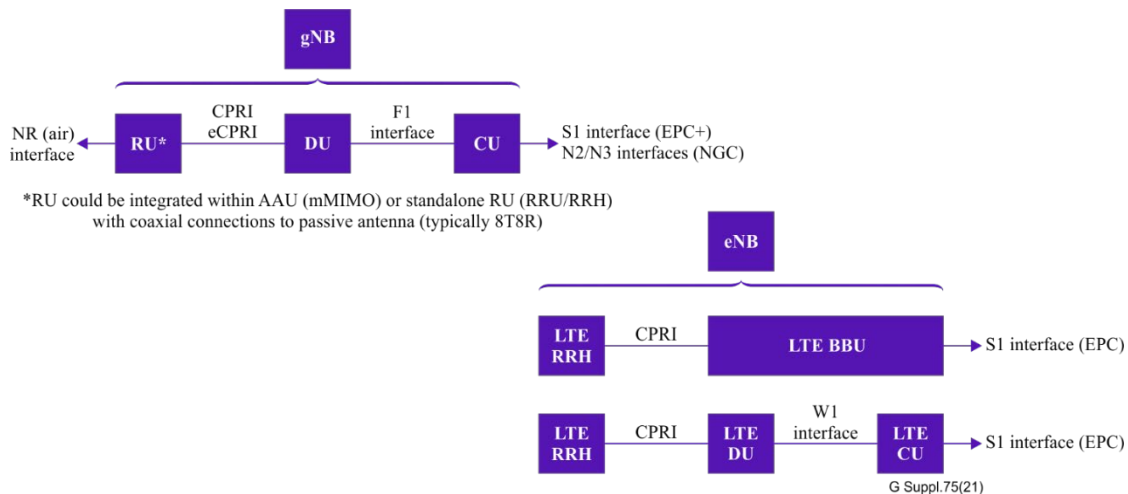


図 2- 4G/5G RAN とインタフェース

図 2 に、4G/5G RAN とインタフェースを示す。

[b-SCF238] によると、システムオンチップレベルの機能アプリケーションプラットフォームインタフェース (FAPI: functional application platform interface) と 5G FAPI とシステムレベルネットワーク FAPI (nFAPI: network FAPI) における共通インタフェースに関する Small Cell Forum (SCF) の取り組みは、多くの設計とサプライヤが革新と相互作用を可能にする共通フレームワークを定義する取り組みである。これらのインタフェースと SCF の分割 6 アーキテクチャは、企業や産業の環境に SC を導入しようとしているオペレータやその他の組織の間で特に強気にサポートされている。屋内の企業環境では、オペレータまたはその他の組織の 48%が、分散ネットワークでの RU、DU、及び CU 分割に関するオプション 6 をサポートする予定である。民間の産業ネットワークやキャンパスネットワークでも多大なサポートがあった [b-SCF238]。図 3 も参照。

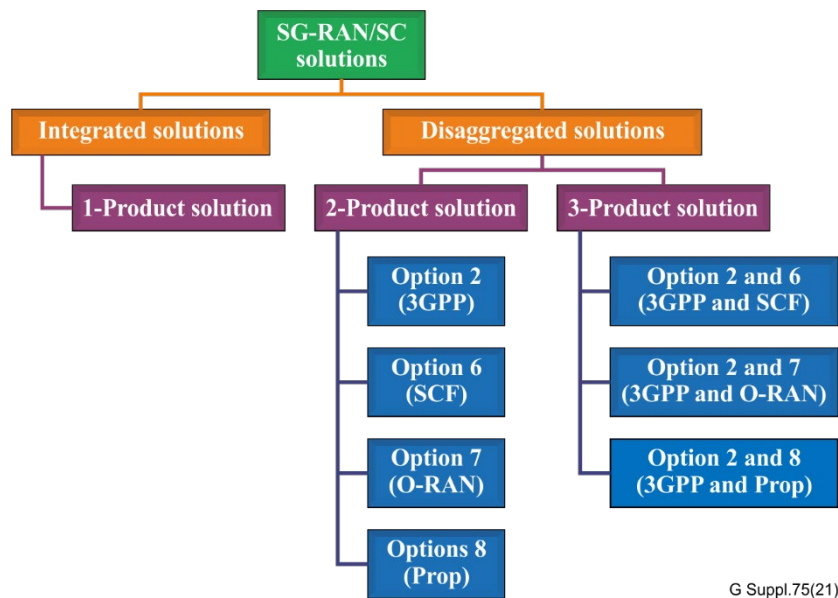


図 3- 5G スマールセルネットワークソリューションに関する Small Cell Forum の見解 [b-SCF238]

分割オプションに基づいて、以下のタイプの 5G RAN またはセルが存在する。

- 統合セル (すなわち、オールインワン)
- 分割オプション 2 を使用した 2 ユニットの分散 RAN
- Small Cell Forum (SCF) の分割オプション 6 を使用した 2 ユニットの分散 RAN



- O-RAN の分割オプション 7.2x を使用した 2 ユニットの分散 RAN
- 分割オプション 8 を使用した 2 ユニットの分散 RAN
- SCF の分割オプション 2/6 を使用した 3 ユニットの分散 RAN
- O-RAN の分割オプション 2/7x を使用した 3 ユニットの分散 RAN
- 分割オプション 2/8 を使用した 3 ユニットの分散 RAN [b-SCF238]

[b-3GPP TS 38.104] では、基地局は 1-C、1-H、1-O、2-O の 4 タイプに分割される。このうち、1 は FR1 を、2 は FR2 を指す。C はアンテナコネクタ、H は TAB コネクタである。O は、over-the-air (OTA) の要件を放射インタフェース境界 (RIB: radiated interface boundary) インタフェースで定義する。この分割は、同期 (時間調整誤差) を分析するのに役立つ。

図 4 及び図 5 に示すように、BS タイプ 1-C の場合、要件は、通常の動作条件での構成に関する完全なトランシーバを備えた単一の送信機または受信機の BS アンテナのコネクタ (ポート A) で適用される。アンプ、フィルタ、またはこれらの組み合わせなどの外部機器を使用する場合は、要件は遠端アンテナのコネクタ (ポート B) で適応される [b-3GPP TS 38.104]。

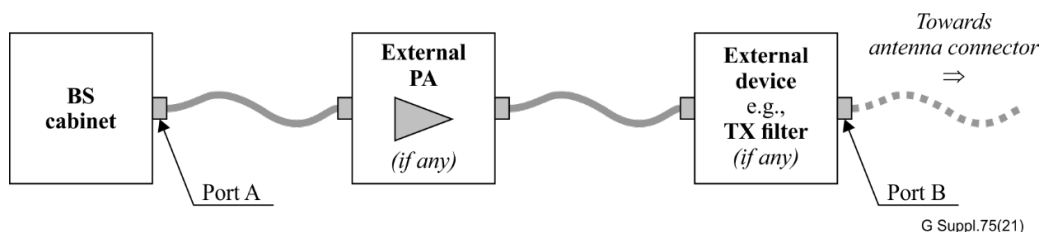


図 4- BS タイプ 1-C の送信機のインタフェース [b-3GPP TS 38.104]

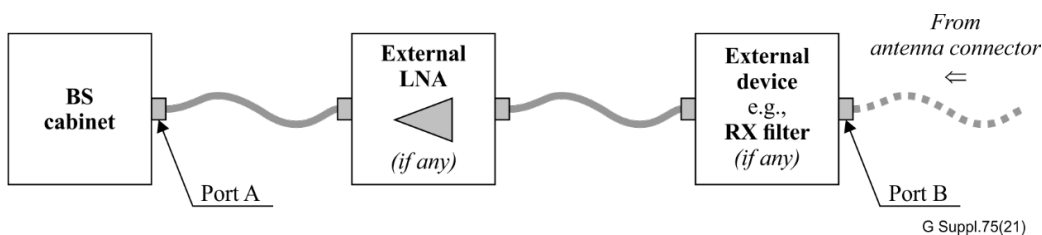


図 5- BS タイプ 1-C の受信機のインタフェース [b-3GPP TS 38.104]

BS は、BS タイプ 1-O、2-O の UE から BS までの最低地上距離 35/5/2m、BS タイプ 1-C、1-H の最小結合損失 70/53/45dB に応じて、広域/中範囲/ローカルエリアの 3 クラスに分類され、マクロセル、マイクロセル、ピコセルというシナリオから導出される要求条件により特徴づけられる [b-3GPP TS 38.104]。BS と UE の間の地上からの最小距離は、1-O、2-O 型基地局に対して定義される。結合損失は BS タイプ 1-H と 1-C に対して定義される。現在、SC の BS タイプ 1-O または BS タイプ 2-O はなく、SC は BS タイプ 1-C と考えられる。BS タイプ 1-C の定格搬送波出力電力は表 3 のとおりとする。

表 3- BS クラスの BS タイプ 1-C 定格出力電力制限

BS クラス	$P_{\text{rated,c,AC}}$
広域 BS	(注 1)
中範囲 BS	$\leq 38 \text{ dBm}$
ローカルエリア BS	$\leq 24 \text{ dBm}$

注 1- 広域 BS の  $P_{\text{rated,c,AC}}$  定格出力電力に上限はない。  
注 2- この表は [b-3GPP TS 38.104] の表 6.2.1-1 である。

現在、業界で導入されている SC アーキテクチャには、主に 3 つのタイプがある。一つは統合型、もう一つは統合 DU のみ、最後に分散型である。統合型はベースバンド部と無線周波数部を一体化したもので、主にシステムオンチップ (SoC: system on chip) で実現している。L2 と L3 も同じハードウェア内で処理されるため、このアーキテクチャには分割 CU と分割 DU がない。無線アクセスポイントは、CU を中央集中型 (及び/または仮想化コンポーネント) として機能させるために分割オプションと組み合わせた RU 及び DU である。図 6 でこれを説明する [b-Sutton]。

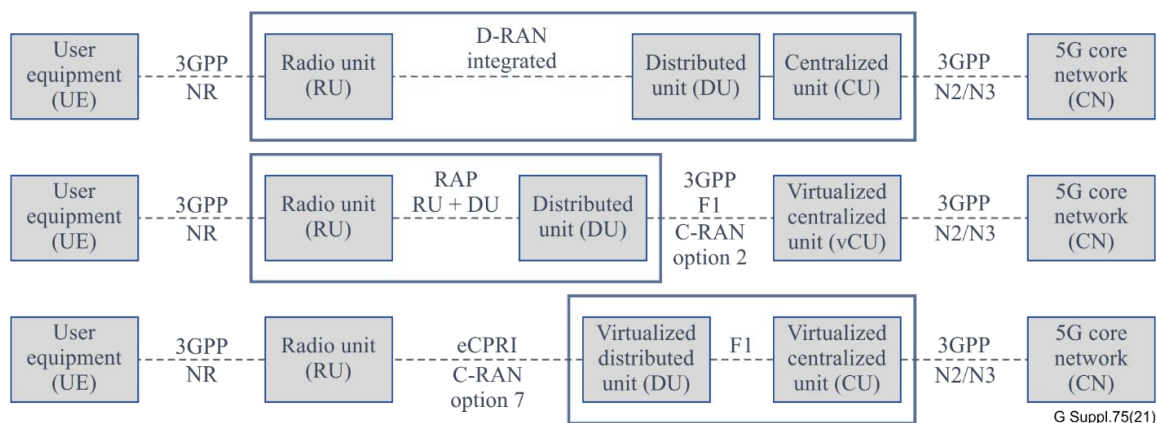


図 6- 説明のために提案された図 [b-Sutton]

統合型は屋内型と屋外型に分けられる。屋内統合型は一般に軽量型であり、屋外一体型は一般にポール型である。統合型 SC は、一般に、埋め込まれた高利得指向性アンテナを有し、これは、街路のカバレッジに特に有利である。

現在、統合型 5G SC の典型的な電力範囲値は 500 mW であり、これは 2 つの型、すなわち、2×250 mW と 4×125 mW に分けられる。

分散型も屋内型と屋外型にも分けられる (表 4)。屋内分散型 SC は、オプション 8 またはオプション 7 により、BBU + リモートハブ (rHUB: remote hub) + ピコリモート無線 (pRRU: pico remote radio) に分割され、これを 5G DIS (デジタルインドアシステム、digital indoor system) と呼ぶ。5G DIS の BBU は、統合 CU+DU である。オプション 8、つまり CPRI が BBU と pRRU 間の転送プロトコルである場合、pRRU には無線周波数 (RF) とアンテナだけがある。オプション 7-2、すなわち eCPRI が BBU と pRRU の間のトランスポートプロトコルである場合、pRRU には low PHY、RF、及びアンテナだけがある。10.1 節は、5G DIS とベアラ技術について論じている。本文書ではフロントホールリンクは考慮しない。

屋外分散型 SC はマイクロ RRU とも呼ばれる。統合型 SC と比較して、マイクロ RRU はマクロステーションと BBU を共有でき、これはソフトウェア機能進化、機能拡張、セル分割、及びマクロ-マイクロ集中型協調ネットワークモデルにおいてより有利である。

表 4- 提案される概要表

ベースバンド 機能統合	RU (low PHYのみ) (フロントホール転送)	RU+DU (ミッドホール転送)	RU+DU+CU (バックホール転送)
屋内	pRRU	LANリンクセル	オールインワンピコフェムトセル
屋外	マイクロRRU	無線アクセスポイント (RAP)	「ポールマウント」マイクロ/ピコセル

本文書では、ミッドホール及びバックホールを使う SC のみをさらに考慮する。

ミリ波をサポートするかどうかにかかわらず、アンテナの数と周波数帯域幅 (例えば、100 MHz、200 MHz、またはそれ以上) は、SC のベアリング要件に大きな違いをもたらす。実際には、BS 局の上記の技術的仕様

は、タイプを定義する際にもしばしば使用される。

### 6.1.3 スモールセルとマクロ局の技術比較

スモールセル (SC) は、小さな電力と小さなフォームファクタを有する 3GPP 定義の RF 信号を送受信するセルラーBS である。ほとんどの場合、サービスの提供範囲は小さい。

5G NR SC は、3GPP TS 38 シリーズ NG-RAN (new radio-radio access network) の gNB の仕様を満たす、1 つまたは複数のネットワークユニットである。分割オプションによる SC タイプの分割方法は、6.1.2 項に示されている。

異なるタイプの SC は、3GPP によって定義されるさまざまな周波数帯域をサポートする。これらは FR1 (サブ 6 GHz) と FR2 (ミリ波) バンドに分割されている。これらは展開に応じて、認可されたり (たとえば、移動体通信事業者に(MNO: mobile network operator)), 共有されたり (米国の市民向けブロードバンド無線サービス (CBRS: citizen broadband radio service) のスペクトル)、または認可不要かもしれない (Wi-Fi ネットワークで使用される 2.4 及び 5 GHz 帯域の場合) [b-SCF238]。

SC は一般に、16TX 及び 16RX 以上の RF チャネル、またはトランシーバユニット (TRXU: transceiver units) が共存する massive (m) multiple input multiple output (MIMO) を除外する。32TX 及び 32RX TRXU などのより大きな構成は、マクロセルに適している。ビーム成形及びハイブリッドビーム成形は、特に FR2 SC に関連する。マルチユーザ (MU: multiuser) MIMO 及びシングルユーザ (SU: single-user) MIMO も SC に関連する [b-SCF238]。

表 5 は、物理設計とハードウェアアーキテクチャの主要な課題を考慮しながら、SC とマクロセルを比較している。

表5- 物理設計及びハードウェアアーキテクチャにおけるスモールセルとマクロセルの主な課題の比較

[b-NGMN BH REQ]

主な課題	SCバックホールの要件	マクロセルバックホールの要件	SCによって得られるソリューションの利点
機器のフォームファクタと重量	小型の「ワンボックス」アーキテクチャ (すべて屋外)。最小数の物理ポート。目立たない外観、「ストリートファニチャー迷彩」。 オプションのSC統合、RANとバックホールの機能的な独立性。	多くの場合、マクロの展開は「見えないところ」にあり、スペースの制限が少ない。レガシーバックホールのサポート要件により、分割マウントモジュラーアーキテクチャと高密度の物理インタフェースが促進される。	使用スペースを削減する。土木工事の許可とサイトエンジニアリングのオーバーヘッドを最小限に抑える。設置コストとレンタル料を削減する。世間のネガティブな反応を避ける。
電源・消費電力	主電源が必要。 Power over Ethernetに対応する。 低消費電力で、それはSCに必要なものの一部である。	DC電源用の「クラシック」な通信会社専属オフィス仕様。性能と冷却の必要性によって、より高い電力消費を必要とする。	ストリートレベルでの導入を可能にし、電源装置のコストと複雑さを最小限に抑える。

表5- 物理設計及びハードウェアアーキテクチャにおけるスモールセルとマクロセルの主な課題の比較

[b-NGMN BH REQ]

主な課題	SCバックホールの要件	マクロセルバックホールの要件	SCによって得られるソリューションの利点
インストール手順	軽量で取り付けが簡単。 1人の技術者の作業、サイトの準備がほとんどまたはまったくない迅速な手順。 RANとバックホールのためのサイト訪問が1回であることが理想的。	用地取得とエンジニアリングを完全に管理、規制、「即座のロールアウト」をしなければならない、というわけではない。	インストールのコストを削減し、導入の速度を向上させる。
試運転手順	最小限のトレーニングで「プラグ・アンド・プレイ」。 自動化されたプロビジョニング。	設置数はより少ない。従来、高度なスキルを持つ、いわゆる「Telcoグレード」の技術者が実施している。	インストールのコストを削減し、導入の速度を向上させる。
信頼性とメンテナンス	衝撃と振動に強い。 あらゆる気象条件で信頼性が高い。 容易に交換可能（設定を維持）。	安全なサイト環境は、環境条件に対する保護の度合いを高めている。	信頼性と容易な交換により、運用コストを削減する。
グリーン認証	材料の使用に関して、一般的に受け入れられているすべての基準を上回る。	同じ。	企業の社会的責任に欠かせない。
セーフタッチ	権限のない者（一般人）がSC機器に接触した場合の安全配慮。	通常は立ち入りが制限された場所にある。 一般的な通信機器の安全要件がある。	人や物への危害や損害のリスクを軽減する。
物理的アクセスのリスク	天候や悪意のある攻撃など、あらゆる種類の介入からの保護。	通常は立ち入りが制限された場所にある。 一般的な通信機器の安全要件がある。	運用上の信頼性を向上させ、物理的な損傷を軽減する。

仮想化との組合せ、高周波数帯への拡張及びホワイトボックスハードウェア設計のような SC の技術動向により、SC の多くの新しい特性が将来出現するので、これらの比較は継続的な注意と研究を必要としている。

ミリ波と組み合わせたいくつかのタイプの SC、またはいくつかのタイプの新しいサービスのような 5G SC のミッドホールとバックホールのベアリングに関する主要な特別な技術的な問題については、さらなる検討が必要である。

## 6.2 スマールセルのアーキテクチャ

### 6.2.1 スマールセル及びバックホールユニットの物理的設計に関する要件

物理的な設計は、展開に適した場所の範囲とそのコストに影響を与えるため、それぞれの SC ソリューションの間での重要な差別化要因になる可能性がある。SC 及び関連するバックホールユニットの物理設計の側面には、サイズ、重量、接続性、電源、外観、環境、バックホール/RAN の統合、信頼性、設置と試運転が含まれる。おそらく環境保護を除いて、要件はマクロセルよりも SC の方がより厳しくなる。

次の例に示すように、SC とバックホールユニットの間でさまざまなレベルの統合が可能であり、導入の容易さ、サイズ、セキュリティ、柔軟性などの要因に影響する。

- 完全に統合されたモジュール: 専用バックホールカードを使用して RAN ノードに統合されたバックホール機能 (またはその逆)。完全な統合により、改ざんに対する脆弱性が軽減され、サイズが小さくなり、導入が容易になる可能性がある。統合されてしまっているため、クラス最高の RAN またはバックホールユニットを選択する柔軟性が損なわれてしまう。
- 1 つのエンクロージャ内の 2 つの分離されたモジュール: 1 つの物理エンクロージャ内のデータと電源の接続。2 つの間の相互接続が外部から保護され、1 つの個体として認識される。
- 完全に分離されたモジュール: 外部から 2 つのボックスとして見られ、2 つの間の相互接続は、天候と、悪意のある介入の両方から保護されなければならない [b-NGMN BH REQ]。

### 6.2.2 スマールセルのフォームファクタ (物理仕様) 及びアーキテクチャに関する主要なトレンド

5G 時代において、SC ははるかに広い範囲のシナリオ (例えば、サブ 6 GHz 及びミリ波の範囲での新しいスペクトルによって推進される) で展開され、フォームファクタとアーキテクチャは非常に多様となる。

5G の場合、仮想化された分散ネットワークの導入により、2 つまたは 3 つの要素で構成される SC もあれば、オールインワンの SC もある。5G SC 製品のフォームファクタ、消費電力、サイズ、インタフェース、仕様は、ユースケースや導入シナリオによって異なる。

3 つの重要なトレンドが、SC のフォームファクタとアーキテクチャの前例のない多様化を推進している。

- 携帯電話技術は、一般的なモバイルブロードバンドサービスを超えて、多くの異なる目的で、幅広い企業、業界、政府機関に採用され始めている。異なる環境とユースケースでは、大規模なキャンパス向けの巨大な分散型無線システムから、スマートトラフィックアプリケーションのために舗装に埋め込まれた、ほとんど見えないユニットまで、パフォーマンスとフォームファクタの要件が大きく異なる。共有スペクトルを含む多様なスペクトルバンドも利用される。
- モバイルネットワークの仮想化は、無線ユニットが仮想化ベースバンドユニットから分離される分散マルチベンダアーキテクチャの採用を推進している。これは、ユースケースのニーズに応じて、いくつかの方法で行うことができる。
- 5G の展開は、高密度化と展開規模を新たなレベルに押し上げるため、SC の設計のさらなる普及を促進するだろう。5G は、SC に適した比較的高い周波数帯で展開されることが多く、あらゆる種類のユーザ、場所、アプリケーションをサポートするように設計された、ユビキタスネットワークとして実装される [b-SCF238]。

### 6.2.3 異なる 5G RAN アーキテクチャに対応する機能アーキテクチャ

SC の機能アーキテクチャは SC のタイプ分割、すなわち分割オプションと、CU、DU、RU の統合の度合いに直接関連する。6.1 節「スマールセルの種類」では異なる分割オプションの詳細を記載した。

分割オプション 2 は高レイヤ分割 (HLS: high layer split) オプションと呼ばれ、分割オプション 6、7、及び 8 は低レイヤ分割 (LLS: low layer split) オプションと呼ばれる。各ソリューションの下で、機能アーキテ

チャの分割を次のように示す。

1) 3GPP 分割オプション2のソリューション

- CU: gNB-CU には、サービスデータ適応プロトコル (SDAP: service data adaptation protocol)、パケットデータコンバージェンスプロトコル (PDCP: packet data convergence protocol)、無線リソース制御プロトコル (RRC: radio resource control) が含まれる。
- DU: gNB-DU には、無線リンク制御 (RLC: radio link control)、MAC、PHY、ベースバンド、及び RF 処理が含まれる。SCF (FAPI) PHY アプリケーションプラットフォームインタフェース (API: application platform interface) は、異なるベンダの PHY ハードウェアとソフトウェアスタックのインタフェースに使用される必要がある [b-SCF222]

2) O-RAN 分割オプション 7.2 x のソリューション

- O-CU: SDAP、PDCP、RRC プロトコルを含む。
- O-DU: RLC、MAC、high-PHY プロトコルを含む。

SCF FAPI PHY API は、様々なベンダの PHY ハードウェアにソフトウェアスタックを接続するために使用される [b-SCF222]。

- O-RU: low PHY (高速フーリエ変換 (FFT: fast Fourier transform)/逆高速フーリエ変換 (IFFT: inverse fast Fourier transform) )、ベースバンド、RF 処理を含む RU。

3) SCF 分割オプション6のソリューション

- S-CU: SDAP、PDCP、RRC プロトコルを含む。
- S-DU: RLC 及び MAC を含む。
- S-RU: PHY、ベースバンド、RF 処理を含む。

4) 独自の分割オプション8のソリューション

- CU: SDAP、PDCP、RRC プロトコルを含む。
- BBU: RLC、MAC、PHY プロトコルを含む。SCF FAPI PHY API は、様々なベンダの PHY ハードウェアにソフトウェアスタックを接続するために使用される [b-SCF222]。
- Remote radio head (RRH): RF 処理のみを含む。

#### 6.2.4 産業チェーンにおける主な製品アーキテクチャソリューション

本項では主に 5G SC の製品アーキテクチャに焦点を当てる。

産業チェーンの開発の観点からは、主に x86 プロセッサとフィールドプログラマブルゲートアレイ (FPGA: field programmable gate array) に基づくエンドツーエンド (E2E: end-to-end) ソリューションと、ARM アーキテクチャに基づく SoC ソリューションがある。一部のメーカは、低消費電力の SoC+FPGA ソリューションを提供可能である。

1 つ目のタイプを例にすると、5G 無線アクセスネットワークは徐々に仮想化に向かって進化していて、メーカは x86 プロセッサベースのソリューションのアーキテクチャを導入している。RF フロントエンドソリューションはメーカの FPGA+サードパーティの無線周波数集積回路 (RFIC: radio frequency integrated circuit) で、DU と CU は一般的な x86 プラットフォームに基づいて開発及び実装されている。シリアル x86 プロセッサを使用すると、さまざまな種類のプロセッサをさまざまなサイズの BS に適合させることができる。なお、現在の SC 製品ソリューションの CU と DU はまだ分離されていない。現在の実装は主に CPU 処理の L2/L3 (L1) と FPGA 処理 (L1/low PHY) である。

x86 プロセッサソリューションのアーキテクチャでは、L1 ソフトウェアと L2/L3 を異なるベンダが提供可能である。このソリューションは C-RAN モデルに焦点を当てており、マルチアクセスエッジコンピューティング (MEC: multiaccess edge computing) 及びその他のサービスとの統合にも適している。このアーキテクチャは O-RAN アーキテクチャに近い。

異なるソリューションと比較しながら、以下の問題を継続的に検討することを推奨する。1点目は、通常 SC が、屋内または屋外の点状のエリアをカバーするために使用されるため、分離された 5G gNB の CU 及び /または DU ベースバンド処理を集中させて展開した場合の性能と、SC 間の協調の効果について、さらなる検討が必要である。2点目は、通常は遅延に関して厳しい要件を持つプライベートネットワークサービスに SC を使用する場合、分離アーキテクチャは伝送遅延を増加させることである。3点目は、E2E システムの複雑さである。

5G の時代では、一部の事業者はコスト削減のために SC の製品、特に RU または統合 RU+DU のホワイトボックス化を推進している。

## 6.2.5 ミリ波と組み合わせたいくつかのタイプのスモールセルの分析

SC のいくつかのタイプは、FR2、すなわちミリ波をサポートすることができる。

FR1 と比較して、ミリ波には次の利点がある。

- 1) より高い周波数帯域、及び豊富な周波数リソースにより、十分に大きな帯域幅を提供することができる。
- 2) ビームフォーミング技術を容易に組み合わせることができる。
- 3) 非常に小さい遅延が期待できる。
- 4) 高密度セル展開を実装するのが容易である。
- 5) センチメートルレベルの高精度測位が期待できる。
- 6) 装置は高度に統合され、設置が容易である。

同時に、ミリ波は次の課題にも直面している。

- 1) 伝搬損失と侵入損失が大きいため、カバレッジ距離は小さくなる。
- 2) モビリティ管理がより困難になる。
- 3) 製品の実現はより複雑化する。
- 4) 中・低周波との共存の要求は、端末アンテナの互換性に課題を与えている。
- 5) 各種サービスのネットワーク要件の違い [b-GSMA mmW WP] [bCU mmW WP] [b-FuTURE mmW WP]。

今後、ミリ波を用いた SC は主に次のような特徴を持つことになる。

第一に、スペクトル帯域幅の増加により、フロントホール帯域幅の必要な量が減るように、フロントホールインタフェースは進化していくと思われる。

第二に、アンテナのサイズとミリ波のカバレッジエリアの両方がサブ 6G よりも小さくなり、見通し線 (LOS: line of sight) シナリオの確率が改善される。ミリ波の波長が短いため、mMIMO 技術は、BS において大規模アンテナアレイの設計を実現できる。ビームフォーミングと組み合わせたミリ波アプリケーションは、アンテナ利得を効果的に増加できる。

第三に、ビームフォーミングの方法は従来の方法とは異なり、適応型のデジタル-アナログハイブリッドビームフォーミングを採用する。

第四に、フレーム構造は FR1 (すなわちサブ 6G) とは異なり、メインストリームのサブフレームキャリア間隔は 120 kHz、タイムスロットは 0.125 ms である。

それらのスペクトル特性、例えば LOS 伝送により、ミリ波を用いた SC は無線スペクトルリソースをより正確かつ効率的に使用できる。SC が小さければ小さいほど、展開に必要な数が増え、最終的にはカバレッジ品質が向上し、速度が速くなる。同時に、BS のカバレッジ密度が大きい場合には、干渉も大きくなり、加入者の通信速度が連続的に増加しない可能性があることに注意する必要がある。

従来の周波数帯域であるサブ 6G と比較して、ミリ波はアンテナの物理的サイズが比較的小さいという別の特徴を持つ。これは、アンテナの物理的なサイズが帯域の波長に比例するためである。BS 装置にミリ波の

アンテナアレイを装備することは、様々な MIMO 技術を実現するのに都合が良い。なお、ミリ波をサポートする UE は、従来の 4 本のアンテナを使用しており、アレーアンテナはない。

高次の MIMO は BS 側にあり、単一加入者のレートではなくシステムの容量を改善する。単一加入者レートの増加は主に帯域幅の増加と高次の変復調に起因する。

現在のアンテナ技術は継続的に検討される必要がある。

ミリ波は LOS 伝搬特性と同様に大気吸収と降雨減衰に大きく影響され、空気中のミリ波に非常に大きな減衰をもたらす。この特徴はまた、ミリ波の技術が、屋外や BS から遠く離れた場所での UE の使用に適していないことを意味する。

### 6.3 スモールセルのための立地課題と、推奨される解決策

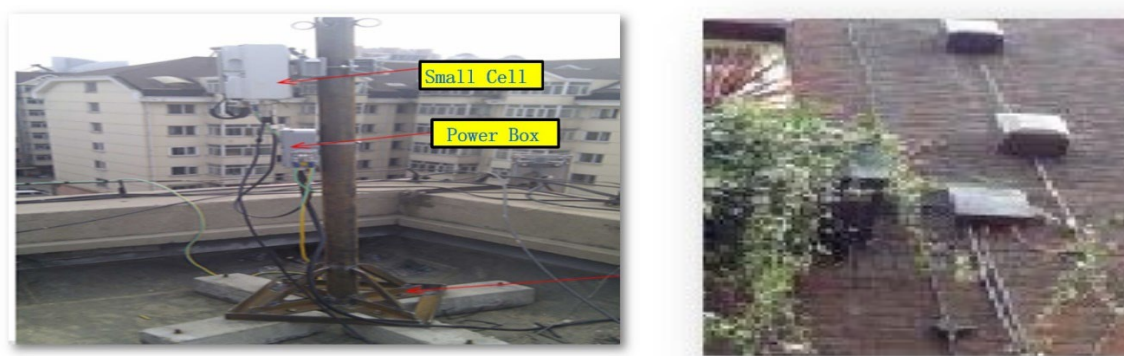


図 7- スモールセルの設置の概略図

SC の設置環境は、吊り柱、壁掛け、天井、埋込みなどの複数の設置方法があり、複雑であり、バックホールネットワーク、サイト取得、電力取得・保守に大きな課題をもたらしている。

高密度化を実現するには、サイトの取得から RF 設計、既存のインフラストラクチャとの統合、設置、ネットワークの最適化まで、SC の導入に新しいアプローチが必要である。

#### 6.3.1 課題

主な課題の概要は次のとおりであり、[b-SCF195] に基づいている。

##### 6.3.1.1 サイトの取得と承認

一般に MNO では、無線ネットワークを設計する RF エンジニアがサイト取得担当者のチームに、探索エリアまたは探索リング状エリアを与える。ネットワークの高密度化に伴い、探索エリアは小さくなり、より限定的になっている。そのエリア内で見つかった場所は、探索エリアの要求の高さ要件を満たしている場合、RF エンジニアが評価できるような候補地になる。多くの場合、サイト取得チームは RF エンジニアがレビューするために、複数の候補を提供する必要がある [b-SCF195]。

従来の BS の場合、この承認には数カ月かかる場合があり、複数の政府機関から規制当局の承認を得る必要がある。

##### 6.3.1.2 新しいサイトタイプ

高密度化には、事前に承認された電柱、街灯柱、屋上や従来の携帯電話基地局での低い放射の高さを確保するなど、新しいサイトソリューションを見つけることが含まれている。目標は、ゾーニングの確認と規制による承認の時間を最小限に抑えることであるが、多くの場合、これらの新しいサイトタイプを、規制の枠組の中にもめる必要がある [b-SCF195]。



### 6.3.1.3 電源の問題

サイト数とバックホールの接続数の増加に加えて、高度化によりグリッド電力を利用する必要がある場所がさらに多くなる。これにはいくつかの問題がある。

- コスト: SC を接続するコストは、マクロタワーを接続するコストよりも大幅に低くはならないかもしれない。
- スペースの制約: 街灯柱などの設置場所では、専用の電源を設置するスペースがないかもしれない [b-SCF195]。

### 6.3.1.4 設置

都市エリアでの SC の設置場所は、通常、RF 設計及び計画段階で決定される。適切な場所を選択するには、次の点も考慮する必要がある。

- 電源の有無
- バックホールへの接続のオプション
- 特殊な環境条件
- ローカルゾーンへの分割の要件 [b-SCF195]

### 6.3.2 計画・設計プロセス

図 8 は、企業向けの SC ネットワークを展開するために必要な計画と設計のプロセスを示している。



図 8- 計画と設計のプロセス [b-SCF079]

### 6.3.3 推奨事項

2018 年、SCF と 5G Americas は、SCF の承認と展開のプロセスを容易にするための勧告リストを発行した [b-SCF195]。これらを表 6 に示す。

表6- スマールセルの配置を容易にするための推奨ソリューションの概要 ([b-SCF195] の図15)

重要な課題	SCF推奨ソリューション
SC機器の規制認可の合理化	関連するポリシーを定義する際に使用される、コンプライアンス及び適合性に関する共通の文書を伴う、標準的な業界分類の機器;これらのクラスの一部は、認可プロセスから除外されるか、または軽い規制制度の対象となることが可能。
多数のセルをサポートするためのプランニングアプリケーション・プロセスのスケールアップ	装置クラスを免除またはファストトラック承認の対象とすることができる共通規則; セルのグループに対する一括処理により承認時間を短縮し、地方行政の作業負担を軽減。
電力及びバックホールに十分かつ適切なサイトの確保	簡素化された共通フレームワークにより、街路備品やその他の既存資産へのアクセスを容易化。 自治体ごとの利用可能な資産の調査。 管理棟へのオープンアクセス。
設置費用	スキルのない作業員でも導入可能な設置の、単純化されたルールを採用(機器のクラスとインストールの複雑さに基づく)。 管理費の削減(例えば、設置、運用、定期的に改版するための税)。
無線周波数に関する準拠	設置クラスに関する国際的な推奨事項に従い、情報を提供する。
管理の複雑さ	1人の幹部がすべての承認を調整する(例えば、スマートシティプログラムにおいて)。

表6- スモールセルの配置を容易にするための推奨ソリューションの概要 ([b-SCF195] の図15)

重要な課題	SCF推奨ソリューション
	承認プロセスを最小限に抑え、管理の作業負荷を軽減するための、合理化された事務処理とファイリング。

最善の方法のための、より詳細な推奨事項には、無線接続技術の導入と権利 (Right of Way: ROW)、有線接続の推進、ワンタッチで準備完了になること、及び全国データベースが含まれている [b-SCF195]。

導入プロセスも合理化する必要がある。これには、新しいフォームファクタによって導入を簡素化する方法、SC の最適な導入プロセス、電源の問題、環境と外観への対処が含まれる [b-SCF195]。

表 7 は、商用で実行可能な高密度ネットワークを展開するための主要な課題と、提案されたソリューションをまとめたものである。

表 7- 高密度での展開時の主な課題と推奨ソリューション ([b-SCF192] の表 3-1)

課題	ソリューション
TCOと容量コスト	高度なキャパシティ・プランニング、スペクトル効率、共有ホスト・ネットワークまたは中立ホスト・ネットワーク、自動化/SON。
カバレッジとQoS	従来とは異なるセルサイト(例:田舎、街路備品、地下駐車場)をカバーする柔軟な標準及び規制。
バックホールと電源	ファイバまたはメタル線の所有者との標準化されたフレームワーク契約; バックホールと電源オプションが混在したツールキット。
導入前: サイトの取得と機器の承認	装置クラスを免除またはファストトラック承認の対象とすることができる共通規則; セルのグループに対する一括処理; 新しいBSの設計。
大規模な導入及び保守プロセス	サイトにアクセスするためのシンプルな共通フレームワークの作成; 設置手順の簡略化; メンテナンスの自動化; サイト共有。

#### 6.3.4 サイトの計画と設計におけるバックホールの考慮事項

地理的設計の目的のために、バックホールに関連するいくつかの事項が考慮されるべきである。

- オペレータが既にネットワークインフラストラクチャを展開している既存の場所を考慮する必要がある。これらの場所は、通常、新しい機器を設置するためにアクセスしやすくなり、運用に対応しやすくなる。
- さまざまなタイプのワイヤレスバックホールオプションの検討: さまざまな周波数帯; LOS または非 LOS; ポイントツーポイント (P2P) またはポイントツーマルチポイント (P2MP) 。
- さまざまなタイプの有線バックホールオプションの検討 (ファイバ、メタル線、ケーブル) 。
- 初期及び SC の予想される製品寿命の期間にわたる帯域幅の要件。予想される帯域幅の増加によって、導入するメディアのタイプ (例えば、最初はメタル線で十分かもしれないが、ファイバであれば将来必要な帯域幅を提供できる可能性がある) が決まる場合がある。
- パケットベース。バックホールリンクが IP ベースの場合は、適切なレベルの同期を提供できることを確認する。必要な同期のレベルと種類は、使用するテクノロジーと同様に、セルの場所によって異なる。例えば、密な企業向け環境における SC では、容量を強化するために提供されるため、どのレベルの周波数、時間、及び位相の同期が必要であるかを決定する CoMP (coordinated multiple points) のような、完全な協調技術を利用することができる [b-SCF079]。

#### 6.4 マクロステーションとスモールセルの屋内カバレッジ能力の比較

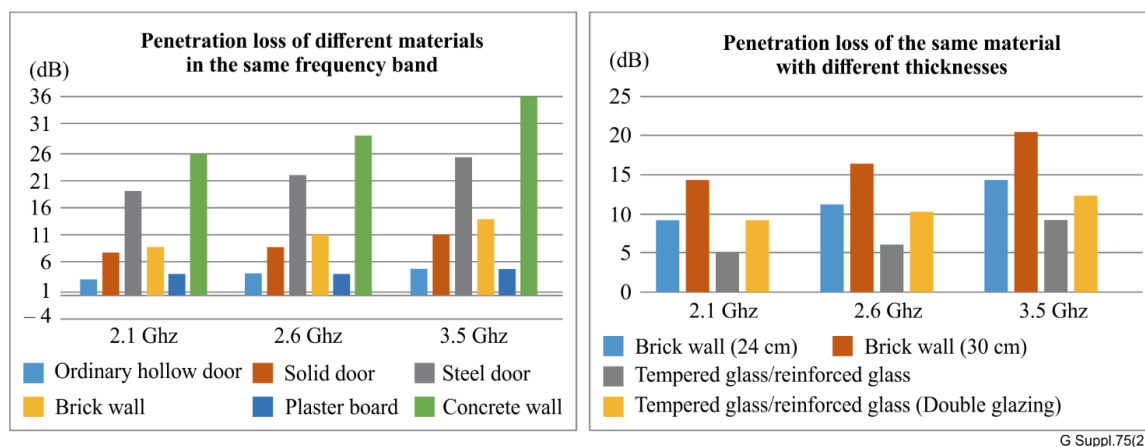
モバイルインターネット通信技術の発展と加入者の要求により、ますます多くのモバイルサービスが屋内で行われている。特に 5G 時代には、サービスの 85% 以上が屋内で行われるようになり、5G の屋内カバレッジの重要性が徐々に明らかになっている。

セルラ移動通信網に対して、屋外マクロ BS は領域のカバレッジを達成するための主要な手段である。し

かし、モバイルサービスは主に屋内であるため、屋外から屋内へ拡散すると無線信号の損失が生じる。屋内に到達する信号を介してモバイルサービスの品質を確保するために、BS の数を増やすことができる。BS 間の距離を減らす方法は、屋外伝送における信号損失を低減する。第二に、DIS (digital indoor system) の構築は屋内カバレッジ課題を直接解決する。ただし、DIS は一部の建物でのみ屋内のカバレッジを保証可能である。一般に、屋外の BS の方がマクロなカバレッジを提供するのに効果的である。従って、屋外信号による屋内深部のカバレッジの研究は非常に重要である [b-Zhang]。

屋外信号による屋内カバレッジとは、屋内カバレッジへ無線信号が浸透する、屋外マクロ BS による信号を意味する。屋内でのカバレッジ構築が不要なため、設備投資 (CAPEX) が少ないという利点がある。欠点はカバレッジ効果が低いことである。使用される周波数帯域が高く、また、透過損失が大きいため、屋内の信号強度を高くすることが困難であり、その結果、深いカバレッジの不足、サービス経験の不足、すなわち、カバレッジ範囲内で提供される QoE (Quality of Experience) の低下などの問題が発生する。しかし、屋外カバレッジでは、透過損失の影響を考慮して送信電力を増加させると、隣接セルへの干渉を引き起こす。

透過損失の計算は、[b-Zhang] [b-Zhou] [b-Lv] 及び [b-3GPP TR 38.901] に記載されている。図 9 及び表 8 に示すように、同一材料の透過損失は、周波数が増加すると増加するし、材料が異なれば同じ周波数であっても透過損失は異なる。異なる材料の物体は、周波数帯域が同じように変化しても、それによって生じる透過損失の変化の程度は異なる。同じ材料の場合も、厚さが透過損失の値に影響する。



G Suppl.75(21)

図 9- 異なる材料/厚さに対応する無線信号の透過損失

表 8- 異なる周波数帯における建物材料の浸透損失に関する試験データ [b-ZTE WP]

建物透過損失 (dB)	1800/2100 MHz	2600 MHz	3500 MHz
レンガ壁	10-15	11-18	12-20
コンクリート壁	20-30	22-32	25-35
漆喰壁	8-12	9-14	10-15
普通ガラス壁	2-5	4-6	5-8
薄い木製ドア	3-5	5-7	5-8

この条項の内容は、屋内の SC と屋外のマクロセルの間の 5G NR のサブ 6GHz (すなわち FR1) の比較である。透過損失が高すぎるため、ミリ波 (FR2) で屋外マクロセルを展開することはほとんどない。したがって、ミリ波 (FR2) の各 SC (または単独 SC) は屋外 SC または屋内 SC にすることができ、ミリ波マクロセルの配置は想定されない。5G ミリ波の透過損失の詳細は 10.5 節に記載されている。

## 6.5 スモールセルへの応用シナリオ

マクロステーションと比較して、スモールセル (SC) はより軽量で、より小型であるため、カムフラージュと隠蔽がより容易である。機密性の高いエリアへの展開に適している。

SCは主に非スポットとホットスポットを補完するために使用される。

SCの主な応用シナリオは人口密集地域であり、マクロ基地局では到達できない周辺通信をカバーする。SCはマクロ基地局に比べてサイズが小さいだけでなく、消費電力も少ない。

異なるタイプのSCは3GPPによって定義される、FR1(サブ6GHz)バンドとFR2(ミリ波)バンドに分けられる様々な周波数バンドをサポートする。展開に応じて、これらはライセンスバンド(MNOなど)、共用バンド(米国のCBRSスペクトルなど)、またはアンライセンスバンド(Wi-Fiネットワークで使用される2.4及び5GHz帯域など)がある [b-SCF238]。

[b-SCF238]に基づき、SCF市場分析は5Gのユースケースに適合する5GのSC環境を次のように分類した。

- 住宅用 (またはスモールオフィス/ホームオフィス (SOHO)): 屋内での導入。
- 屋内の企業用途: オフィススペース、商業用不動産、ホテル、医療施設など。これはさらに、中小企業と大企業に分けることが可能。
- 民間産業: 企業及び産業用アプリケーションをサポートする屋内/屋外のプライベートネットワーク [b-SCF235]。
- キャンパス環境: 屋内外の会場、工場、教育施設、競技場。
- 屋外の密集した都市での公共空間。
- 屋外の地方エリアでの公共空間。

表9に、これらの展開シナリオの主な特性を示す。

表9- 導入シナリオの主な特徴 [b-SCF238]

導入シナリオ	主な特徴
屋内住宅 (またはSOHO)	シングルSC 非常に低コスト 低消費電力と定格電力 最小サイズ/最小ボリューム 移動性が低い ユーザ数 (容量) が少ない 低スループットのセルフバックホール プラグ・アンド・プレイによるお客様による設置
屋内の企業用途(中小企業、大企業)	SCネットワーク さまざまなコスト: 低コストから中コスト 低-高 eMBB容量 無線ユニットのサイズ/ボリュームが小さい バックホール100 (小規模)–3000Mbit/s (大規模) メタル線 (小規模)/ファイバによるフロントホールインフラストラクチャ 低消費電力と低定格電力 中立的なホスト及びエッジコンピューティング [b-SCF234] お客様による設置(小規模) からプロフェッショナルによる設置(大規模)
民間産業: 屋内/屋外 [b-SCF235]	大容量 (eMBB及びmMTC) メタル線/ファイバでのフロントホールインフラストラクチャ ユースケースによって、高信頼性/低レイテンシ (Ultra Reliable Low-Latency Communication (URLLC) [b-SCF199]、Industry 4.0、エッジコンピューティング [b-SCF234]、潜在的に高いセキュリティ) を実現する可能性がある。 ライセンスバンド、アンライセンスバンド、または共用バンド (CBRS)

表9- 導入シナリオの主な特徴 [b-SCF238]

導入シナリオ	主な特徴
	MNO/中立ホスト/サードパーティネットワークプロバイダー
キャンパス: 屋内/屋外環境	大容量 eMBB メタル線/ファイバでのフロントホールインフラストラクチャ プロフェッショナルによる設置
密集した都市: 屋外の高密度都市での公共ネットワーク	大容量 eMBB プロフェッショナルによる設置 (MNO)
地方エリアの公共空間: 屋外ネットワーク	高いモビリティ 高カバレッジ (高出力定格) 理想的でない可能性のあるフロント/バックホール

## 6.6 まとめ

この章は、5G の SC システムの簡単なレビューである。これには、種類、アーキテクチャ、設置場所の課題と推奨されるソリューション、及びアプリケーションシナリオが含まれる。マクロステーションと SC の屋内カバレッジ能力の比較も紹介した。

## 7. スマールセルのバックホール及び無線アクセスポイントのミッドホールの要件

注:このトピックに関連する O-RAN WG9 及びMEF の作業は、引き続きフォロー及び検討する必要がある。

### 7.1 容量

ミッドホールである F1 インタフェースの特性は、バックホールの特性と類似している。その結果、バックホールと同じ方法を装置の容量設計に使用可能である。バックホール容量を決定するために 4G/LTE で広く使用されている方法論は、NGMN Alliance [b-NGMN LTE BH] によって記述されている。単一セル及び3セルの eNB の最繁忙時のバックホールトラフィックの平均値及びピーク値に基づいて、「ラストマイル」であるバックホールの設計を評価する。TDM-PON の光分散ネットワーク (optical distribution network: ODN) によってカバーされる集約エリアのトラフィック容量に基づいて伝送ネットワークの「集約」部分のバックホール容量を設計するため、これらの数値は推定可能である。

#### 7.1.1 単一基地局の推定モデル及び計算方法

[b-NGMN LTE BH] の 3 章に記載された図 10 に示すように、バックホールトラフィックは、ユーザプレーントラフィックに加えて、複数の構成要素がある。

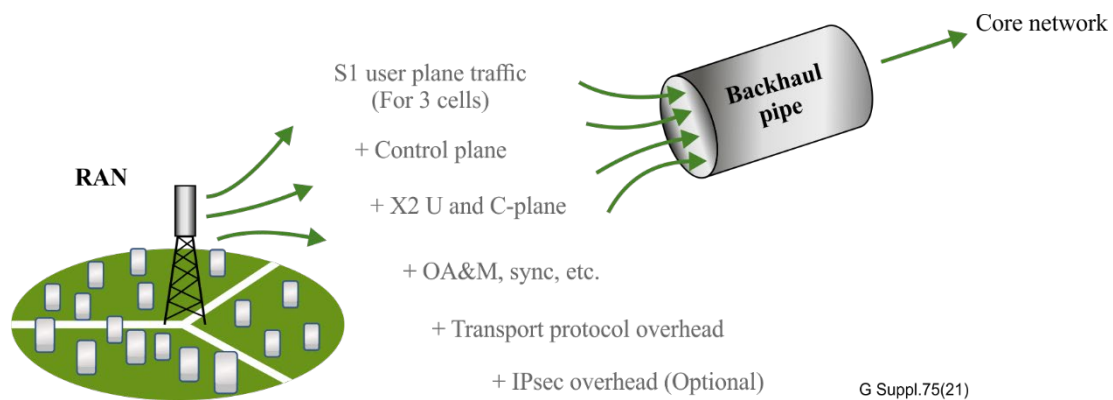


図 10- バックホールトラフィックの構成要素 [b-NGMN LTE BH]

最適化されたバックホールグループは、次のような前提条件になる。

- X2 トラフィック: これらの数値の控え目な平均値として 4%を使用することが合意された

- コントロールプレーン、運用管理 (operation, administration and maintenance: OAM) 及び同期シグナリング: 関連するユーザプレーントラフィックと比較すると、これらは無視可能。
- トランスポートプロトコルのオーバーヘッド: 一般的なケースを表すために 10%を使用する。
- IPSec: NGMN のバックホールグループは、IPSec カプセル化セキュリティペイロード (encapsulating security payload: ESP) により、トランスポートプロトコルのオーバーヘッドとして 14%を追加することを前提とする (合計で 25%になる)。

[b-NGMN LTE BH] の 4.1 節では、式に関して 2 つの選択肢が提供されている。

下限ではピーク値は相関していないが、最繁忙時の平均値がすべてのセルに同時に適用されると仮定する。したがって、N 個の eNB に対する設定は、単一セルでのピーク値または N×最繁忙時の平均値のうち、大きい方であり、次のようになる。

$$N \text{ 個のセルに対する設定の下限} = \text{Max}(\text{peak}, N \times \text{busy time mean}) \quad (1)$$

この方式は、「下位の想定方式」と呼ばれている。

さらに保守的なアプローチは、1 つのセルがピーク値に達している間、他のセルが最繁忙時の平均レートでトラフィックを生成していると仮定することである。

$$N \text{ 個のセルに対する保守的な下限} = \text{Max}(\text{peak} + (N-1) \times \text{busy time mean}, N \times \text{busy time mean}) \quad (2)$$

この方式は「保守的な想定方式」[b-NGMN LTE BH] と呼ぶことができる。

上記のガイドラインと NGMN から公開されている他のホワイトペーパーは、容量設計ガイドライン [b-NGMN BH REQ] [b-NGMN E2E ARC] としてモバイルコミュニティに広く受け入れられている。しかし、問題は、これらのガイドラインが 5G NR に適用できるかどうかである。

[b-IMT-2020 B REQ] に基づき、下位の想定方式を追加するなどの改訂作業を行い、表 10 は必要容量の推計のためのいくつかの方法、仮定、そして値を示している。

表 10- 単一局での評価方法と前提パラメータモデル [b-IMT-2020 B REQ]

パラメータ	低周波数での5G	高周波数での5G
スペクトルリソース	3.4~3.5 GHz、100 MHz帯域幅	28 GHz以上、800 MHz帯域幅
BSの構成	3セル、64T64R (注: マクロステーション) 8つの「論理」レイヤ (注: MIMOレイヤの数)	3セル、4T4R (注: ミリ波でのSC)
スペクトル効率	ピーク 40 bit/s/Hz、平均 7.8 bit/s/Hz	ピーク 15 bit/s/Hz、平均 2.6 bit/s/Hz
その他のパラメータ	10%のフレーミングオーバーヘッド、5%の Xnトラフィック、1:3 のTDD UL/DL	10%のフレーミングオーバーヘッド、1:3 のTDD UL/DL
単一セルのピーク帯域幅 a	100 MHz × 40 bit/s/Hz × 1.1 × 0.75 = 3.3 Gbit/s	800 MHz × 15 bit/s/Hz × 1.1 × 0.75 = 9.9 Gbit/s
単一セルの平均帯域幅 b	100 MHz × 7.8 bit/s/Hz × 1.1 × 0.75 × 1.05 = 0.675 Gbit/s (Xnトラフィックは主に平均的なシナリオで発生)	800 MHz × 2.6 bit/s/Hz × 1.1 × 0.75 = 1.716 Gbit/s (高周波数の基地局は主に電波の悪いスポットとホットスポットに使用される。Xnトラフィックは、低周波数の基地局でのみカウントされている)
「保守的な想定方式」における単一局のピーク帯域幅 c	3.3 + (3-1) × 0.675 = 4.65 Gbit/s	9.9 + (3-1) × 1.716 = 13.33 Gbit/s
「下位の想定方式」における単一局のピーク帯域幅 d	3.3 Gbit/s	9.9 Gbit/s
単一局の平均帯域幅 e	0.675 × 3 = 2.03 Gbit/s	1.716 × 3 = 5.15 Gbit/s

表 10- 単一局での評価方法と前提パラメータモデル [b-IMT-2020 B REQ]

a)	単一セルの帯域幅=スペクトル幅×スペクトル効率×(1+フレーミングオーバーヘッド)×TDD DL比
b)	単一セルの帯域幅=スペクトル幅×スペクトル効率×(1+フレーミングオーバーヘッド)×TDD DL比×(1+Xn)
c)	「保守的な想定方式」における単一局のピーク帯域幅 = シングルセルのピーク帯域幅 × 1 + シングルセルの平均帯域幅 × (N-1)
d)	「下位の想定方式」における単一局のピーク帯域幅 = シングルセルのピーク帯域幅
e)	単一局の平均帯域幅 = シングルセルの平均帯域幅×N

注 1- LTE 用 NGMN の方法では、X2 トラフィックの控え目な平均値として 4%が使用される。

注 2- 「BS の構成」の行は、両方の「ケース」で 3 セル BS である。これは、より低い周波数を有する典型的なマクロステーションを表している可能性があるが、より高い周波数及び/または SC では BS 当たり単一 (全方向または 180°) セルもあり得る。したがって、高周波の単一セル/セクタ BS を一例として示す必要もある。単一 (全方向性または 180°) セルのスペクトル効率と容量はさらなる研究が必要である。

注 3- スペクトル効率

表 10 から分かるように、スペクトル効率は容量要件を見積もる際の重要なパラメータである。スペクトル効率は多くの要因に関係しており、[b-ITU-R SM.1046-3] を計算して選択するには十分に検討する必要がある。

注 4- 統合された 4G+5G ベアラのシナリオ

5G 構築の初期段階において、ベアラ網は 4G と 5G の BS を同時に運用する可能性がある。このとき、計算モデルと計算式は同じである。ただし、4G の BS のスペクトル効率の違いに注意すること。いくつかの論文では、4G の BS の平均帯域幅は 0.15 Gbit/s であり、ピーク帯域幅は 0.9 Gbit/s であると述べており、さらなる研究が必要である。

フロントホール (FH) /ミッドホール (MH) /バックホール (BH) のセグメントでは、アップリンク (UL) /ダウンリンク (DL) のトラフィックの比率がそれぞれ異なる。FH セグメントでは、シグナリングのための大量のトラフィックが存在するため、UL のトラフィック量は DL のトラフィック量に近くなる。一方、パッシブ光ネットワーク (PON) では、UL/DL の能力が異なる。

- XGS-PON、10GEPON (対称) 及び [b-ITU-T G.9804.x] (50G UL/50G DL: 検討中) では 1:1
- 10GEPON (非対称) では 1:10 に近い値
- XG-PON と [b-ITU-T G.9804.x] (12.5 G UL/50 G DL) ではほぼ 1 対 4
- [b-ITU-T G.9804.x] (25G UL/50G DL) ではほぼ 1:2

実際に測定された UL/DL トラフィックの比率は、XG-PON が MH/BH セグメントに使用できるかどうかを決定可能であり、UL/DL トラフィックの測定、監視、及び統計情報が必要である。

今後、実際の測定値に基づくより適切な比が存在すれば、本節の推定方法に用いることが可能である。

アップストリーム帯域の計算及び推定では、表 10 に示す次の 2 つの式を使用可能である。

- 単一セルのピーク帯域における場合:  
単一セルの帯域幅 = スペクトル幅 \* スペクトル効率 \* (1 + フレーミングオーバーヘッド) \* 時分割デュプレックス (TDD)での DL 比率
- 単一セルの平均帯域幅における場合:  
単一セルの帯域幅 = スペクトル幅 \* スペクトル効率 \* (1 + フレーミングオーバーヘッド) \* TDD での DL 比率 \* (1 + Xn)

UL を計算する場合:

- 1) 「スペクトル幅」は DL と同じ。
- 2) 「周波数利用効率」: UL/DL のアンテナ数、ストリーム数(すなわち MIMO 層) は以下の通りである。

- 64T64R のマクロ BS の場合、DL ストリームは通常 16 で、UL ストリームは通常 8 である
  - 4T4R を備えた SC の場合、最大 DL ストリームは通常 4 で、UL ストリームは通常 2 である
  - 2T2R の SC の場合、DL ストリームは通常 2 で、UL ストリームは通常 2 である
- 3) TDD の DL 比率を TDD の UL 比率に変更する。
  - 4) 「フレーミングオーバーヘッド」については、信頼できるパラメータを見つけるか、テストする必要がある。
  - 5) 「Xn」に関しては、信頼できるパラメータを見つけるか、テストする必要がある。

## 7.1.2 エリアトラフィック容量のシミュレーション及びモデル

### 7.1.2.1 [b-ITU-R M.2410-0] での定義

ピーク周波数利用効率: チャンネル帯域幅 (bit/s/Hz) で正規化した理想的な状態における最大データレート。ここで最大データレートとは、1 つの移動局に割当て可能な、誤りのない状態を想定した受信データビットであり、対応するリンク方向の割当て可能なすべての無線リソースが利用される (すなわち、物理層の同期、基準信号またはパイロット、ガードバンド及びガードタイムに使用される無線リソースは除く)。

5G-NR の最大周波数効率は、5G NR で定義された最大 MCS (Modulation and Coding Scheme) として 7.4036 bit/s/Hz であると 3GPP によって計算されている。これは、[b-3GPP TS 38.214] の表 5.1.3.1-2 の MCS 27 であり、256 QAM 信号空間 (コンステレーション)、すなわち変調次数  $Q_m=8$  及び符号化率  $R_{max}=948/1024=0.925$  を使用する。

ピークデータレート: 1 つの 5G NR の SC に割当て可能な誤りなし条件における受信データビットであるピーク周波数利用効率(bit/s)の理想的な条件において、対応するリンク方向の割当て可能な無線リソースをすべて利用した場合に実現可能な最大データレート (すなわち、物理層の同期、基準信号またはパイロット、ガードバンド及びガードタイムに使用される無線リソースは除く)。

ピークトラフィック要件は、キャリア帯域幅及び「MIMO レイヤ」と呼ばれる送信受信ポイント(TRxP) のレイヤによって線形にスケールされる。mMIMO を使用すると、より多くのアンテナで複数のデータストリームとビームフォーミングをサポートできる。FR1 (450 MHz から 6 GHz) では、5G において 5MHz から 100MHz の帯域幅を使用する。FR2 (24.25–52.6 GHz) では、5G において 50MHz から 400MHz を使用する。これにより 5G システムにおいて、標準的な帯域幅を FR1 では 100MHz まで、FR2 では 400MHz までと想定することができる。

ユーザ体験データレート: 5 パーセントイルのユーザのスペクトル効率は、正規化されたユーザスループットの累積分布関数 (cumulative distribution function: CDF) の 5% の点である。正規化されたユーザスループットは、正しく受信されたビットの数、すなわち、ある期間にレイヤ 3 に配信されたサービスデータユニット (service data unit: SDU) に含まれるビットの数として定義され、チャンネル帯域幅で分割され、単位 bit/s/Hz として測定される。

平均スペクトル効率: 全ユーザのスループット (正しく受信されたビット数、すなわち、一定期間にレイヤ 3 に配信される SDU であるバックホールパケットのデータに含まれるビット数) の集計値を、特定帯域のチャンネル帯域幅と、MIMO レイヤ数で割った値であり、単位 bit/s/Hz/「MIMO レイヤ」として測定される。SDU は、レイヤ 2 フレームのデータセクションにあるユーザ情報またはサービス情報 (バックホールパケットなど) を意味する。この情報自体は、レイヤ 3 プロトコル (IP など) に従ってフレーム化されたバイトである。したがって SDU は、レイヤ 3 フレームとして扱われる情報として処理している。レイヤ 2 フレームの残りの部分は、レイヤ 2 固有のオーバーヘッドのバイトと見なされる。

エリアトラフィック容量: 地理的エリアごとの総トラフィックスループット(単位: Mbit/s/m<sup>2</sup>)。スループットは、正しく受信されたビット数、すなわち、一定期間にレイヤ 3 に配信された SDU に含まれるビッ



ト数である。

$W$  をチャネル帯域幅、 $\rho$  を MIMO レイヤとする。エリアトラフィック容量  $C_{\text{area}}$  は、式 (3) を介して平均スペクトル効率  $SE_{\text{avg}}$  に関係する。

$$C_{\text{area}} = \rho * W * SE_{\text{avg}} \quad (3)$$

伝送オーバーヘッド: バックホール N3 及びミッドホール F1 のユーザプレーンは、SDU (IPv4、IPv6、IPv4v6、イーサネット、または非構造化のもの)を伝送するために GTP-U [b-3GPP TS.29.281] を使用する。したがって、構造とフレームサイズの組み合わせによっては、11-30%のオーバーヘッドが追加される場合がある。寄書でさらに説明されている TDM-PON での伝送では、一般的に使用されている imix (64 バイトの 7 パケット、598 バイトの 4 パケット、及び 1522 バイトの 1 パケット) を使用した VLAN を使ったイーサネット伝送が、一般的な展開オプションであると想定している。したがって、バックホールとミッドホールの両方のケースにおいては、エリアトラフィック容量に対し 20%の伝送オーバーヘッドが加わることを想定している( $C_{\text{area}} * 1.2$ )。

### 7.1.2.2 エリアトラフィック容量のシミュレーション及びモデル

2019 年 10 月にデュッセルドルフで開催された ITU-T SG15/Q2 の会議で、Nokia のベル研究所が次のシミュレーションモデルを発表した [b-ITU-T D071]。NGMN Alliance は、ユーザデータの統計的なトラフィックを想定した数値解析結果に基づいて、LTE ネットワークにおける総バックホール容量の算出ガイドラインを公表している [b-NGMN LTE BH]。Nokia のベル研究所の論文 [b-Bidkar] では、詳細な xHaul のトラフィック分析 ( $C_{\text{area}}$ ) については、3GPP [b-3GPP TR 36.814] で規定されているようにシステムレベルの無線シミュレーションを使用して実行されるが、ミッドホールの統計的トラフィック要件の理解を深めるために、5G-NR の数値計算を使用している [b-3GPP TS 38.104]。3D チャネルモデルを使った [b-3GPP TR 36.814] からのアーバンマクロセル (urban macro cell: UMa) シナリオでは、5G NR FR1 (サブ 6GHz)一周波数分割複信 (frequency division duplex: FDD)、100 MHz、30 kHz の SCS (Subcarrier Spacing)、4x4 MIMO 無線構成という条件でシミュレーションが行われた。この UMa シミュレーション環境では、通常の六角形レイアウトが使われている。各サイトには 3 つのセクターがある。UMa に関しては、gNB は高さ 25 m に配置され、サイト間距離は 500 m である。F1 インタフェースにおけるこの構成の単一 SC は完全なチャネル条件を想定しており、理論的に計算されたピークトラフィック要件は、約 1.94 Gbit/s (オーバーヘッドを除く) になる。

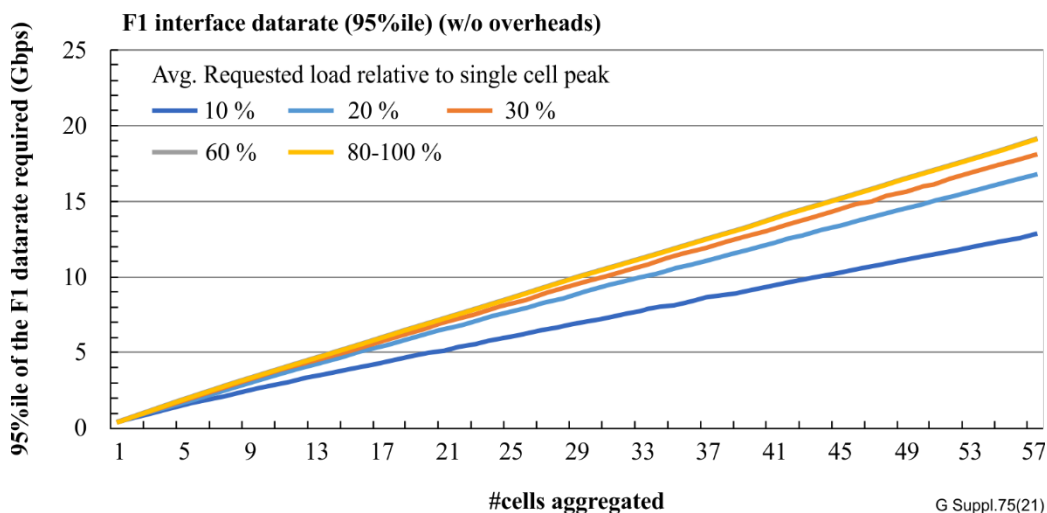


図 11- 5G NR (3GPP 3D-UMa) に基づく F1 ミッドホールエリアのトラフィック容量のシミュレーション

図 11 は、想定する無線構成において、集約した SC の数 (セル = マルチセクターのマクロセルサイトのセクター) の関数に対する F1 ミッドホールエリアにおけるトラフィック容量 ( $C_{\text{area}}$ ) を示している。F1 エリ

アトラフィックの要件は、エリア(すなわち、集約したセルの数)が増加すると、指定された要求負荷に対して直線的に増加する。同種のセルラーネットワークシミュレーションのシナリオにより、各セルに対する同様のチャンネル条件とユーザトラフィックの要求によってこのようになる。

## 7.2 レイテンシ

レイテンシ (遅延) の要件 (図 12 参照) は、式 (4) で表すことができる。

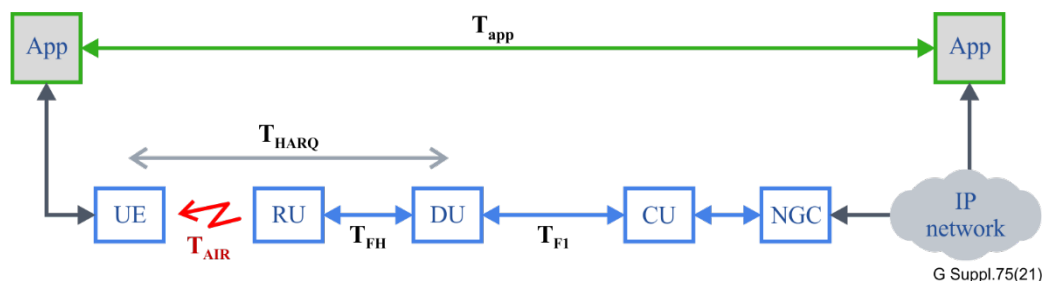


図 12- レイテンシ(遅れ) の要件

$$T_{app} = T_{UE} + T_{AIR} + T_{RU} + T_{FH} + T_{DU} + T_{F1} + T_{CU} + T_{BH} + T_{NGC} + T_{SRV} \quad (4)$$

さらに

$$T_{HARQ} \leq T_{UE} + T_{AIR} + T_{RU} + T_{FH} + T_{DU} \quad (5)$$

定義は次のとおりになる。調査する必要がある 2 つの異なるレイテンシの要件として、スケジューリングレイテンシとアプリケーションレイテンシがある。

スケジューリングレイテンシ: スケジューリングレイテンシは、スケジューリングタスクが原因でシステムの生産性が低下してしまう時間である。スケジューリングレイテンシについては、「system」ごとに次に示す時間を考慮する必要がある。すなわち、 $T_{UE}$  - ユーザ機器;  $T_{AIR}$  - 無線スペクトル;  $T_{RU}$  - RU;  $T_{FH}$  - FH 伝送;  $T_{DU}$  - DU (ベースバンド機能);  $T_{F1}$  - MH 伝送;  $T_{CU}$  - CU (ベースバンド機能);  $T_{BH}$  - BH 伝送;  $T_{NGC}$  - コア機能;  $T_{SRV}$  - アプリケーション機能、である。

エアインタフェースにおけるレイテンシ ( $T_{air}$ ) は、UL は  $t_4 - t_3$ 、そして DL は  $t_{12} - t_{11}$  として定義される。これは RU と UE との間のパケット伝送時間であり、主に物理層の通信 (空中のスペクトル) によるものである。空中で伝送する時間と伝搬遅延も寄与する。空中インタフェースを介した無線伝送は、しばしば過酷な無線環境で行われる。無線信号は、パス損失や干渉によって劣化しやすく、セルエッジでは伝送エラーが発生しやすくなる。伝搬遅延は、伝搬に対する障害物 (建物、樹木、丘など) 及び RF 信号によって移動した総距離に依存する。

gNB での処理時間の要素 (ベースバンド処理) は、 $T_{RU}$ 、 $T_{DU}$  及び  $T_{CU}$  からなり、UE では  $T_{UE}$  で、これはチャンネル符号化、レートマッチング、スクランプリング、巡回冗長検査 (cyclic redundancy check: CRC) 付加、プリコーディング、変調マップ、レイヤマップ、リソース要素マップ、及び OFDM 信号生成から成る。一方、UE における UL 処理には、CRC 付加、符号ブロック分割、符号ブロック連結、チャンネル符号化、レートマッチング、データ/制御多重化、チャンネルインターリーブが含まれる。

伝送システム遅延 ( $T_{FH}$ 、 $T_{F1}$  または  $T_{BH}$ ) は、(通常は) 光ファイバケーブルを通る信号の伝搬遅延または「飛行時間」が、その伝送ネットワーク内の任意のパケットスイッチを通る信号トラバーサルレイテンシ (パケット処理遅延) に追加される。

$T_{BH}$ : BH 伝送でのレイテンシ。BH (5G NR N2/N3 インタフェース) の場合、伝播及びパケット処理により起こるレイテンシの制約は、Transmission Control Protocol (TCP) のスロースタートに起因し、8 ms の RTT が必要である。

$T_{F1}$ : MH 伝送でのレイテンシ。F1 インタフェース [b-3GPP TS 38.47x] により起こるレイテンシの制約は、[b-3GPP TR 38.801] のオプション 2 の BH インタフェースの場合と同じ 1.5-10 ms である。さらに、F1 でのレイテンシは CoMP 機能の適用可能性に大きく依存するため、適用可能な CoMP 処理のタイプ及び関連するパフォーマンスが制約となる [b-3GPP TS 38.47x]。CoMP の展開は、遠隔無線アクセスポイント (RAP) が調整されるときに、MH にいくつかの制約を設定する。X2 インタフェース上のシミュレーション [b-3GPP TR 25.912] [b-Artuso] は、レイテンシ無しの理想的な場合における CoMP の最大達成可能利得と比較して、レイテンシによる CoMP 効率または損失に対するレイテンシへの影響を示した。したがって、1 ms 未満の MH ネットワークのレイテンシの値は、レイテンシが 5 ms に達すると、徐々に 25%にまで減少するが、120%を超えるゲインを保証する。待ち時間のより高い値 (10 ms と 20 ms) は、協調のない場合と比較して、システムスループットの損失につながる CoMP 同時伝送 (JT) の性能に劇的に影響する。したがって、レイテンシが 5 ms 未満、理想的には 1.5 ms 未満の F1 インタフェースが指定される。

$T_{HARQ}$ : ハイブリッド自動反復要求 (hybrid automatic repeat request: HARQ) のループ無線アクセスのレイテンシの要件。TDD LTE の HARQ ACK/NACK のタイミングは、あらかじめ定義されたテーブルで指定される。したがって、TDD NR では、HARQ acknowledgement (ACK)/non-acknowledgement (NACK) のタイミングは、パラメータ K1 を指定することにより、特定の物理ダウンリンク共有チャネル (physical downlink shared channel: PDSCH) に対して完全に制御できる。[b-3GPP TS 38.331] にあるように、K1 の最大値は 15 である。

ただし、 $T_{HARQ}$  は (式 (5) に示すように) BH 及び MH の範囲外であるため、本文書ではこれ以上考慮しない。

$T_{FH}$ : これは LLS FH 伝送のレイテンシである。eCPRI 及び [b-O-RAN CUS] では、 $T_{12}$  (下り) 及び  $T_{34}$  (上り) と定義されている。図 13 [b-O-RAN CUS] を参照。[b-O-RAN CUS] の Annex B では、図の  $T_{xx}$  のタイミングで HARQ ループがどのように分解されるかを詳細に説明している。

図 13 に遅延管理の基準点の定義を示す [b-O-RAN CUS]。

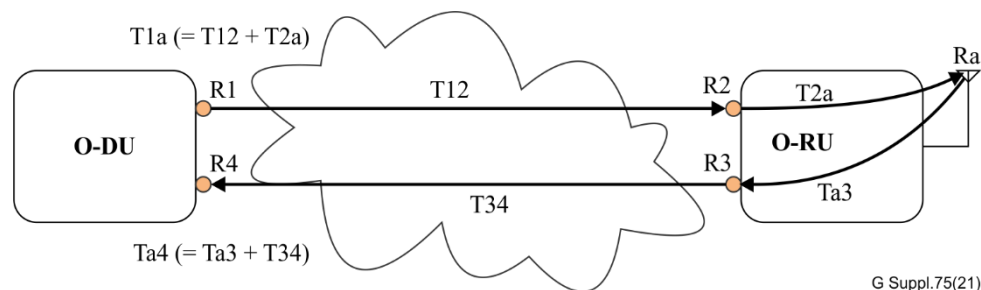


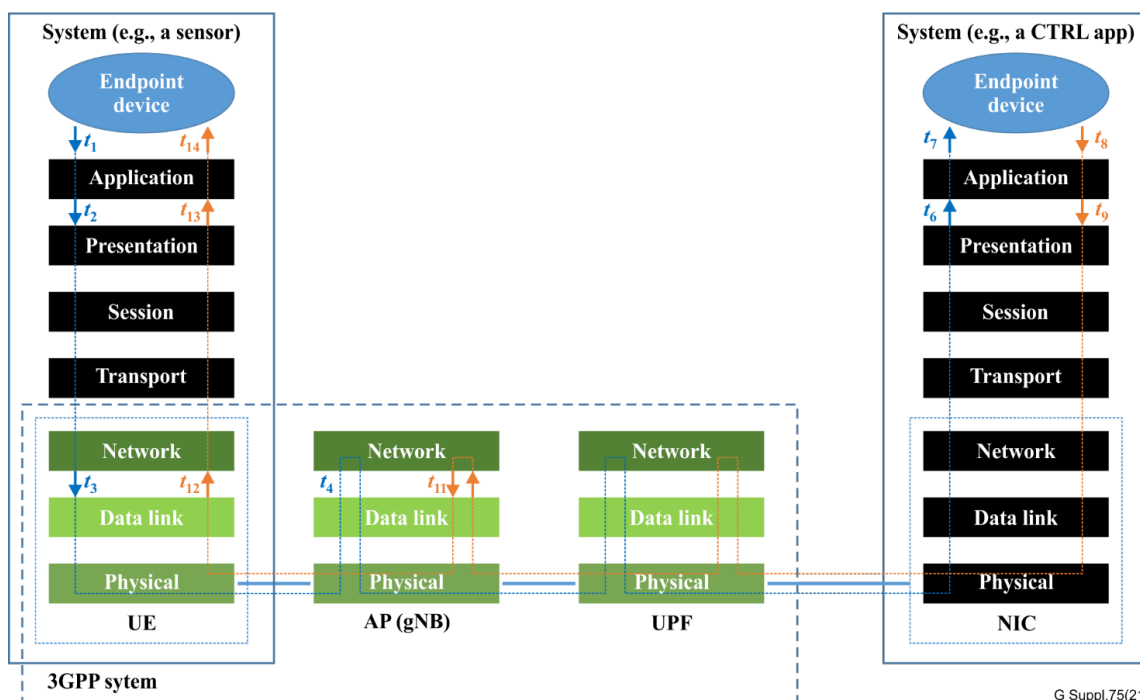
図 13- 遅延管理の基準点の定義 ([b-O-RAN CUS] の図 B-1)

ただし、 $T_{FH}$  はフロントホールであるため、本文書ではこれ以上は考慮しない。

$T_{NGC}$  は 5G 次世代コア (next generation core: NGC) ネットワークの処理時間である。これは、モビリティ管理エンティティ (mobility management entity: MME)、サービング GPRS サポートノード (serving GPRS support node: SGSN)、ソフトウェア定義ネットワーク (software-defined networks: SDN)/ネットワーク機能仮想化 (network function virtualization: NFV) など、さまざまなコアネットワークエンティティによって提供される。コアネットワークの処理ステップには、非アクセス層 (non-access-stratum: NAS) のセキュリティ、進化型パケットシステム (evolved packet system: EPS) のベアラ制御、アイドル状態のモビリティ処理、モビリティアンカー、UE の IP アドレス割り当て、及びパケットフィルタリングが含まれる。

アプリケーションレイテンシ ( $T_{app}$ ): アプリケーションレイテンシは E2E で定義される。その時間は、送信元エンドポイントデバイスから送信先エンドポイントデバイスに特定の情報を転送するために必要な時間である。これは、アプリケーションサービスアクセスポイントで測定され、送信元エンドポイントデバイスによって送信された時点から、送信先エンドポイントデバイスで正常に受信されるまでの時間である。図

14 [b-NGMN Verticals] での、 $t_1-t_7$  と  $t_8-t_{14}$  が E2E レイテンシである。



注:  $t_5$  はユーザプレーン機能 (user plane function: UPF) 内の青い線のレイテンシで、 $t_{10}$  は UPF 内のオレンジ色の線のレイテンシで、アクセスポイント (access point: AP) (gNB) 内と同様である。

図 14- レイテンシの定義の基準点([b-NGMN Verticals] の図 2)

5G NR の SC のために、アプリケーションレイテンシ ( $T_{app}$ ) がある。3GPP は 5G のユースケースを、eMBB、mMTC、URLLC という 3 つのカテゴリに分類している。垂直的な関係のある業界のユースケースでは、さまざまな標準開発組織や業界コンソーシアムによって研究されている。しかし、ユースケースがどのカテゴリに属するかは明確ではない。たとえば、eMBB と URLLC の両方を必要とするユースケースもある。表 11 [b-NGMN Verticals] は、垂直な URLLC サービスの  $T_{app}$  である E2E レイテンシ (またはラウンドトリップ時間 (round-trip time: RTT)) を示している。

表11- さまざまなレイテンシアプリケーションの位置づけの図 [b-NGMN Verticals]

ユースケースグループ	ユースケース例	E2e レイテンシ	ジッタ	ラウンドトリップ時間	E2e 信頼性	ネットワーク信頼性	ユーザが経験したスループット	ネットワークスループット	可用性	時刻同期精度	デバイス/接続密度
AR/VR	高生産性 (Argumented) 労働者	10ms			99.9999%						
	VRビューブロードキャスト			20ms 未満	99.999%		40-700 Mbit/s				3000 /km <sup>2</sup>
触覚相互作用	クラウドゲーム	7ms 未満 (アップリンク)			99.999%		1 Gbit/s				3000 /km <sup>2</sup>
エネルギー	差分保護	15ms 未満	160μs 未満		99.999%		2.4 Mbit/s			10 μs	10-100 /km <sup>2</sup>
	FISR	25ms 未満					10 Mbit/s				10 /km <sup>2</sup>
	障害位置の識別	140ms	2 ミリ秒		99.9999%		100 Mbit/s			5 μs	10 /km <sup>2</sup>
	発電・配電系統障害の発生	30ms 未満				0.999:99	1 Mbit/s		99.999%		2000 /km <sup>2</sup> 未満

表11- さまざまなレイテンシアアプリケーションの位置づけの図 [b-NGMN Verticals]

ユースケースグループ	ユースケース例	E2eレイテンシ	ジッタ	ラウンドトリップ時間	E2e信頼性	ネットワーク信頼性	ユーザが経験したスループット	ネットワークスループット	可用性	時刻同期精度	デバイス/接続密度
未来の工場	先進産業用ロボット	2ms 未満		30ms 未満のタスクプランナ; 1-5ms 未満のロボット制御	99.999%から99.999%						
	AGV制御	5ms			99.999%		100 kbit/s (DL) 3-8 Mbit/秒アップリンク				
	ロボット金型製造	1ms ロボット動作制御; 1-10ms マシン制御	<50%		99.999%						
UAV	UTM 接続				99.999%		<128 bit/s				
	コマンド&制御	100ms 未満			99.999%						
	ペイロード	アプリケーション依存									
位置計測配信	スマートファクトリーでのAR	15ms 未満							99.9%		
	製造業におけるインバウンド物流	10ms 未満							99.9%		

たとえば、VR サービス [b-NGMN Verticals] はカテゴリ 2 (1-10ms) であり、IETF ではさらに個別に詳細化されている [bIETF TS AR&VR]。

AR/VR の開発者は、一般的に、ユーザの動作が画面に反映されるまでのシステム遅延 (motion to photon: MTP) レイテンシが約 20ms 未満では、感知できなくなることに同意している [b-IETF TS AR&VR] (図 15 を参照)。レイテンシが 20ms を超えると、視覚的なエクスペリエンスが低下するだけでなく、仮想現実の不具合が発生する傾向がある。これはサイバー病としても知られており、全身の不快感、頭痛、吐き気、嘔吐、見当識障害など、乗り物酔いやシミュレーター病に似た症状を引き起こす可能性がある。最もローカライズされた AR/VR システムは、ヘッドマウントディスプレイ (head-mounted display: HMD) のセンサー検出、表示更新、GPU 処理の速度を大幅に向上させ、ローカライズされた AR/VR の MTP レイテンシ時間を 20ms 未満にした。しかし、ネットワークベースの AR/VR の研究は始まったばかりだ。この場合、図 15 に示すように、E2E ラウンドトリップ遅延を 20ms 以内にする必要がある。

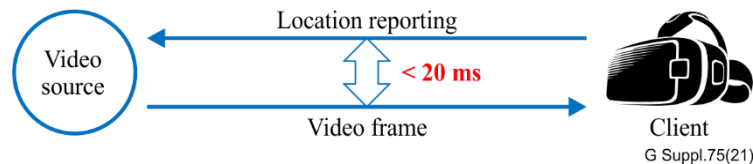


図 15- MTP RTT または  $2 \times T_{app}$  [b-IETF TS AR&VR]

この  $T_{app}$  のバジレットは、すべての伝播遅延、スイッチング遅延及びキューイング遅延の合計 ( $T_{UE} + T_{AIR} + T_{RU} + T_{FH} + T_{DU} + T_{F1} + T_{CU} + T_{BH} + T_{NGC} + T_{SRV}$ ) によって消費される。ネットワークデバイス ( $T_{FH} + T_{F1} + T_{BH}$ ) の合計遅延バジレットは、低い桁 ms、すなわち、すべてのネットワークデバイスに許容される

累積最大遅延 (往復) は、約 2 から 4ms である。これは、このアプリケーションのパス上にあるすべてのネットワークデバイスの片方向遅延が 1 または 2ms に相当する。

### 7.3 時間及び周波数の同期

#### エアインタフェース周波数誤差

BH 及び MH 伝送ネットワーク (transport network: TN) では、すべての SC がエアインタフェース周波数誤差要件として  $\pm 50$  ppb を満たすべきである。[b-3GPP TS 38.104] (5G NR 用) では、4G LTE と 5G NR の両技術において 1ms 期間の短期平均誤差として  $\pm 50$  ppb を規定している。この BH 及び MH TN 内では、すべてのネットワーク要素 (NE) が入力及び出力のジッターとワンダーの要件を規定する [b-ITU-T G.8262] (イーサネット機器クロック (Ethernet equipment clock: EEC) 向け)、ネットワーク間の同期イーサネット (SyncE) に対応する必要がある。

フロントホールインタフェース ([b-IEEE 802.1 CM] で定義) は、[b-ITU-T G.8262.1] (拡張 EEC (eEEEC) 向け) に準拠するために、SyncE クロック仕様を必要とする。eEEEC の使用が推奨されるのは、通常動作時及びネットワークの再編成時に発生するノイズが少なく、与えられた時間誤差バジェット (7.3 節参照) を満たしながら、より多くのホップ数を許容できるためである。ただし、本文書では FH についてはこれ以上考慮しない。

#### エアインタフェース最大時間誤差

現在世界中で運用されている商用 5G ネットワークの多くは、TDD を使用している。TDD 無線フレームは、本質的に、干渉及び関連するトラフィックの損失を防ぐために、無線 BS 間の時間と位相の調整を必要とする。時間同期は、異なる無線調整機能が使用される場合、FDD ネットワークでも必要である。[b-ITU-T G.8271] で規定されているように、基本的な NR TDD に必要な時間誤差は、同期二重接続、MIMO または送信 (TX) ダイバーシティによるバンド内非隣接及びバンド間キャリアアグリゲーションを含め、5G NR の TDD に対しては  $1.5\mu\text{s}$  である [b-Ruffini]。これらの特徴及び関連するタイミングの要件は、単一のオペレータネットワーク内で適用可能であり、その結果、機能によって使用されるアンテナ間の相対時間誤差の制御としては十分である。TDD ユニキャストの領域が隔離されていない場合、3GPP は標準タイミング基準 (universal time coordinate: UTC) へのトレーサビリティが必要であると規定している。これにより、エリアが重複する異なるネットワークで発生する無線フレームの位相合わせが可能となるため、隣接する周波数帯を使用する異なるネットワーク間や国境間での干渉を防止できる。

5G の導入は、4G TDD に対する無線ネットワーク同期要件に基本的な変化を引き起こさなかったが、いくつかのアプリケーションは、5G ノードの同期に、より厳しい局所精度要件を課すかもしれない。例を [b-Ruffini] に見ることができる。しかしながら、位置に基づくサービスといくつかの協調機能を含む様々な応用は、5G NR の RU のクラスタに対して異なる精度レベルで扱われる可能性がある。これらの機能の一部の性能要件は現在調査中である。参考までに、 $500\text{ns}$  から  $1.5\mu\text{s}$  の間の値でいくつかの特徴について言及されている。3GPP によって開発される最終仕様にもよるが、クラスタに対するこの追加精度レベルを、表 12 にリストされているさらに三つのサブクラスに分類することが可能である。FR1 アプリケーションのみを考慮すると、時間誤差要件は最大相対時間誤差要件として少なくとも  $260\text{ns}$  を満たす必要がある。3GPP の用語では、時間整合誤差 (time alignment error: TAE) に相当する。

表 12- クラスタ・ベースの同期化に必要な時間と位相 ([b-ITU-T G.8271] からコピーされたデータ)

精度のレベル	最大相対時間誤差要件	一般的なアプリケーション (参考)
4A	$3\mu\text{s}$	5G NR のバンド内の非連続 (FR1 のみ)、及びバンド間のキャリアアグリゲーション; MIMO または TX ダイバーシティの有無は無関係。



表 12- クラスタ・ベースの同期化に必要な時間と位相 ([b-ITU-T G.8271] からコピーされたデータ)

精度のレベル	最大相対時間誤差要件	一般的なアプリケーション (参考)
6A	260ns	5G NR のバンド内での連続 (FR1 のみ)、及びバンド内の非連続 (FR2 のみ) のキャリアアグリゲーション。MIMO または TX ダイバーシティの有無は無関係。
6B	130ns	5G NR (FR2) のバンド内隣接キャリアアグリゲーション。MIMO または TX ダイバーシティの有無は無関係。

最大相対時間誤差要件は、クラスタの任意の 2 つの要素間で測定された最大タイミング差を表す。クラスタ内での要件の指定方法については、[b-ITU-T G.8271.1] の Appendix VII を参照。

図 16 に、ネットワークの時間誤差 |TE| 対エアインタフェースの時間アラインメント誤差 |TAE| を定義する基準点と、相対と絶対の対立概念を示す。

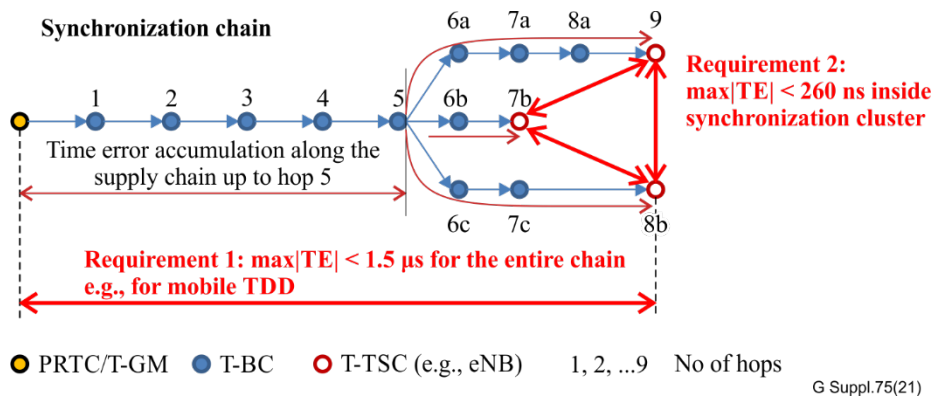


図 16- 相対時間誤差の図

伝送網 (TN) のクロックチェーン内の各ネットワーク要素は、時間誤差 (一定時間誤差 (constant time error: cTE) 及び動的 dTE<sub>H</sub>、dTE<sub>L</sub> を含む) を生成する。時間誤差は、[b-ITU-T G.8271.1] の Appendix IV で説明されているように、クロックチェーン全体を通じて累積され、SC に存在する。SC でのフィルタリングは、累積した動的時間誤差をフィルタリングし、周波数誤差を許容レベルまで低減するために必要である。

TN の精度要件を備えたこの完全なタイミングサポート (full timing support: FTS) は、パケットネットワークの時間と位相同期の側面 [b-ITU-T G.8271]、パケットネットワークにおける時間同期のネットワーク制限 [b-ITU-T G.8271.1]、及びクロックのタイミング特性 [b-ITU-T G.8273.2] [b-ITU-T G.8273.3] によって特定される。時刻同期規格 Precision Timing Protocol (PTP) の時刻指定、つまり [b-IEEE 1588v2] のプロファイルは、[b-ITU-T G.8275.1] の中で設定される。

BH 及び MH の TN は、クラス B のテレコム境界クロック (telecom boundary clock: T-BC) に基づく FTS ネットワークで達成できる精度レベル 4A を満たす SC を確保しなければならない。

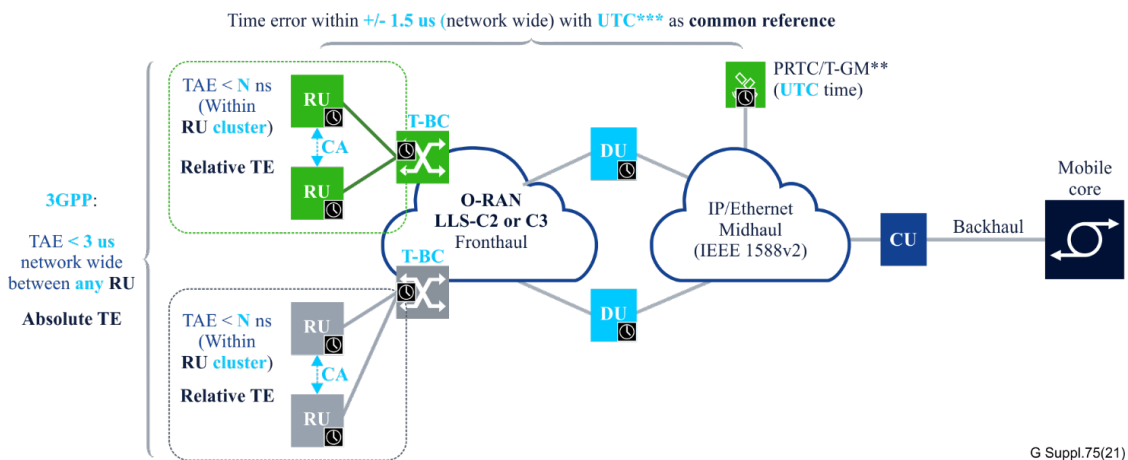
FH としては、[b-ITU-T G.8271.1] の Appendix V 及び Appendix XII に関して、以下を考慮する。

- **基地局内同期:** これは、表 12 の精度レベル 4A、6A 及び 6B に関するものである (特に、6B が最も厳しい要件を持つものであることに焦点を当てる)。
- **基地局間同期:** これは、精度 4A 及び 6A のレベルに関するものである。

各用語の意味は次のとおり。基地局内同期は、論理的スタートボロジを介して共通の共存クロックからピル内に分散された同期である。基地局間同期は、カスケードされたクロックのチェーンを介したリモートマスターからの同期である。本文書では、基地局間同期のネットワーク化された (伝送可能な) ユースケースのみを考察する。これは、ネットワークタイミング分散構成による O-RAN のクロックモデルと同期トポロジに相当する。これらは C2 と C3 である。O-RAN の LLS の仕様の Annex H [b-O-RAN CUS] では、LLS C2 及び C3 アーキテクチャの、可能な周波数と時間誤差バジェットを分析している。これには、T-BC クラス C

ノードを備えた限定的な [b-ITU-T G.8271] の FTS ネットワークが必要である。ただし、本文書では FH についてはこれ以上考慮しない。

時間及び位相の要件 (TAE) を図 17 に要約する。



- \* 3GPP TDD RAN同期/時間要件は、実際のRAN設計オプション(例:O-RAN、Cloud RAN、DRANなど)から独立しているため、必須であり、すべてのRANアーキテクチャで満たす必要がある。
- \*\* PRTC/T-GM (Primary Reference Telecom Clock/Telecom Grand Master) は、ネットワーク内のさまざまなポイント (例:CU、DU) に配置できる。
- \*\*\* UTC-世界標準時は、世界が時計と時刻を調整する主要な時刻標準である。3GPPでは、MNOの共通時刻参照としてUTCを必要とする。

図 17- タイミングの関係と同期クラス

#### 同期 OAM の要件

周波数同期のために、監視機能は、選択された基準ソースの周波数オフセット監視、優先リスト内の基準ソースの周波数オフセット監視、及びクロックの取り込み、抑制範囲の通知などを含む。

時刻同期の監視機能としては、PTP 時刻オフセット監視、PTP 遅延監視、PTP 時刻オフセット蓄積監視などがある。

#### 7.4 高可用性

5G NR の信頼性が向上することで、業界にとって利益の大きな新しいビジネスチャンスが開かれる。それは例えば、信頼性が低すぎると適切に動作しなくなるミッションクリティカルなアプリケーション ([b-3GPP TS 22.261] の URLLC の定義を参照) などの新しいアプリケーションから発生する。信頼性は、生命を脅かす状況でも通信に依存できるというような、ユーザの信頼を生み出す。したがって、MNO は、その無線網 (Radio Network: RN) に対して、測定する信頼性性能のいくつかの目標を持っている。これらのうちの 1 つは復元力であり、これは多くの場合、複数の RAN BS 間のハンドオフの機能である。MNO は、UE が接続を維持するために利用可能な複数の RAN BS があるという事実を利用することができる。これは、**無線回復力**として分類される。無線回復力の詳細は、この文書の範囲外であるが、MNO は、TN 復元力または RAN 冗長性の機能を活用して、全体的な無線回復力の性能を向上させることができる。

BH 及び BH の TN は、[b-MEF 22.3] の 10 項に従い、ユーザネットワークインタフェース (user network interface: UNI) または接続回線 (Ethernet virtual circuit: EVC) に影響を与える障害に対して回復力があり、短時間の中断時間に制限があり、ダイバーシティなどの制約が適応される。

[b-MEF 22.3] で定義されている回復力の性能の特質は、特定の EVC の可用性の目標と、高損失間隔 (high loss interval: HLI) と、連続高損失間隔 (consecutive high loss intervals: CHLI) である。NGMN アライアンスは、モバイルユーザ機器が切断するサービス継続時間 ([b-NGMN OBH REQ] の 5.2.1 項) を特定しており、500ms



から 2s の範囲を指定している。これには、ユーザと、モバイル BH セグメントへの無線リンクの両方が含まれる。トランスポートドメインまたは RAN ドメインが、このような中断からより迅速に回復するメカニズムを備えている場合、RAN によって認識される中断の期間は、特定のサービスの CHLI よりも短くすることができる。このようなメカニズムは、NGMN アライアンスが推奨する (BH での) 代替コア、または (MH での) エッジ、それぞれのサイトへの切り替え時間を、50ms から 250ms にするという目標の達成に役立つ。

TN は高可用性を提供する必要がある。これは、伝送リソースの数 (伝送要素/ノードと物理ケーブルのルート) の両方をプールし、アクティブ/アクティブのロードバランシングを使用して、1 つ以上のリソースに障害が発生した場合にサービスが中断されないようにしたり、高速スイッチオーバープロトコルを使用するアクティブ/スタンバイ状態にしたりすることで実現できる。障害が発生したリソースは、他のリソースが機能し続けている間に回復させることができる。

TN が障害状態の間、TN のオペレータは、複数のイーサネットレイヤ接続を使い、EVC のサービスパフォーマンスを維持することができる。EVC をサポートするための障害のない接続が CEN 内に少なくとも 1 つある場合、EVC の可用性のパフォーマンスは向上する。EVC に対応する接続で、異なる共有リスクグループ (shared risk groups: SRG) を持ち、ダイバーシティに制約がある場合は、この傾向はより高くなる。SRG は NE の集合体で、特定の障害または障害タイプによって集団で影響を受けるファイバリンクを含めることもできる。TN 事業者は、多様な接続を選択することにより、高い損失事象から回復するメカニズムを用いて、EVC の短期間の中断を最小限に抑える責任がある。このような短期間の中断が発生した場合は、サービスレベルアグリーメント (service level agreement: SLA) の中にある HLI、CHLI、及び TN の可用性に基づいて、その中断期間が報告される。これは、本文書では **TN 回復力** に分類される。

[b-3GPP TS 22.261] では、Annex F に信頼性と通信サービスの可用性の関係が記述されている。ネットワーク層の packets 送信のコンテキストにおける信頼性とは、ターゲットサービスが必要とする時間制約内で、所定のシステムエンティティに正常に配信された送信済みのネットワーク層の packets 量を、送信済みのネットワーク層の packets の総数で割ったパーセント値で表される。言い換えれば、TN の可用性は、[b-3GPP TS 22.261] で定義されている信頼性の一部である。表 13 を参照。

表 13- 生存時間が転送間隔と等しい場合の、信頼性 ([b-3GPP TS 22.261] の定義による) 及び通信サービスの可用性の関係の例

通信サービスの可用性	信頼性 ([b-3GPP TS 22.261] の定義による) 1-p
99.999 9%	99.9%
99.999 999%	99.99%
99.999 999 99%	99.999%
99.999 999 999 9%	99.999 9%
99.999 999 999 999%	99.999 99%

少なくともファイブナイン (99.999%) の TN の可用性を達成することは必須のようである。サイバーフィジカルの制御アプリケーションのための 3GPP 仕様 [b-3GPP TS 22.104] は、現在「通信サービスの可用性」を最大 99.999 999 99% でリストしており、これはファイブナイン (99.999%) の TN の可用性に相当する。これらの 3GPP の仕様の検討は進行中であり、最終的な信頼性のパラメータは、さらなる検討のために残っていることに留意されたい。

## 7.5 セキュリティ

一部の無線の展開では、RAN BS(5G SC など) へのモバイル BH 接続が、信頼できないドメインを経由する場合、IP セキュリティ (IPSec) ([b-IETF RFC 4301]) などのセキュリティメカニズム [b-MEF 22.3] を活用

する。これは、3GPP の仕様ではオプションである。BH のトポロジでは、通常、セキュリティゲートウェイはネットワークコントローラと同じサイトに配置される。集中型セキュリティゲートウェイのアーキテクチャを使用して RAN BS とコアの間で IPSec を使用する場合、TN を経由するモバイル BH の接続は、ほとんど E2E トンネルタイプになるかもしれない。集中型セキュリティゲートウェイで信頼できない TN ドメインを通過するために IPSec メカニズムが使用される場合、5G NR では E-Line が使用される場合が多い。E-Line は N2/N3 の両方、つまり Xn (BH) 及び F1 (MH) トラフィックをサポートするために使用できる。

FH における MACSec セキュリティの使用は、本文書の範囲外である。

## 7.6 サービススライシング

無線ネットワークアーキテクチャは、従来、特定のユースケースを中心に構築されてきた。たとえば、GSM は主に音声用に構築され、LTE はモバイルデータ用に構築された。5G NR の RN は、事業者がネットワーク全体のインスタンス、つまり、多様なユースケースごとにカスタマイズされたネットワークを、仮想的に作成できるだけの柔軟性を持つように設計されている。異なるカスタマイズされた仮想ネットワークが同時に存在するが、それらは相互に干渉することはない。例えば、超低遅延自律走行車制御用にカスタマイズされた仮想ネットワークは、極めて高いスループットを必要とする 3D ビデオ/4K 画面表示用にカスタマイズされた仮想ネットワークと共存することができる。

システムリソースの仮想化 [b-ETSI NFV-INF] は、コントロールプレーンとユーザプレーンの分離を実現するソフトウェア定義ネットワーク (software-defined networking) の採用によるプログラマビリティとともに、ネットワーク、コンピューティング、ストレージで構成されている。仮想化機能の構成可能性 (composability) は、システム全体の仮想化の重要な要素であるネットワークスライシングの構成を有効化することで、動的であること、オンデマンドな設定、論理ネットワークのインスタンス化を促進する。コントロールプレーンとユーザプレーンの分離、共有ネットワークデータレイヤ、及びネットワークでのステートレス機能の使用は、無線アクセスネットワークの不均一性と非集約性とともに、仮想化のコンテキストの中で、柔軟性と粒度のカスタマイズを可能にするレベルを容易にしている。

ネットワークスライスの GSMA での定義は、次のようになっている [b-GSMA NS]。「携帯電話事業者の観点から見ると、ネットワークスライスは、共有物理インフラストラクチャ上で実行される独立した E2E の論理ネットワークであり、交渉・調整されたサービス品質を提供できる。ネットワークスライシングを可能にする技術は、企業顧客に対しては透過的である。ネットワークスライスは、ネットワークの複数の部分(端末、無線アクセスネットワーク RAN、コアネットワーク (Core Network: CN)、トランスポートネットワーク (transport network: TN) など)にまたがることができ、複数のオペレータにまたがって展開することもできる。ネットワークスライスは、例えば、処理能力、ストレージ、及び帯域幅に関して、専用リソース及び/または共有リソースを含み、他のネットワークスライスから分離されている。」スライシングを使用すると、異なるユースケースや異なる顧客に対して異なる特性を持つ論理ネットワークを提供できる。

NGNM によると、アプリケーション (URLLC のような 5G サービス) をクラウドネイティブな方法で実現するための重要な設計上の選択肢 [b-NGMN NET CUS] の 1 つは、パケットルーティング、アプリケーションの監視と分析、及びサービスオーケストレーションを実際のアプリケーションから分離することであり、その唯一の目的として、受信した要求を処理して応答を返すことに集中しなければならない。ただし、マイクロサービスとして実現される一連の機能に分解されるアプリケーションが、最初にどのようにオーケストレーションされるかと、実行時に管理されるというライフサイクルは、アプリケーションの一部にはならない。これにより、テスト環境、ステージング環境、及び運用環境で同じコードベースを変更せずに使用できる、アプリケーションの真のクラウドネイティブ実現が可能になる。

BH 及び BH TN は、[b-3GPP TS 28.530] (図 18 参照) で定義されている接続のためのネットワークスライスのサブネットである。接続性をサポートする TN は、コアと RAN ネットワーク機能間の通信を容易にす

る。ネットワークスライスは、ネットワークスライス RAN サブネットと、ネットワークスライスコアサブネット、及び対応する TN 接続を組み合わせたものになる。

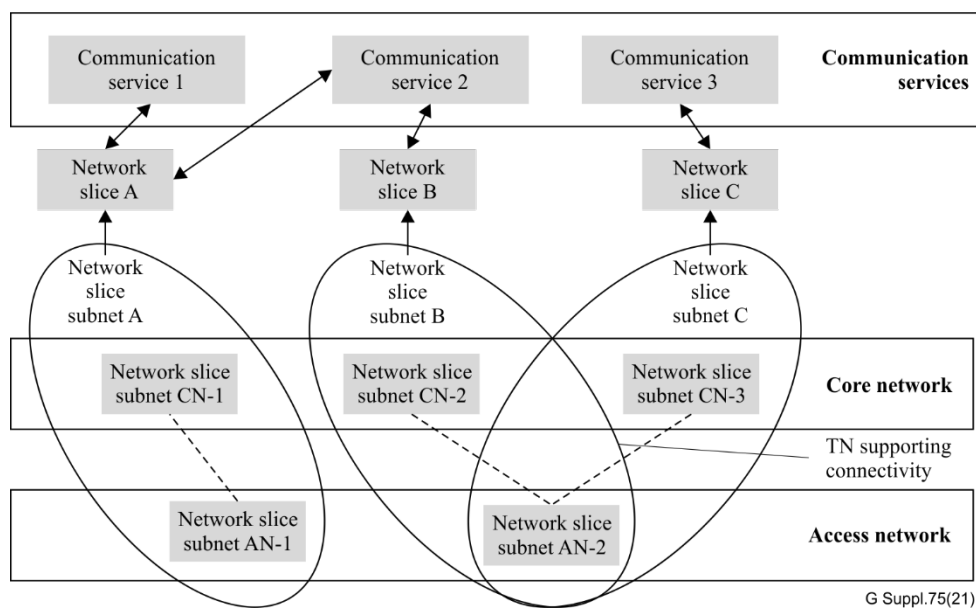


図 18- 複数のネットワークスライスによって提供されるさまざまな通信サービス  
[b-3GPP TS 28.530]

## 7.7 伝送管理

5G システムは、5G アクセスネットワーク(AN)、5G CN、UE で構成されている。[b-3GPP TS 28.530] 参照。5G システムは、さまざまな通信サービス、さまざまなトラフィック負荷、さまざまなエンドユーザコミュニティに対して最適なサポートを提供できると期待されている。次世代の 3GPP 管理システムは、3GPP 5G システムとこれまでの 3GPP システムの管理ができることが期待されている。3GPP 管理システムは、3GPP が管理するネットワークコンポーネント (例: 5G RAN、5G CN) を直接管理する。非 3GPP ドメインの場合 (例: DCN、TN)、3GPP 管理システムは非 3GPP ドメインの対応する管理システムと協調する必要がある。

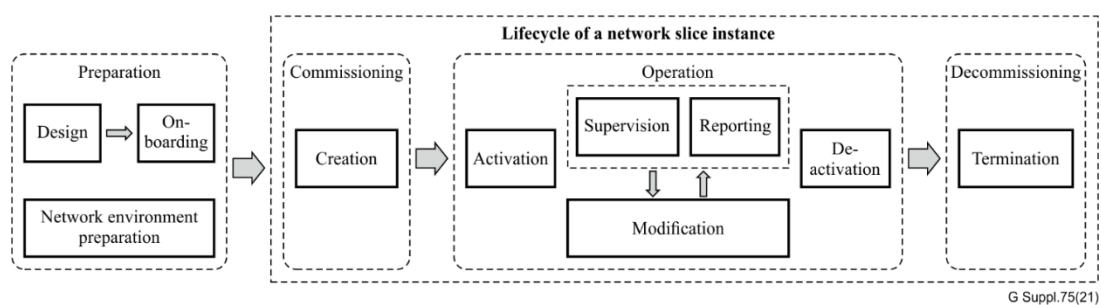


図 19- ネットワークスライシングの管理面 [b-3GPP TS 28.530]

次節で説明する各フェーズ (Preparation/Commissioning/Operation/Decommissioning) では、高レベルでのタスクを定義し、各タスクのアウトプットの適切な検証を含める必要がある。図 19 も参照。

- Preparation (準備)  
準備フェーズでは、ネットワークスライスの設計、ネットワークスライスの容量計画、ネットワーク機能のオンボーディング(設定して使えるようにする)と評価、ネットワーク環境の準備、及びネットワークスライスインスタンスの作成前に行う必要があるその他の必要な準備が含まれる。

- **Commissioning (試運転)**  
 試運転フェーズでのネットワークスライスインスタンスのプロビジョニングには、ネットワークスライスインスタンスの作成が含まれる。ネットワークスライスインスタンスの作成には、ネットワークスライスインスタンス構成要素の作成や変更が含まれる。
- **Operation (操作)**  
 操作フェーズには、ネットワークスライスインスタンスのアクティブ化、監督、パフォーマンスレポート(例えば、KPIモニタリング)、リソース容量計画、変更、及び非アクティブ化が含まれる。
- **Decommissioning (廃止)**  
 廃止フェーズでのネットワークスライスインスタンスのプロビジョニングには、必要に応じて非共有構成要素の廃止と、共有構成要素からのネットワークスライスインスタンス固有の設定の削除が含まれる。使用停止フェーズの後、ネットワークスライスインスタンスは終了し、存在しなくなる。

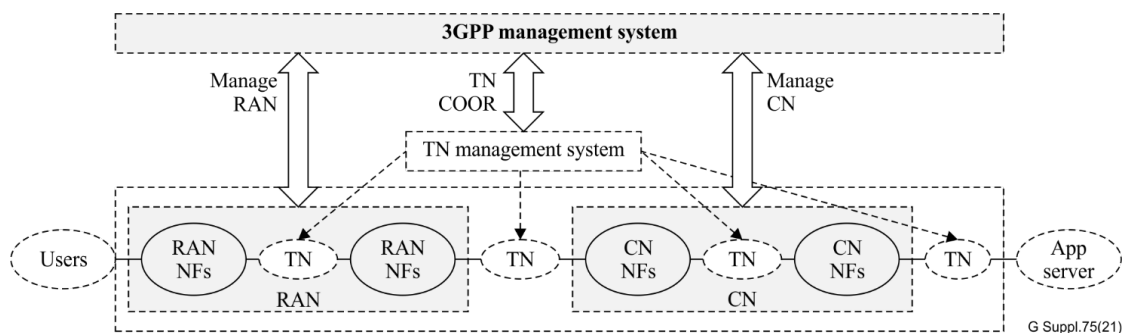


図 20- 3GPP と TN 管理間の調整例システム [b-3GPP TS 28.530]

エンドツーエンド通信サービスを提供する場合、ネットワークは、3GPP で定義されたネットワークコンポーネントに加えて、非 3GPP 部品 (例: データセンターネットワーク (DCN)、TN) を使用することができる。そのため、業務要件に応じた通信サービスの性能を確保するためには、このサービスのネットワークスライスを作成する際に、非 3GPP 部分の管理システムと連携する必要がある (図 20 参照)。この調整には、非 3GPP パーツの機能を取得すること、及び非 3GPP パーツにスライス固有の要件やその他の要件を提供することが含まれる。したがって、BH 及び MH TN ドメイン管理は、TN ドメインの派生要件を受け取るものとする。調整には、これらの管理システムと 3GPP 管理システムとの間の関連する管理データ交換も含まれる。

## 7.8 バックホール要件とミッドホール要件の相違点

### 7.8.1 プロトコルスタックの分割オプション

本文書では、5G SC のための MH を「オプション 2 分割」と呼ぶ。オプション 2 は、F1 インタフェース [b-3GPP TS 38.47x]、及び [b-3GPP TR 37.876] の 5 章の規約で定義されている V1 インタフェースに採用されている。

オプション 2 分割 (PDCP/RLC 分割) とその理由の詳細は、次のとおりである ([b-3GPP TR .38801] の 11.1.2 項も参照)。

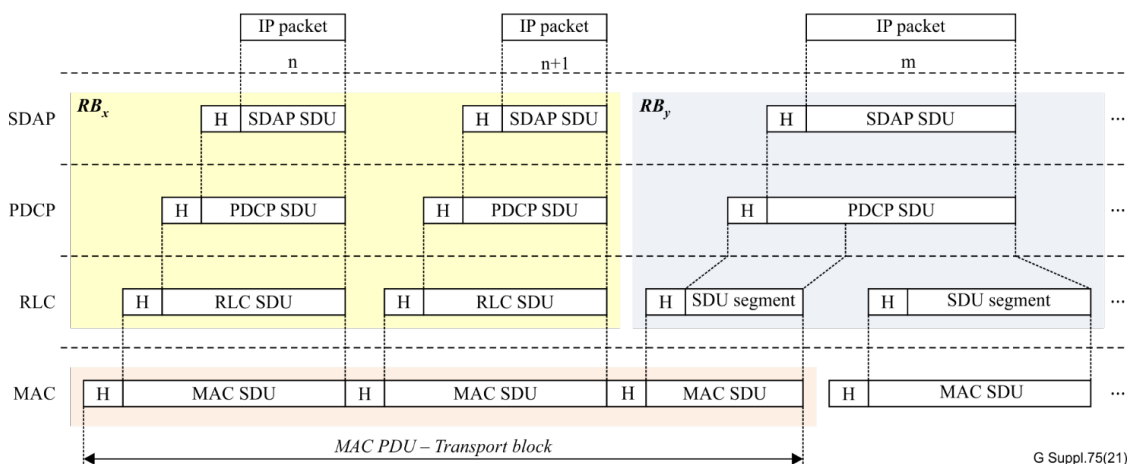
オプション 2 は、U-Plane 上の類似性のために、X2 (X2 は、接続された 2 つの eNB 間のインタフェース) のような設計に基づいているが、いくつかの機能性は異なる。例えば、いくつかの新しい手順が必要とされる C-Plane が該当する。

オプション 2-1 分割の U-Plane のみ (3C のような分割) (「3C」とは、LTE デュアル接続用に標準化された PDCP-RLC 分割)。

オプション 2-2 分割: この分割オプションでは、RRC、PDCP は CU 内にある。RLC、MAC、物理層、及び RF は DU にある。さらにこのオプションは、コントロールプレーン (CP) スタックの RRC と PDCP、及び ユーザプレーン (UP) スタックの PDCP を別々の中央エンティティに分離することで実現できる。

BH、MH ともにパケットデータであり、固定長ではない。オプション 2 を MH、オプション 1 を BH とする (オプション 1 は RRC シグナリングにおいて BH だけが異なる)。この 2 つのキャパシティ増加は 1% 未満である。

[b-3GPP TS 38.300] (6.6 節) では、図 21 (すなわち [b-3GPP TS 38.300] の図 6.6-1) に示すように、レイヤ 2 データフローの例が示されている。ここでは、RBx からの 2 つの RLC PDU と、RBy からの 1 つの RLC PDU を連結することによって、MAC によって伝送ブロックが生成されている。RBx からの 2 つの RLC PDU はそれぞれ 1 つの IP パケット (n 及び n+1) に対応し、RBy からの RLC PDU は IP パケット (m) の一部分から生成されている。



注- H はヘッダとサブヘッダを示す。

図 21- データフローの例 ([b-3GPP TS 38.300] の図 6.6-1)

## 7.8.2 伝送ネットワークと RAN 内部機能分割

この項は [b-3GPP TR 38.801] の Annex A と同じである。

上記の分析に基づき、オプション 1 の容量は BH と比較して、RRC シグナリングに関連するフレームヘッダのオーバーヘッドを増加させるが、通常オーバーヘッドの量は極めて少ないことが分かる。また非固定長パケットであるため、統計的な比率しかなく、オプション 1 のトラフィック増加率は BH と比較して約 5% 未満となる。

オプション 1 と比較して、オプション 2 では PDCP フレームヘッダ分のオーバーヘッドが増加する。しかし、[b-3GPP TR 38.801] の表 A-1 によれば、増加率は約 1% 未満となる。

BH の容量要件の計算方法は 7.1 節に示されている。

いくつかの重要な研究の結論は、すでに [b-ITU-T G.Suppl.66] で以下のように示されている。

- トラnsポート帯域幅の観点から、上位レイヤ分割オプション 1~7 の最も重要な特徴は、送信されるデータの量がエアインタフェース上のユーザトラフィックに応じて増減するという事実である。したがって、これらの分割ポイントでの伝送は、集約ネットワークアーキテクチャにおける統計的多重化利得から利益を得ることができる。
- オプション 2 (F1 インタフェース) の増分は、オプション 1 (BH) と比較して 1% 未満である。

[b-3GPP TS 38.47 x] によると、F1 インタフェースに関する以下の重要な点に注意する必要がある。

- 1) 論理的には、F1 はエンドポイント間の P2P インタフェースである。論理 P2P インタフェース (例えば、以下に説明する E ライン EVC) は、エンドポイント間に物理的な直接接続がない場合でも実現可能である必要がある。

注: これらの注釈(たとえば、後述する E ライン EVC) は、BH の N2/N3 インタフェースにも適用される。したがって、これらの見解は「5G SC の BH と MH」に対して有効であることを付け加えたい。

- 2) F1 データ伝送の場合
  - F1 経由のデータストリームのトランスポート層は、IP ベースの伝送である。以下の図 22 は、F1 上の伝送プロトコルスタックを示す。

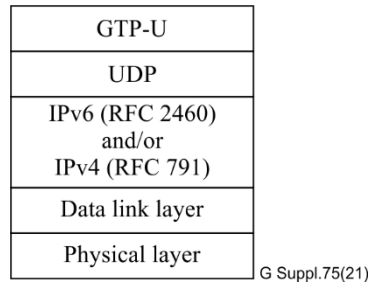


図 22- F1 上のトランスポートネットワーク層

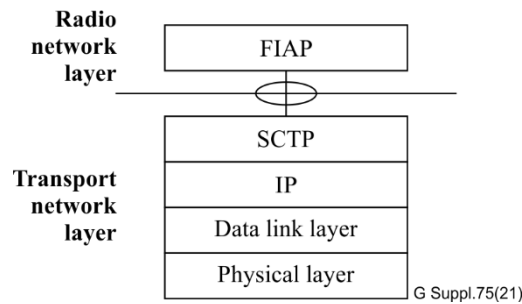


図 23- F1-C シグナリングベアラ

- 図 22 は [b-3GPP TS 38.474] の図 5.1、図 23 は [b-3GPP TS 38.472] の図 4.1-1 である。UDP over IP 上の GTP-U ([b-3GPP TS 29.281]) プロトコルは、F1 インタフェース上のデータストリームの伝送手段としてサポートされる。データリンク層は、[b-3GPP TS 38.474] の 4 章に規定されているとおりである。
  - 伝送ベアラは、GTP-U TEID [b-3GPP TS29.281] 及び IP アドレス (送信元 TEID、宛先 TEID、送信元 IP アドレス、及び宛先 IP アドレス) によって識別される。
- 3) F1 シグナリング伝送の場合
    - F1-C シグナリングベアラの機能及びプロトコルスタック。F1-C シグナリングベアラのプロトコルスタックを図 23 [b-3GPP TS 38.472] に示し、各プロトコルの詳細を後述する。TN 層は IP 伝送に基づいており、IP の上に Stream Control Transmission Protocol (SCTP) を備えている。
    - データリンク層： 任意の適切なデータリンク層プロトコル、例えば PPP、イーサネット等のサポートは妨げられない。
    - IP 層： gNB-CU 及び gNB-DU は、IPv6 [b-IETF RFC 8200] (例えば、[b-3GPP TS 38.472] の reference[2]) 及び/または IPv4 [b-IETF RFC 791] (例えば、[b-3GPP TS 38.472] の reference[3]) をサポートしなければならない。F1-C の IP 層は、F1 アプリケーションプロトコル (F1 AP) メッセージを配信するための P2P 伝送だけをサポートする。gNB-CU 及び gNB-DU は、[b-IETF RFC 2474]

([b-3GPP TS 38.472] の reference [4]) に記述されている Diffserv コードポイント (DSCP) のマーキングをサポートするものとする。

### 7.8.3 その他の要件

レイテンシ、時間及び周波数の同期、可用性、セキュリティ、サービススライシング、及び伝送の管理に関する要件は、7.2 節から 7.7 節に記載されている。

### 7.9 まとめ

この章では、SCBH 及び RAPMH の要件に焦点を当てている。これには、容量、待機時間、時間と周波数の同期、高可用性、セキュリティ、サービススライス、伝送の管理、及び BH と MH の要件の違いが含まれる。5G SC の技術は現在開発中であり、今後さらなる研究が必要である。

## 8. バックホール要件と PON 機能の比較

### 8.1 容量

ファイバ直結の P2P、または波長分割多重 (WDM) テクノロジとは異なり、パケット伝送ネットワーク (PTN) では、同じネットワーク上で複数の接続を共有するためにパケット多重方式が採用されている。TDM-PON は、P2MP アグリゲーションネットワークアーキテクチャのため、コスト効率の良いソリューションを提供できる、アクセス網で幅広く利用されているファイバアクセステクノロジーの 1 つである。そしてファイバ分割比 (例:1:32 または 1:64) に依存するため、5G-NR の SC を使用することで、それらのセルラーネットワークを高密度化することができ、オペレータによって利用され得る非常に高密度な展開 (例: fibre to the home: FTTH) を可能にする。トラフィックは、シミュレーションシナリオの均一性により、集約されたセルの数に線形にスケールされるが、各セルの xHaul トラフィック内には時間的なランダム性がある。xHaul トラフィックにおける時間的なランダム性は、ミリ秒スケールで動的帯域幅割当を適応できる TDM-PON において効率的に利用できる。全体的なトラフィック容量要求と各セルでのトラフィックの時間的なランダム性を考慮すると、高速 TDM-PON は複数の無線セルの集約に効率的に使用できる。典型的な PON の提供領域は 1 km<sup>2</sup> に及ぶので、セル間距離に依存して妥当な数のセルをカバーすることができる。

図 24 に F1 MH のための高レイヤ分割アーキテクチャを示す。

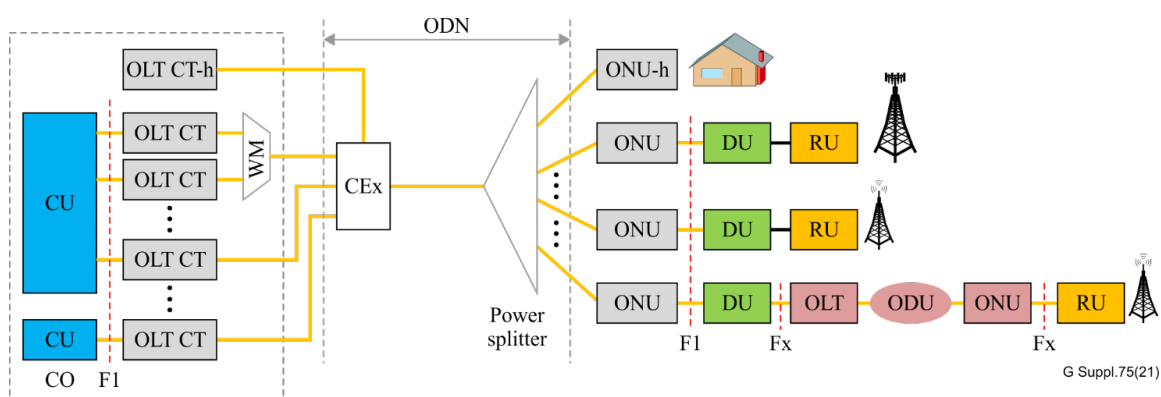


図 24- F1 ミッドホール: 高レイヤ分割アーキテクチャ

[b-ITU-T G.Suppl.66] (図 9-2)

7.1 節の MH トラフィック計算 [b-Bidkar] の結果に続いて、高速 TDM-PON を使用して集約できる xHaul 接続数を分析する。この節では、シミュレーションシナリオから 1 つの TDM-PON に集約できる F1 ミッドホール接続数を分析する。前方誤り訂正 (FEC) と TDM-PON の最も重要な TC 層プロトコルオーバーヘッド

を考慮し、8.3 Gbit/s の有効ダウンストリームスループットを持つ例として、10G XGS-PON [b-ITU-T G.9807.1] または TWDM-PON [b-ITU-T G.989] を例とする。XGS-PON の実効スループットの計算 [b-ITU-T G.9807.1] を表 14 に示す。

表14- 単純化されたXGS-PONのTCレベルでのU/Sスループット

ラインレート	9.95328	Gbit/s
RS のための公称 FEC 係数 (216,248)	0.871	
バーストモードオーバーヘッド: 「最悪ケース」 ([b-ITU-T G.9807.1]の表 B.III .2)	1024	Byte
フレーミングサブレイヤ (FS) ヘッダ (4 byte) 及びトレーラ (4 byte) を含む	1032	Byte
=>バーストあたりのオーバーヘッド	0.829	us
ONU の数	32	
光ネットワークユニット(ONU)あたりの T-CONT の数	1	
T-CONT の $T_{jt}$ [b-ITU-T G.989.3]	1	us
=>PON フレームあたりのバースト数 (125 $\mu$ s)	4	
TC レイヤで使用可能なスループット (注: Optical Network Termination Management and Control Interface (OMCI) などのその他のオーバーヘッドは含まれない)。	8.439	Gbit/s
イーサネットフレームの平均サイズ: BH と MH のフレームサイズは、ユーザのアプリケーションフレームサイズを反映していると仮定する。 1つの VLAN タグで、一般的に使用される IP ミックス (imix)、つまり 64 Byte の 7 フレーム、598 Byte の 4 フレーム、1522 Byte の 1 フレームを想定	364	Byte
GEM ヘッダ (イーサネットフレーム単位)	8	Byte
イーサネットレイヤで使用可能なスループット (GEM ヘッダカプセル化オーバーヘッドを含む)	8.257	Gbit/s

シミュレーションシナリオのすべてのセルが同じタイプであり、F1 MH インタフェースの場合、均質な無線配置では、10G TDM-PON は F1 インタフェースで最大 24 個のセルをサポートできる (前述の 20% のオーバーヘッドは無し)。

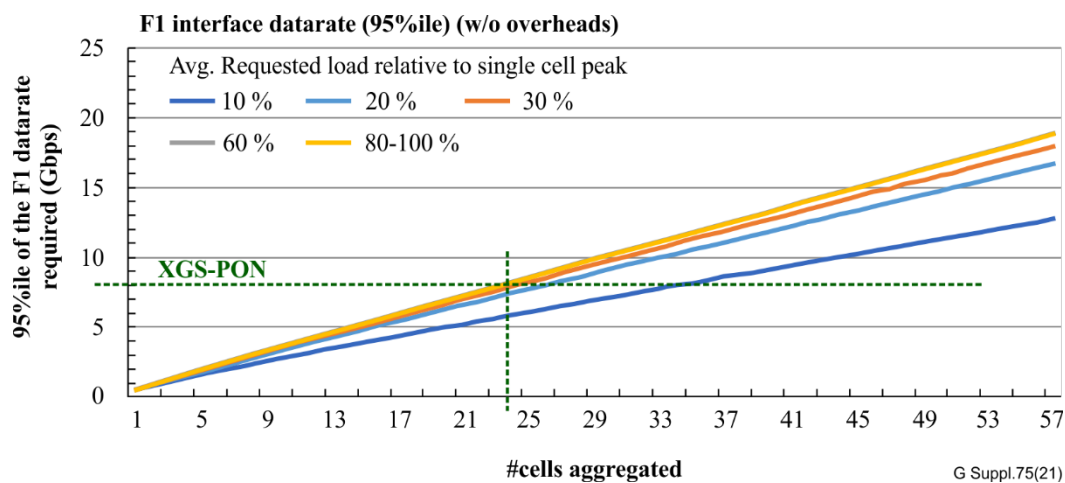


図 25- 10G TDM-PON を使用した F1 ミッドホールエリアのトラフィック容量

図 25 は、特定の負荷条件に対して 10G TDM-PON 上で集約できる F1 インタフェースセルの最大数を示している。折れ線グラフの下側の点は、この 5G NR FR1 100MHz、4x4 MIMO 無線構成の F1 インタフェースを持つ



つ集約セルのすべての実行可能な組み合わせを示している。

他の無線構成を外挿するために、エリアトラフィック容量は、XSG-PON 上の 20 個の光ネットワークユニット (ONU) (20%のオーバーヘッドで 100MHz : 4 層) からのキャリア帯域幅と MIMO 層で線形にスケールすると仮定する。

- コンポーネントキャリア (CC) 帯域幅 : 50MHz~800MHz
- 送信レイヤ数 N (MIMO で定義) : 1 から 16

表 15- 専用 10G TDM-PON (3D-UMa 無線 5G NR) でのミッドホールの ONU の最大数

	N 層	1	2	4	8	16
CC (MHz)						
50		160	80	40	20	10
100		80	40	20	10	5
200		40	20	10	5	3
400		20	10	5	3	
800		10	5	3		
	10G TDM-PON 上の F1 トラフィックを持つ 1 つの ODN 上の ONU の数。					

将来のより高速な TDM-PON [b-ITU-T G.9804.x] では、表 15 は、より高速な PON ソリューションのためのスループット計算を使用してスケールリングできる。

また TDM-PON の場合、追加で考慮される遅延の発生要因はアップストリームにある。

## 8.2 レイテンシ

ほとんどファイバ伝搬遅延のみを要因とするファイバ直結 P2P、または WDM 技術である「理想的な伝送」とは異なり、TDM-PON は PTN であるため、伝搬遅延に加えて、アップストリーム及びダウンストリーム方向の両方方向において、スイッチング遅延、及びキューイング遅延も発生する。これらの遅延はすべてパケット統計(例えば、サイズの分布と到着間隔)、ビットレート、及び/または伝送フレームサイズに依存し、一桁ミリ秒以下になることがある。しかし、特別な予防策をとることで、その遅延時間は大幅に減少することができる。

表 16 に、TC レベルのレイテンシの簡単な例を示す。

表 16- 単純化された TC レベルのレイテンシの例

伝播遅延/km	5	us
パケットネットワークによる遅延 (アップストリーム及びダウンストリーム)		
- フレーミング	0.2	us
- スクランプリング	無視できる ナノ秒範囲	
- FEC		
10 Gbit/s Reed Solomon (RS)	~1	us
25 Gbit/s 低密度パリティチェック (LDPC)	~10	us
50 Gbit/s LDPC	~5	us
- デジタル信号処理 (DSP)	無視できる、~1	us
- 1500/9000 Byte のストア&フォワード処理		
10 Gbit/s	1.2/7.2	us
25 Gbit/s	0.5/2.9	us
50 Gbit/s	0.25/1.45	us
- ビットインターリーブ (オンの場合、50G ダウンストリームのみ)	~2	us

表 16- 単純化された TC レベルのレイテンシの例

アップストリームのみ		
- Ranging quiet ウィンドウ	最大 250	us
- バースト間遅延	最大 125	us
- セグメントバッファリング	最大 125	us
- 動的帯域幅割り当て (DBA) サイクルの最大遅延 (両端)	最大 1500	us
一方向アップストリームの最大追加遅延	最大 2	ms

したがって、TDM-PON の場合、考慮すべき遅延の原因は、ダウンストリームとアップストリームの両方にある ([b-Pfeiffer] において説明されていて、PON での伝送のレイテンシに対する考慮に重点を置いているように)。

- 1) 標準的な光ファイバ及びすべての波長について、 $\sim 5\mu\text{s}/\text{km}$  のスケールでの伝搬遅延 (典型的な PON ODN 距離については無視できるスペクトル変動)。なお、TDM-PON においては各 ONU に個別に割り当てられた等化遅延の結果、全ての ONU が実質的に同じ距離に配置される。
- 2) パケットスイッチのスイッチング/転送及びキューイングの遅延は、スイッチのテクノロジーとアーキテクチャ (カットスルーとストアアンドフォワード)、及び動作中のスイッチの総トラフィック負荷によって異なり、通常は 1 桁のマイクロ秒遅延となる。
  - カプセル化、コーディング、マッピング、FEC 及び他のデジタル信号処理 (DSP) 機能、例えば、帯域幅が制限された伝送からの信号歪みを緩和するために、伝送プロトコルが遅延を誘発する。10 Gbit/s 以上の PON システムでは、FEC のための低密度パリティ検査 (LDPC) や分散補償のための最尤系列推定 (maximum likelihood sequence estimation: MLSE) のような複雑な DSP アルゴリズムが作用しない限り、関連する待ち時間はサブ  $\mu\text{s}$  範囲に留まる。
  - セグメント間の遷移時に、データ伝送のバースト性、パケットフラグメンテーション、ラインレート変換、及びフレーミングの不一致を考慮する際に導入されるバッファ遅延 [b-Pfeiffer]。

TDM-PON の場合、追加で考慮される遅延の原因はアップストリームにある。

- 1) TDM-PON に非通信時間 (Quiet Window) を挿入し、新しい ONU のネットワークへの参加、ONU の起動、レンジングを可能にする。OLT からの ONU のファイバ距離が不明な最も一般的なケースでは、この遅延は数 100us の大きさになる。
- 2) PON のアップストリームトラフィックのバースト性に関連する ONU のバッファ遅延。単一 ONU の二つのフレーム間のこのバースト間遅延はほぼフルフレーム長 (125us) となる。このようなバッファリングは実際のネットワークでは避けられないが、低ジッタノード設計と組み合わせて、バッファの深さを小さく保つ必要がある。
- 3) ダイナミック帯域幅割り当て (DBA) の従来のプロセスは、追加のパケット遅延を引き起こす可能性がある。各 T-CONT には、次の 3 つの帯域幅パラメータがある。
  - 要求されていない場合でも、常に許可される固定帯域幅
  - 要求されたときに必ず許可される保証帯域幅
  - 要求されたときと帯域幅が使用可能なときのみ許可されるベストエフォート型の帯域幅 [b-Pfeiffer]

T-CONT には、ダイナミック帯域幅レポート、アップストリーム (DBRu) イネーブルが含まれている。これは、ステータスレポートのダイナミック帯域幅割り当て (SR-DBA) に使用される。SR-DBA は、DBRu を使用しない DBA のトラフィックモニタリングバージョンと比較して、帯域幅のランプアップ時間を短縮する (図 26 を参照)。

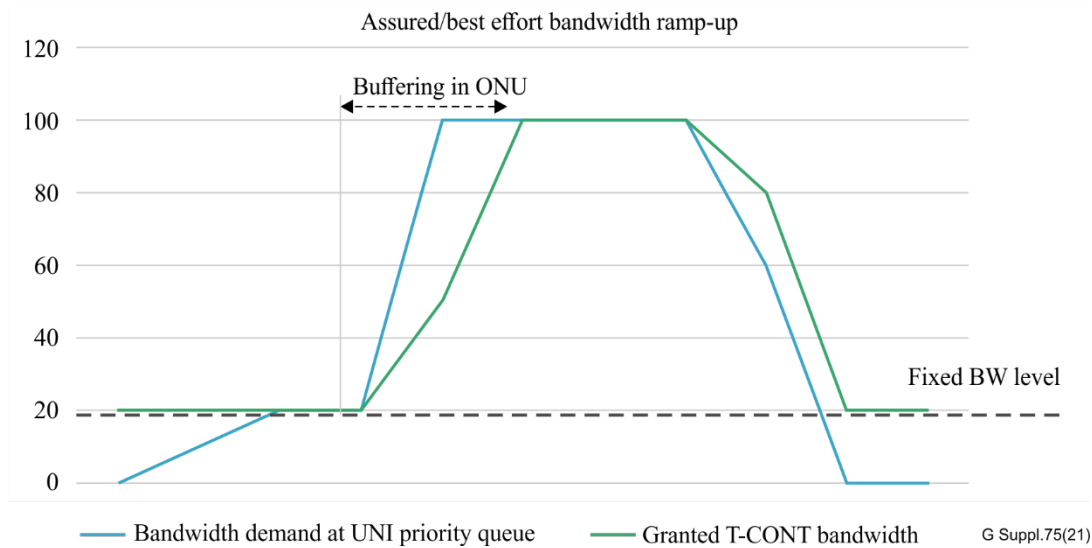


図 26- 保証/ベストエフォート型の帯域幅ランプアップの例

5G ネットワークに対して上述のような TF1 要件を考慮すると、TDM-PON は BH 及び MH のレイテンシの要件をサポートするように構成可能であると結論付けることができる。

### 8.3 時刻と周波数の同期

#### TDM-PON 上の同期モデル: 定義

本補足文書では、全地球測位システム (global positioning system: GPS) の受信機のようなエンドアプリケーションに全地球的航法衛星システム (GNSS: global navigation satellite system) 受信機を実装した分配型プライマリ・リファレンス・タイム・クロック (primary reference time clock: PRTC) の代替ではない、中間ノードのタイミングサポートを備えたパケットベースの方法を検討する。したがって、仮説に基づいた参照モデル (hypothetical reference model: HRM) は、TDM-PON のアクセス区間を持つネットワーク参照モデルである。[b-ITU-T G.8271.1] では、プロトコルレベルまでフルタイミングサポートであり、物理層がイーサネットであるものが規定されている。ネットワークのトランスポート区間は時刻情報の転送に SyncE と PTP の両方を使用し、アクセス技術がネイティブアクセスクロックを使用して基準点 C (図 27 参照) を越えてパケットスレーブクロックに向かって PTP を再生成する。

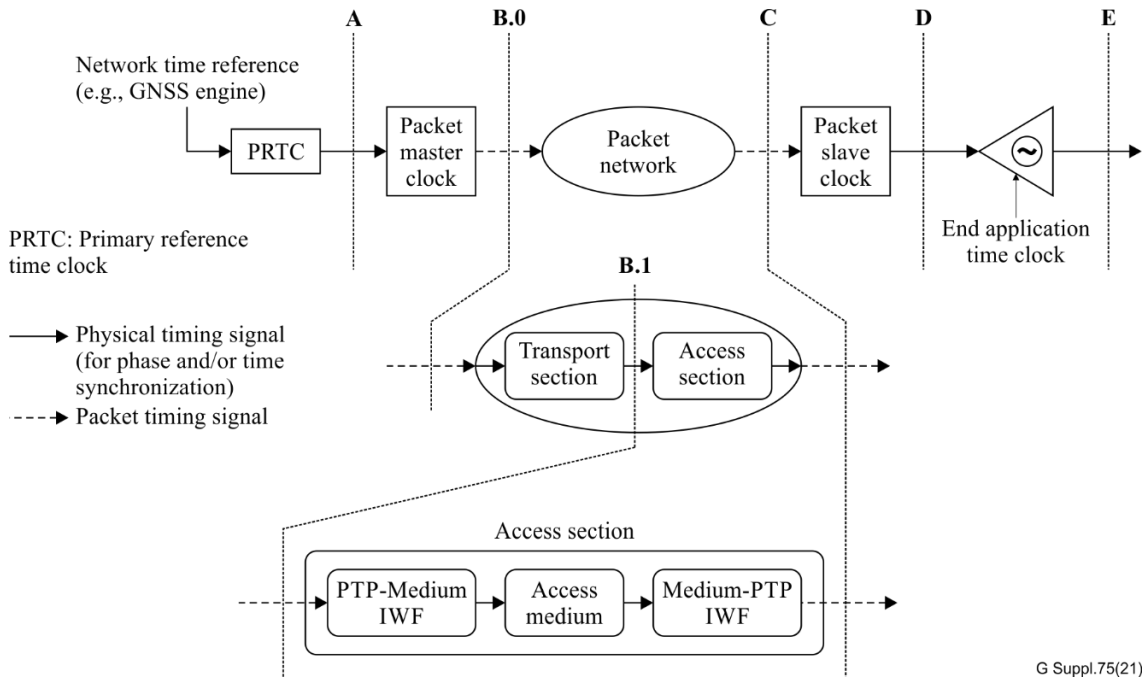


図 27- アクセス区間を含むネットワーク参照モデル

HRM2 のトランスポート区間は、PTP 及び SyncE を使用したフルタイミングウェアの [b-ITU-T G.8273.2] の T-BC で構成されるネットワークチェーンで構成されている。これらのアクセス技術の最も可能性の高い展開シナリオは、ネットワークが HRM2 に準拠し、PTP と SyncE の両方を使用するネットワークの端点での展開である。実際、HRM2 は、オプション 1 EEC を使った SyncE ネットワークを使用して分析が完了したことを示している。

図 28 は xPon デバイスのチェーン状接続でのバジェット作成のためのモデルを示している [b-ITU-T G.8271.1]。

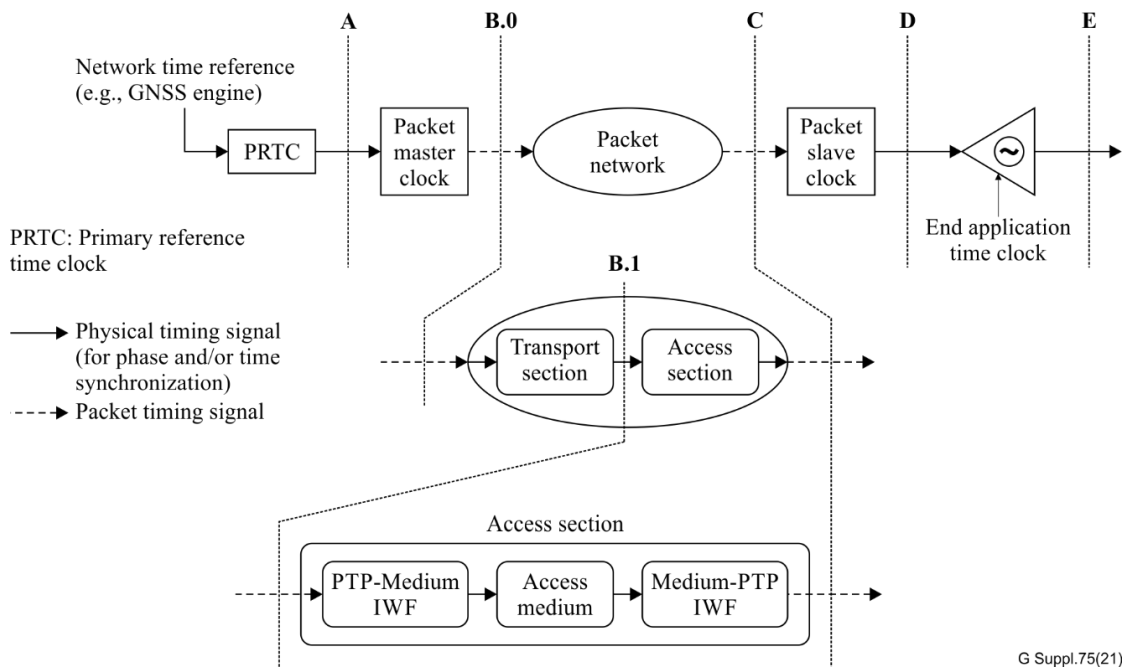


図 28- xPON デバイスのチェーンにおけるバジェットのモデル ([b-ITU-T G.8271.1] 付録 IX)

TDM-PON アクセス区間に T-BC が存在する場合はネイティブアクセスクロックとの間で接続される。こ

これらのネイティブアクセスクロックは、(PON の P2MP ファイバ) メディアへの直接接続を提供する。基本的には、T-BC 及び TDM-PON ネイティブアクセスクロックは PTP を伝送するイーサネットとアクセスメディアの間の変換を行うインターワーキング機能 (interworking function: IWF) を提供する。TDM-PON アクセス区間には、アクセス区間内のクロックの影響だけでなくメディアの定数要素と動的要素の組み合わせによる時間誤差がある。時間誤差要件を満たすには、TDM-PON の時間誤差バジェットを特定する必要がある。OLT と ONU の組み合わせは、PTP チェーン内の 2 つの T-BC として扱うことができる。ネイティブアクセスメディアシステムは、純粋な EEC (Ethernet Equipment Clock) クロックとは異なるレイヤ 1 の周波数分布を持つため、これが時間の配信に及ぼす影響について議論することが望ましい。TDM-PON の IWF は任意の周波数基準と時間基準の独立した伝送を許可しない仕組みであるため、両方のパラメータは位相ロックされている必要がある。

PON 固有の時刻 (ToD: time-of-day) 配信方法は、2009 年に [b-ITU-T G.984.3 Amd 2] の一部として最初に導入され、その後、[b-ITU-T G.984.3] の 10.4.6 項、[b-ITU-T G.987.3] の 13.2 節、[b-ITU-T G.989.3] の 13.2 節、[b-ITU-T G.9807.1] の C.13.2 節で準用された。これら「PON での時刻配信」の項では、TDM-PON のネイティブアクセスクロックのインターワーキング機能 (IWF) を規定している。IWF は、OLT の基準クロックと ONU のローカルクロックの間で時刻同期を実現するために必要な情報を提供する。OLT は IWF を使いユニキャスト OLT-G OMCI メッセージを介して時刻情報 (ToD) を ONU に送信する。時刻情報 (ToD) は、OLT から ONU に位相同期を転送するためのユニキャストメッセージであり、[b-ITU-T G.988] で OLT-G OMCI メッセージとして定義されている。14 バイトの ToD 属性は 2 つのフィールドで構成され、最初のフィールド (4 バイト) は指定された GEM スーパーフレームのシーケンス番号である。特定の下りフレームは、そのスーパーフレームカウンタ(N) の値によって識別される。2 番目のフィールド (10 byte) は、IEEE 1588v2 の 5.3.3 項のタイムスタンプ形式 (UTC) を使用した TstampN である。ONU は、この ToD メッセージ (N、TstampN) の値のペアを使用して、OLT との正確な時刻同期を取得する。OLT は、特定の下りフレームが、等価遅延が 0 で応答時間が 0 の仮想 ONU に到着するタイミングを ONU に通知する。TstampN は、下りフレーム N の最初のビットが仮想 ONU に到達する正確な ToD を指す。TstampN は EqD が 0 で応答時間が 0 の仮想 ONU に下りフレーム N の最初のビットが到着する正確な ToD を指すため、ToD (N、TstampN) の内容はすべての ONU で同じである。ONU への信号の到着は、光信号が ODN と ONU の境界である光コネクタまたはスプライスを通過する瞬間と定義されている。

#### TDM-PON 上の同期モデル: 性能

5G バックホール及びミッドホールは、FTS のタイミング同期を提案し、[b-ITU-T G.8273.2] には OLT/ONU などのメディアコンバータ T-BC を含む T-BC クラス B の明示的に定義された要件が含まれている。

表 17 は一対のメディアコンバータのノイズ生成の推定を示す。

表 17- 一対のメディアコンバータのノイズ生成の推定値 ([b-ITU-T G.8273.2] Annex V 記載のデータ)

	クラス A T-BC に基づく		クラス B T-BC に基づく		クラス C TBC に基づく	
	シングル T-BC	一対のメディアコンバータ	シングル T-BC	一対のメディアコンバータ	シングル T-BC	一対のメディアコンバータ
cTE (ns)	±50	±100	±20	±40	±10	±20
dTE <sub>L</sub> MTIE (ns)	40	60	40	60	10	15
dTE <sub>L</sub> TDEV (ns)	4	6	4	6	2	3
dTE <sub>H</sub> (peak-to-peak, ns)	70	70	70	70	FFS	FFS
max TE  (ns)	100	160	70	100	30	45

TDM-PON の T-BC 分類は IWF の精度 (最大|TE|) に依存する。上記のすべての TDM-PON 仕様では、それぞれのシステムでのメソッドのエラー分析を含む参考の付録が提供されている。TDM-PON で使用される IWF の精度は、次のように分類できる。

**ファイバ伝搬遅延:** ゼロ分散波長の範囲で特徴づけられる実際のファイバの波長帯域の屈折率差を結びつけるために、波長の関数としての屈折率差 (下記の式 (6)) から導出される。次に、屈折率の比  $n_{dn}/(n_{dn}+n_{up})$  に適用する最適補正係数を取得し、その比に紐づく ToD の不正確さの限界を確立する。

$$\Delta_{OLT} = Teqd \frac{n_{dn}}{n_{up} + n_{dn}} \quad (6)$$

屈折率補正係数の最大推定値は、0.5、または、XGS-PON (20 km) の 200 $\mu$ s に対して約 60ns の誤差と推定される。ファイバによって絶対屈折率が異なる場合があることに注意する必要がある。

[b-ITU-T SG15-C-1096] では、補正係数を使用したこのアプローチは、一連の固定波長ペアを使用する現在のベスト プラクティスとしては一般的すぎる事が知られているが、アップストリーム波長とダウンストリーム波長の間の相対分散が非常に適切に指定され、制御されている場合、大幅に改善することができる。例えば前述のコントリビューションでは、NG-PON2 の 4 つの TWDM チャネルペア全てについて、最適補正係数を 0.500059 に設定することで、最大 0.000003 の誤差となるが、これは $\pm 0.6$ ns のタイミング誤差に相当する。式(7) では、現在推奨されている補正係数が使われている。

$$\frac{n_{dn}}{n_{up} + n_{dn}} \approx 0.500061 \quad (7)$$

誤差は 0.000004 を超えず、これは $\pm 0.8$ ns のタイミング誤差に相当する。他の TDM-PON の波長のペアについても同様の最適補正係数が得られる。したがって、この伝播遅延の誤差は一桁 ns 台前半まで十分に削減することができる。

**等化遅延精度:** ONU 伝送の到着位相は、エージング、温度変化、及びその他の要因によってドリフトする可能性がある。その場合、等化遅延は上り伝送のドリフトから再計算され、調整される。このインサースペース等化遅延調整により、ONU を再度レンジングすることなく微修正を行うことができる。等化遅延の精度は、ウィンドウのドリフト (DOW: drift of window) の閾値によって決定される。この DOW は伝送ドリフトが許容可能と見なすことができ、軽減アクションを必要としない範囲を規定する。現在の TDM-PON では、この DOW は約  $\pm 3$  ns である。

**内部タイミング補正:** OLT と ONU は両方とも、論理計算やイベントトリガーが発生した場所から、標準化の目的のために基準点として使用される光インタフェースまでの内部遅延を補償する責任がある。PON システムの TDMA の要件は、これらの内部遅延が少なくとも各レンジングのライフサイクルの中で安定していることを意味している (上記の DOW を参照)。PON 装置の長期にわたる安定性と予測可能性は規定されていない。ただし、サイクル間の変動は、下りリンクでの 2 つの制御されていないシリアライザ-デシリアライザの間の遅延に相当する、10 Gbps での  $\pm 64$  ビットの範囲内に収まると予想できる。この場合、結果として生じるタイミングの不確実性は約 6.5 ns である。最後に、ToD 分散方式では精度が 1 ns に制限されている 10 バイトのタイムスタンプ形式 (UTC) である TstampN を使用する。したがって、正確な測定値に基づく標準形式の各タイムスタンプ計算では、 $\pm 0.5$  ns 以内の丸め誤差が発生する。OLT または ONU に閉じた時間計算は、原理的にはより高い精度で実行することができるため、必ずしも丸め誤差は発生しない。

要約すると、HRM における IWF としての TDM-PON の Time-of-Day 分散機能では、(表 17 のメディアコンバータのクラス C ペアのように) 最大|TE|は 45 ns を下回ることが可能と見積もることができる。

$$\begin{aligned} \text{最大絶対時間エラー} &= < 4 \text{ ns (プロップノイズ)} + < 3 \text{ ns (EqD-DOW)} + \\ &< 6.5 \text{ ns (内部補正)} = < 14 \text{ ns TDM-PON での IWF の時間誤差} \end{aligned} \quad (8)$$

実際の実装では任意の周波数基準と時間基準の独立した伝送を許容しておらず、両方のパラメータは位相ロックされている必要がある。このロックにより、[b-ITU-T G.8273.2] で必要とされる 0–10 Hz の範囲の時間ノイズ成分を伝送できる一方で、1 pps クロックを介した時間分配に [b-ITU-T G.8271] の Annex A 準拠の V.11 インタフェースを使用し、ネイティブメディア自体の時間更新レートを 20/s 未満にすることができる。TDM-PON で推奨されるメッセージ送信頻度は 24 時間に 1 回以上である。[b-ITU-T G.987.3]、[b-ITU-T G.9807.1]、そして [b-ITU-T G.989.3] では、選択した PHY フレームが現在時刻から 10 秒以内であることを推奨している。ONU は OMCI を介した  $(N, T_{\text{stamp}N})$  の値のペアの通信から 10 秒以内にクロック同期を完了することが期待される。ONU の周波数基準は、発信元の PR(T)C によって生成された周波数に直接位相ロックするのではなく、ネイティブなメディアから PTP への IWF の PTP 時間基準に位相ロックする。その結果、ネットワークノードの SEC/EEC クロックを介した物理層周波数基準に対して [b-ITU-T G.813]、[b-ITU-T G.8262]、[b-ITU-T G.82621] でそれぞれ指定されたノイズ伝送関数は、HRM-2 のタイプのパケットネットワークに接続されている場合、ネットワーク側終端 (GPON OLT) と加入者側終端 (GPON ONU) で構成されるネイティブメディア区間には適用されない。これは、ネイティブなアクセスメディアから PTP メディアコンバータに渡される L1 周波数が、PTP からネイティブなアクセスメディアコンバータへ入力する SyncE を生成する周波数基準ではなく、PRTC に対する長期のトレーサビリティを持つことを意味する。ネイティブなアクセスメディアから PTP デバイスに送信される ESMC で使用される QL 値は、[b-ITU-T G.8275.2] の Annex F で定義されたマッピングを使用した PTP ソースに基づく周波数トレーサビリティを示す必要がある。

以上の IWF 精度から、ITU-T の Time-of-Day の分散機能に準拠した TDM-PON は、メディアコンバータのペアとして [b-ITU-T G.8273.2] の T-BC のクラス B に準拠させることができると結論付けられる。その結果、TDM-PON は、クラス B T-BC に基づく FTS ネットワークで達成できるレベル 4A の精度を満たすバックホール及びミッドホールのスモールセルの TN として使用できる。

### TDM-PON での同期 OAM

精度の高い同期には、より完全な性能監視機能が必要である。[b-ITU-T G.Suppl.68] の 7.2 節及び 9.2 節で、時間及び周波数の監視機能を規定している。TDM-PON での同期に使用できる監視機能と使用すべき監視機能については、さらなる検討が必要である。

## 8.4 高可用性

高密度な一般加入者向けサービスだけでなく、モバイルバックホールも PON の冗長化とプロテクションスイッチングを必要とする。本文書では、TDM-PON ベースのプロテクション手法を使用した TN の耐障害性を検討する。[b-ITU-T G.984.1] では、冗長性を実現するためのいくつかのトポロジについて説明しており、タイプ A、タイプ B、タイプ C、タイプ D と名付けられている。[b-ITU-T G.987.x] シリーズ、[b-ITU-T G.989.x] シリーズ、及び [b-ITU-T G.9807.1] は、10 ギガビット対応パッシブ光ネットワーク(XG-PON)、40 ギガビット対応パッシブ光ネットワーク(NG-PON2)、及び 10 ギガビット対応対称型パッシブ光ネットワーク(XGS-PON) システムについて説明している。これらはそれぞれ、各システムのプロテクションの観点についても説明している。メトロやバックボーンの伝送網と比較すると、アクセス網は、少数のエンドポイントだけであってもプロテクションに関連する全てのコストを負担する必要があるため、非常にコストに敏感である。主にコスト面の理由により、現在 PON のプロテクションシステムはほとんど導入されていない。ビル冗長を PON に組み込むと、さらにコストが高くなる。どのようなプロテクションアーキテクチャでも、追加コストを最小限に抑えると同時に TN の耐障害性を許容レベルまで向上させる必要がある。

TDM-PON のコンポーネントの故障率と復旧時間についてはいくつかの報告がある。故障率は大きく異なり、少なくとも地理的条件、環境、前提条件、コンポーネント設計に依存する。一部の TN の要素の障害は、他の要素よりもサービスに大きな影響を与える。例えば、ONU 障害または分配ファイバの切断は 1 つの RAN 要素にのみ影響するが、OLT や支線ファイバの障害では PON 全体がシャットダウンすることがある。平均復旧時間 (mean time to repair: MTTR) もネットワーク要素によって異なる。構築と運用の状況は事業者や地域によって大きく異なり、例えば地下と空中ではファイバの切断の確率が大きく異なるし、地下空間の状況もケースバイケースで大きく異なる。

使用不可率は、機器、サービス、またはファイバが使用できない確率として定義され、数学的には次のように定義できる。

$$\text{コンポーネントの障害によるネットワークの使用不可率} = \text{FIT} \times \text{MTTR} \times 10^{-9} \quad (9)$$

故障率のもう一つの尺度は、平均故障間隔 (mean time between failures: MTBF) である。これは、MTBF (h) =  $10^9 / \text{FIT}$  で表される、故障から故障までの平均期間である。

許容される使用不可時間は、通常、計画外の停止のために確保される時間を意味している。したがって、TN の可用性要件とプロテクションスイッチング速度の目標には相関関係がある。この切り替え (switch-over: SWO) は TN の耐障害性の定義の中の HLI と CHLI に対応している。計画的な PON アップグレードのユースケースでは 1 秒未満、さらには 50ms から 120ms の切り替え時間が必要となる。[b-ITU-T G.Suppl.51] には冗長性を追加し PON ネットワークの信頼性を高めるために推奨される方法が記載されており、TN の可用性の計算に使用することができる。

[b-ITU-T G.Suppl.51] のアクセス部分全体の TN 可用性は次の式のようになる。

$$A = 1 - \left( \frac{\text{MTTR}_{\text{OLT}}}{\text{MTBF}_{\text{OLT}} + \text{MTTR}_{\text{OLT}}} + \frac{\text{MTTR}_{\text{ONU}}}{\text{MTBF}_{\text{ONU}} + \text{MTTR}_{\text{ONU}}} + \frac{\text{MTTR}_{\text{FF}}}{\text{MTBF}_{\text{FF}} + \text{MTTR}_{\text{FF}}} + \frac{\text{MTTR}_{\text{DF}}}{\text{MTBF}_{\text{DF}} + \text{MTTR}_{\text{DF}}} \right) \quad (10)$$

FF = 支線ファイバ

DF = 分配ファイバ

分母の MTTR は MTBF と比較して無視できるため、保護されていない TDM-PON ([b-ITU-T G.Suppl.51] による FIT&MTTR パラメータ) では次のようになる。

$$A = 1 - \left( \frac{4}{400\,000} + \frac{24}{3\,900\,000} + \frac{24}{278\,000} + \frac{24}{2\,500\,000} \right) = 99.988\% \quad (11)$$

これは一例に過ぎず、多くの場合ではファイバの信頼性はここで使用されているものよりも優れていることからそれに応じて可用性も向上する。ただし、保護されていない構成で 99.999% を達成する可能性は非常に低い。保護されていない PON として同じ仮定の [b-ITU-T G.Suppl.51] を使用し、MTTR について OLT の 4 時間と支線ファイバの 24 時間を 60 秒 (0.017 時間) に変更すると、復旧速度は 50ms となる。

$$A = 1 - \left( \frac{1.4 \times 10^{-8}}{400\,000} + \frac{24}{3\,900\,000} + \frac{1.4 \times 10^{-8}}{278\,000} + \frac{24}{2\,500\,000} \right) = 99.998424\% \quad (12)$$

タイプ B は 99.999% の可用性をほぼ満たすことができることに注意する必要がある。使用不可の主な原因は、ネットワークの保護されていない部分であるドロップファイバ、及び ONU にある。これらの MTTR を改善すれば 99.999% を満たすことができるだろう。

切替後のレンジングについては、限定的な再レンジングの場合、必要な ONU が少ないほど切替時間が節約される。ポイントは再配置される ONU の数をできるだけ少なくすることである。幸いなことに、タイプ B プロテクションには容易に最小の数にするために支線ファイバ区間のみが保護される特徴がある。タイミングの関係では、現用系パスと予備系パスの唯一の違いは 2 本のトランクファイバの長さが異なる可能性が



あるために生じる RTD の違いである。そのため、同一システム内の全ての ONU で切替前と切替後の伝送時間の差が同じであることが容易にわかる。OLT が ONU ごとにレンジングプロセスを行うのではなく、接続されているいずれか 1 つの ONU を再レンジングするだけで、この「共通の伝送時間差」を取得することは理にかなっている。その後、この情報に基づいた簡単な計算によって他のすべての EqD を更新することができる。

注- 事前レンジング/等化機能では、(TWDM-PON で) 代替波長を介して事前計算した 0 距離の EqD が、専用アクティブ波長 (dedicated activation wavelength: DAW) 及び [b-ITU-T G.989.3] で確認できる。これらは代替波長における代替レンジングのオプションを示している。

アクセスネットワーク以外の可用性の他のソースを考慮すると、99.999%を確実に達成するために、タイプ C アーキテクチャを検討することができる。タイプ C プロテクションにより、(フルレンジングを含め) 1 分間という低速な切替速度で 99.999%の可用性を実現できる。分配ファイバと ONU の両方を全て二重化するタイプ C の冗長性を PON に組み込むと、タイプ B よりもはるかにコストが高くなる。上記の要件の項で述べた無線の回復力を考慮すると、TN の回復力を許容できるレベルにするためにタイプ C の追加コストが必要になるかは疑問がある。

結論: TDM-PON のプロテクションは、5G NR のバックホールとミッドホール向けの TN に回復力を提供できる。特に、タイプ B の自動プロテクションスイッチングは、5G NR のスモールセルにマッチするように、より完全に動作する。

## 8.5 セキュリティ

PON ネットワークは、複数のセキュリティ機能を使用して次のことを行う。

- ユーザごとにトラフィックを分離
- データトラフィックの暗号化
- 不正な機器の接続防止
- 制御メッセージの検証

これらのセキュリティ機能は、PON のデータ伝送で使用されるパケット構造に依存している。データの各パケットは、ペイロードと、送信に関する情報 (データ長、送信元、送信先など) とセキュリティ情報(暗号キー、タイムスロットコードなど) を含むヘッダで構成される。

TDM-PON はポイントツーマルチポイントのアーキテクチャであり、1 つのファイバを分割して複数のエンドポイントまたはユーザにサービスを提供する。現在の TDM-PON の標準は、PON を介して転送されるデータのセキュリティを確保する機能を定義するために多くの努力を払ってきた。

下り方向では、OLT はすべての ONU にトラフィックを送信し、ONU は全てのエンドポイント/ユーザのデータパケットを受信するが、GEM 内の識別子が一致するパケットしか取り込むことしかできない。ネットワーク上の悪意のある ONU は、認識された GEM 識別子が提供されていないため、パケットを一切取り込むことができない。

上り方向 (RAN ベースステーションからコアネットワークへ) では、ONU はトラフィックを OLT に対してのみ送信する。各 ONU は割り当てられたタイムスロットで OLT への送信を行う。信号は例えばスプリッタや OLT などから反射して戻ってくることはない。これは、これらのデバイスが光をほとんど反射しないように設計及び製造されているためである。そのため、ある ONU が送信したトラフィックを別の ONU が傍受することはない。悪意のある ONU がアラームを発生せず何らかの方法でネットワークに挿入された場合でも、OLT のプロビジョニングデータベースで認識されないため、データを送信するためのタイムスロットが付与されない。

PON のトラフィックに干渉するには、悪意のあるユーザが光ファイバネットワークの物理的性質に干渉する必要がある。ネットワークに導入されたデバイスには物理的な接続が必要であり、物理接続によりネットワーク内の信号が中断されるためアラームが発出されるはずである。

GPON、XG-PON、XGS-PON などを含む現在の PON システムは広く展開されており、通信のセキュリティを保証する唯一の暗号化アルゴリズムとして高度な暗号化標準 (AES-128) を採用している。AES は国際的な暗号化アルゴリズム [b-ISO/IEC 18033-3] で標準化されているブロック暗号の 1 つである。一般的なブロック暗号は、定義された長さ、すなわち 128 ビットの平文のブロックから同じ長さの暗号文のブロックを生成する。ONU で送受信されるすべてのパケットは、その ONU と OLT だけが認識しているキーで暗号化される。暗号化キーは各 ONU によって生成され、OLT にアップストリームで送信される。暗号化キーはネットワークの設定に応じて定期的 (例えば毎時、毎日) に更新される。前述のようにトラフィックはネットワークに反射して戻ってくることはないため、他の ONU は暗号化キーを傍受することはできない (また、暗号化キー自体も送信時に暗号化される)。暗号化はデータペイロードと GEM ペイロードの両方に適用されセキュリティレベルが向上するため、GEM フレームを傍受されても読み取ることはできない。

メッセージの整合性チェック (message integrity check: MIC) は、下り及び上りの制御メッセージが正規の送信元から送信されていることと、改ざんされていないことを確認するために、OLT 及び ONU によって行われる。下りではメッセージ送信時に OLT によって MIC が生成・挿入され、受信時に ONU によってチェックされる。上りでは、メッセージ送信時に ONU によって MIC が生成・挿入され、受信時に OLT によってチェックされる。全ての ONU に MIC の生成に使用される専用のキーセットがある。これらの MIC キーは、ONU のシリアル番号や登録 ID など、ONU のアクティベーション処理中に双方向で交換される情報に基づいて OLT と ONU で独立して計算される。したがって、OLT と ONU だけが、その ONU に関連する制御メッセージの MIC を生成・検証するために必要な全ての情報を持っている。MIC は制御層で実行され、ネットワークからデータを盗もうとする悪意あるユーザというよりも、ネットワークを妨害しようとする悪意あるユーザに対する保護手段となる。

結論: TDM-PON は信頼できない TN と考えられている。バックホール及びミッドホールの IPsec トンネルは TDM-PON 経由で転送できる。PON の追加の暗号化は、MIC に追加レベル (ホップバイホップ) のセキュリティを提供している。

## 8.6 共有アクセスドメイン

TDM-PON ベースのアクセスにおけるスライシングのすべての要件については、[b-ITU-T SG15-C-2862] を参照のこと。

必要となる TN 接続のためのサブスライドメインは、[b-BBF TR-370] の固定アクセスネットワーク共有 (fixed access network sharing: FANS) で定義されている仮想スライスの TDM-PON の仮想アクセスノード (virtual access node: vAN) で実装できる。FANS はより広範なアクセス機能を仮想ネットワークオペレータ (virtual network operator: VNO) に公開できるリソース共有アプローチである。TDM-PON の vAN モデルでは管理プレーンとデータプレーンの両方でネットワークスライシングを行う。仮想 (ファイバ) アクセスドメインでは、各 VNO は集中管理システムのブローカーやメディエーションを介して、仮想アクセスノード (vAN) だけでなくデータプレーン内の他の L2 仮想化機能も制御する。SDN ベースの FANS モデルは、いわゆるソフトウェア定義アクセスネットワーク (SDAN: software defined access network) を活用して、ネットワークの自動化、インタフェースのプログラマビリティ、FANS サービスの柔軟性と機敏性、仮想ドメインの分離を実現する。

結論: TDM-PON のスライシングソリューション (検討中) 及び FANS の概念は、5G NR のサービススライシングで必要とされるサブスライス機能を提供するものである。

## 8.7 アクセスマネジメント

ソフトウェア定義ネットワーク (software defined network: SDN) 基盤は、リソースコントローラと、TDM-PON などのさまざまな PON 装置で構成される。SDN 基盤には PON 装置の監視・制御を支援する機能がある。

SDN コントローラの管理的側面を次に示す。

- SDN コントローラの管理については、[b-BBF OB-BAA] に記載されている。
- 要素管理システム (element management system: EMS) は OSS とのやり取りのために管理シグナルを送受信する必要がある。

結論: TN ドメインの要件をサポートするために、TDM-PON の管理には [b-BBF OB-BAA] に従って TN 管理システムに統合された SDN 制御機能も EMS に含める必要がある。

## 8.8 まとめ

この章は、バックホール/ミッドホールの要件と PON 機能の比較に重点を置いており、容量、遅延、時間・周波数同期、高可用性、セキュリティ、アクセスマネジメントの共有、アクセスマネジメントが含まれる。PON と 5G のスモールセルをめぐる技術はいずれも現在発展途上であるため、今後さらなる検討が必要である。

## 9. 推奨されるアプリケーションシナリオと要件

表 18 は、統合 CU+DU+RU の SC を含む、5G RAN 及び適用可能なベアラ技術におけるセグメントの主な特徴を分析する。

表18- 5G RANのすべてのセグメントの比較

セグメント	距離	帯域幅	レイテンシ	トポロジ	適用可能なテクノロジー	備考
5G DIS (BBU-rHUB)	ほぼ 2km 以上。	25G eCPRI。4G は CPRI (10-157.3 G)。		パラレル P2P	ファイバ	通常は同じ建物内
5G DIS (rHUB-pRRU)	PoE $\geq$ 0.1km; ハイブリッドファイバ $\geq$ 0.2km; カスケードによって拡張可能。	4G pRRU は GE ポートです。5G pRRU 6-8 G (100MHz、4T4R、8B10B/64B66B、3.2:1/4:1)。		パラレル P2P	CAT6A+PoE またはハイブリッドファイバ。	通常は建物の同じ階にある。
5G DIS の BH(BBU-CO 側)	BBU はマクロセルと同じだが、将来的には違いが生じる可能性がある。					
SC の BH	20km	加入者数と実際のトラフィックに関連する; 第 7 章参照	7 章参照	スター	10G/50G TDM-PON 等の高速 PON	統合 CU+DU+RU。CU+DU または DU+RU を統合できる。
SC の MH	待機時間の要件を満たす必要がある。	計算方法は [b-3GPP TR 38.801] の表 A-1 及び表 A-2 に示す。MH と BH の推定差は約 1% である。	[1.5~10ms]	論理的 P2P またはスター (1 つの CU に接続できるのは 1 つの DU のみ)	UDP/IP をサポートする。CU と DU が同じ部屋にある場合は、ケーブル接続 (パラレル P2P) で MH としてふるまうことができる。10G/50G TDM-PON などの高速 PON。	分離 CU。統合 CU+DU の場合は、MH はない。

表18- 5G RANのすべてのセグメントの比較

セグメント	距離	帯域幅	レイテンシ	トポロジ	適用可能なテクノロジー	備考
マクロセルのBH	40km 未満	gNB あたり約 2G(平均値)。gNB あたり約 6G(ピーク値)。	> 4ms	主にリング	IP (IPRAN+ IPRAN など)	BBU (または DU、または統合 CU+DU)のプールの規模が重要。多くの 10GE またはそれ以上のレートポートが必要。
マクロセルのMH	レイテンシの要件を満たす必要がある。	計算方法は [b-3GPP TR 38.801] の表 A-1 及び表 A-2 に示されている。MH と BH の推定差は約 1%である。	[1.5~10ms]	論理的 P2P またはスター (1つの CU に接続できるのは1つの DUのみ)	UDP/IP をサポートする。CU と DU が同じ部屋にある場合は、ケーブル接続 (パラレル P2P) で MH としてふるまうことができる。	分離 CU。統合 CU+DU の場合は、MH はない。
マクロセルのFH	D-RAN <300m C-RAN <10/20km。 密度の大小は異なる。	多くの場合 $n * 3 *$ 25G (eCPRI)、10GE の場合もある。	100µs	D-RAN は P2P。C-RAN はほとんどがスター。	ファイバ、波長あたり 25G の WDM。	

注: 「マクロセルの BH」は、従来の D-RAN マクロサイトを意味する。BH のレイテンシは 4ms を超えるが、特定のアプリケーションのレイテンシの場合はこれよりも低くなることもある。

## 9.1 トポロジ

TDM-PON は SC の MH/BH において FTTH と同じ ODN 資源を使用すべきであり、従ってスタートポロジが依然として主要なものである。

MH は論理 P2P とスター (並列 P2P) である。1つの CU のみを 1つの CU に接続できる。BH は、メッシュ、リングネットワークなどの複数の柔軟なトポロジをサポートする TCP/IP ネットワークであり、オペレータの複数のネットワーク配置をカバーできる。

PON は通常、スタートポロジである。この補足では、FTTH シナリオと同じ ODN リソースを使用する。ODN に対する本補足文書の地域/地理的差異は限定される場合がある。

## 9.2 ユースケース

この節では、10.2 節に記載されているように、3G 及び 4G の SC のために行われる作業に言及する。

SC の大規模展開では、既存のネットワークに豊富なモバイル BH のリソースが必要である。同時に、BH ベアラ網は、高いネットワーク帯域幅、信頼性、クロック時刻同期能力及び柔軟な電源供給能力を持つことが要求される。移動体通信事業者はネットワークでの収入を確保できるように、SC の BH トラフィックを搬送するために、費用効果が高く、柔軟で、信頼できる技術を選択することを考慮する必要がある。

SC の配置は、既存のマクロ BS よりも地理的に集中的に配置されるため、従来のバックホールのプラットフォームを使用することは現実的ではなく、そして UL ポートの帯域幅要件にも大きな課題が出てくる。一方、カバーする必要があるエリアは、広範囲に展開されている FTTx ネットワークとの整合性が高い。FTTx を用いることで、オンデマンドでの SC の展開を、柔軟かつ迅速に行うことが可能となり、迅速な ROI の実現、展開コストの低減、過負荷耐力に優れたリソースの削減などのメリットがある。

将来、SC はより多モード、インテリジェント、統合型になり、機器の形態、能力、MH/BH ベアラ要件の

多様化をもたらすことに注意すべきである。FTTx のアクセス網は、スムーズな展開が可能であり、さまざまな形態の ONU 製品がシリーズ化されており、SC のニーズに柔軟に対応することができる。異なるシナリオと、異なる役割や許可と異なる地域、E2E の視覚的なインタフェースを使った統合管理による PON 機器の柔軟な展開は、SC の屋内と屋外の応用シナリオを十分に満たすことができる。これによりトラフィックを運ぶ時、遅延、QoS、クロック同期及び電源供給に関して指定された要件を満たすことができる。

### 9.3 ネットワークリソースの共有

5G 構築の段階的な発展に伴い、物理的な BS の密度と  $\text{km}^2$  あたりに構築されるファイバ接続の数が大幅に増加し、FTTx ユーザの数とファイバ接続の数も増加する。コスト管理を最大化するためには、通信ルームのキャビネット、パイプを通す穴、柱、ODN、光ケーブル、光ファイバなど、既存の FTTx の光ファイバのインフラストラクチャを最大限に活用する必要があり、固定ネットワークとモバイルネットワークの基本リソースの共有を実現しなければならない。次の利点が期待される。

- 優れた拡張性: 5G の加入者数の増加や、新サービスの適用、及びトラフィック消費の増加に伴い、5G の RAN の容量の需要は引き続き増加していく。FTTx は優れた長期的な進化及びアップグレード機能を備えている。5G のベアラに適した新しい低遅延技術も継続的に改善されている。
- 優れた QoS: FTTx は高い QoS 機能を備えているため、音声、データ、及びビデオの 3 つのサービスを十分にサポートでき、5G サービスをより適切にサポートできる。TDM-PON は柔軟な統計多重化と DBA 機能を実現可能で、システム帯域幅をフルに利用することができる。
- 同期のための便利で効率的な展開: 5G はベアラネットワークが時間と周波数の同期をサポートする必要があり、PON はそのための柔軟な適応の特性を持っている。

5G の世代では、展開に関しては DU を集めて設置する C-RAN のアーキテクチャを主に採用した。固定ネットワークアクセスの場合、DU が集まっているところからユーザまでの距離と、アクセスネットワークの通信室からユーザまでの距離は、基本的に同じである。大きな通信室があるいくつかのエリアでは、固定網と移動網のための共通の設置場所やリソースの共有をすることが可能であり、設備投資を効果的に削減することができる。現在の通信室、電源、空調装置・エアコン、伝送設備などの固定網のリソースは共有できるため、設備の集中管理にも便利である。

DU を集めているような C-RAN とは、あるネットワーク上の高密度なエリアでの FH の伝送を意味する。これは本文書の範囲外であるかもしれない。主な焦点は、CU+DU+RU の SC を持つフル D-RAN、または「MH」として定義されている F1 インタフェースを持つ分散 DU (RU+DU の SC) でなければならない。

共有のネットワークインフラストラクチャを構築することは、各 MNO で確認された方法となっている。このようなモバイルネットワークインフラストラクチャの共有にはたくさんの形態がある。SC のネットワークではインフラストラクチャの共有がさらに重要になる。これは、高密度のネットワーク展開と、より広範で多様な展開シナリオが必要になるためである。5G の SC ベアラ伝送する PON の将来の実用事例においては、PON の SDAN と NFV 技術を通じて PON ネットワークのスライシングを使うことで、共有は実現可能となる。ネットワークスライシングの実現は E2E であり、そこでは各スライス (例えば、各 MNO によって割り当てられる) は、それ自身のネットワークアーキテクチャ、エンジニアリングのメカニズム及びネットワークのベアラを持つことができる。ネットワークスライシングでは、ほとんどのネットワークアクセスとサービスのリソース (接続、コンピューティング、またはストレージ) の仮想化と動的な割り当てを実現し、オンデマンドで、柔軟で、従量課金制であるようなクラウドサービスに対応している。ネットワークスライシング方式は、共有化を実現し、より拡張性があり、小規模設備の所有者であってもより多くのテナントと新規ユーザを収容でき、サービス提供のタイプは 5G の企業向けの産業も含むことができる。図 29 も参照されたい。

また、SCF (small cell forum) は、SC の物理ネットワーク機能 (PNF) 及び仮想ネットワーク機能 (VNF) イ

インタフェースでマルチベンダー標準インタフェース（ネットワーク機能アプリケーションプラットフォームインタフェース（nFAPI））を指定している。これにより、SCの物理ハードウェアのPNFと、VNFの展開を分けることができる。一般的な共有シナリオでは、コントローラはたくさんのPON OLTリソースの集まりに属することができる [b-SCF500]。

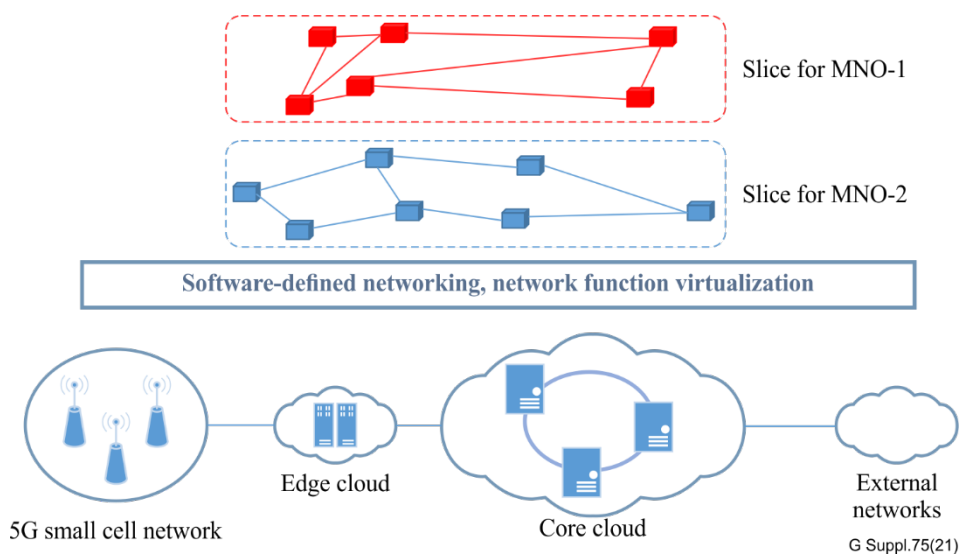


図 29- スマールセルの共有のためのネットワークスライスの概念化の例  
([b-SCF500] の図 23)

#### 9.4 ファイバ使用率

使用される光ファイバの量には（冗長または非冗長の条件下で）、支線ファイバの長さ、分配ファイバの長さ、光ファイバの全長、及びそれが光ケーブルの構造と方向に適合するかどうかが含まれる。

TDM-PON がベアラ伝送している SC に関しては、

- 支線ファイバの数 = SC の数 \* SC インタフェースの平均帯域幅（もしくはピーク時の帯域幅？） / 単一 PON ポートの容量
- 分配ファイバの数は SC の数である
- 通常、PON のトポロジはスター型である。本文書では、FTTH と同じ回線要件（ルート、ファイバ・コア、ファイバケーブルなど）及び利用量計算方法を使用できる。モデルの記述に使用される数式と計算例については、今後さらに調査する。

#### 9.5 まとめ

SC は、カバレッジが小さく、BS の密度が高く、BH の帯域幅が小さいことを特徴とする。したがって、PON のベアラでは BH サービスに対して高い優先度を与えることができる。各 BS へのユーザアクセス数は異なるため、帯域幅の要件は大きく異なる可能性がある。統合されている SC に接続する ONU の UNI ポートは、柔軟な帯域幅要件に適応するために大容量（例:  $\geq 10\text{Gbit/s}$ ）である必要がある。PON は豊富なファイバのリソースと P2MP の利点を持ち、それにより支線ファイバを節約することができる。

マルチ PON モジュール（MPM）や将来の高速 TDM-PON を使ったとしても、現在の 10G TDM-PON では PON ポートの容量は大きく拡張され、その容量は SC のより多くの MH/BH に耐えることができる。

## 10 その他のトピック

### 10.1 5G DIS とベアラ技術

現在の新しい DIS (Digital Indoor System) の主な特徴は次の通りである。

- 第1は、5G 周波数帯 (FR1 と FR2 を含む) をサポートし、これにより従来のパッシブ DAS の物理的制限とアクティブ DAS のシステム複雑性を解決する。
- 第2は、RRH に直接接続された BBU を使用する。同一単一セル下の複数の pRRU (pico Remote Radio Unit) に流れる信号は直接重畳され、処理のために BBU に送り返される。
- 第3は、MIMO マルチチャネルへの進化に対応することである。
- 第4は、視覚的な OAM の実現である。
- 第5は、5G マルチサービスの開発に対応していることである。

分割ベースバンドのソリューションに関しては、オプション 8 (CPRI)、オプション 7 (eCPRI)、さらにオプション 2 (F1) を含む 6.1 節に記述されている。pRRU はまた、RAP (Radio Access Point) でもある。すなわち、後に統合されるリアルタイムベースバンド機能が使われている。

新しい DIS では、イーサネットケーブルまたは光/電気のハイブリッドケーブルを伝送メディア及び電源ラインとして同時に使用して、アクティブアンテナヘッドエンド装置の展開のみを必要とする。インストーラは非常に便利で、導入も迅速である。これらの機能は、5G の屋内ネットワークの要件を満たすことができる。

従来の DAS システムと比較して、現在の新しい DIS は、より均一で、より単純で、より柔軟なアーキテクチャへと進化し始めている。

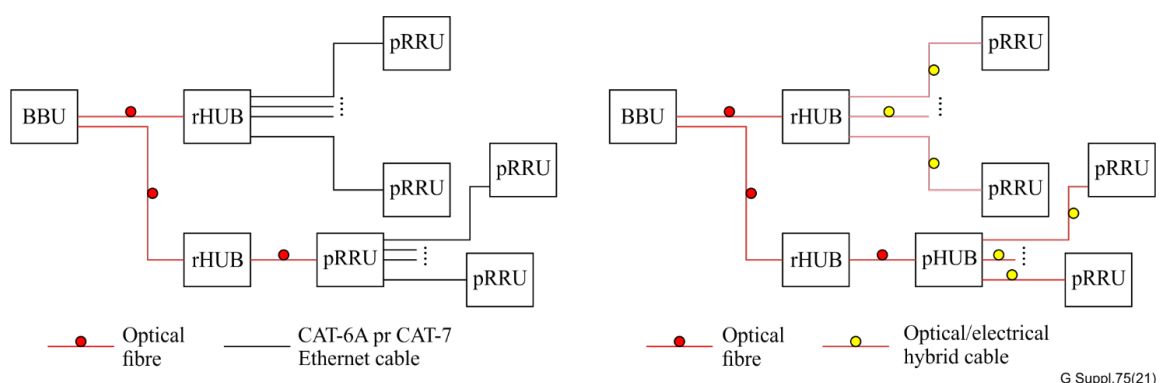


図 30- BBU (DU) + rHUB + pRRU アーキテクチャ

5G の屋内カバレッジは、5G の小型及びマイクロセルに固有のアプリケーションシナリオと考えることができる。それは、BBU(DU) + rHUB + pRRU アーキテクチャを採用し、光及び電気のハイブリッド伝送をサポートでき、5G の 3.4~3.6GHz 周波数帯をサポートし、将来ミリ波周波数帯をサポートするために拡張される。

図 30 に示すように、rHUB と pRRU の間には、10Gbit/s の光/電気ハイブリッドケーブルまたは PoE 付きの CAT6A Ethernet ケーブルが使用される。BBU(DU)と rHUB は、10G/25G/40G 光インタフェース (現在は主に 25G 光インタフェース) を使用して光ファイバで接続され、インタフェースは CPRI または eCPRI プロトコルである。rHUB は AC 電源を使用する。通常、1つの rHUB は 8 個の pRRU を接続する。pRRU は、複数の外部アンテナに接続することもできる。

なお、rHUB と BBU の間の光ファイバ接続は、複数のレベル (4 レベル等) でのカスケード接続が可能であり、現在は主に 2 レベルのカスケード接続である。eCPRI 内の rHUB から BBU へは、スイッチを使ったネットワークを介して伝送できる。この FH リンクについては本文書では対象外となっている。または、rHUB

が gNB の DU 機能を統合した場合、この伝送は、生産現場及び/またはオフィス LAN と統合することができる。後者については、TDM-PON を使用できるパッシブ光 LAN として位置付けることができる。この場合、BH または MH が使用され、これは本文書で記載されている領域に合致している。

DIS の装置仕様には、次の要件がある。

CCSA 規格 [b-CCSA] での DIS に基づき、BBU には A1、A2、A3 の 3 種類がある。タイプ A1 BBU は、100MHz 帯域幅の 12 以上の 4T4R セルをサポートする必要がある。タイプ A2 BBU は、100MHz 帯域幅の 4T4R セルを少なくとも 4 つ以上サポートする必要がある。タイプ A3 BBU は、100MHz 帯域幅の少なくとも 4 つ以上の 2T2R セルをサポートする必要がある。BBU と rHUB との間の各光インタフェースの通信速度は、10GE 以上である。BBU と rHUB は光ファイバで接続され、その延長距離は 2km 以上である。BBU と rHUB 間のトポロジはスター接続である。タイプ A1 BBU は、6 個以上の rHUB をサポートする。タイプ A2 及び A3 の BBU は、4 つ以上の rHUB をサポートする [b-CCSA DIS]。

rHUB には、pRRU に接続するために、少なくとも 8 個の 10GE 以上のイーサネットポート、または 8 個の 10GE 以上の光ポートが必要である。pRRU は、10GE 以上の通信速度を有する少なくとも一つの電気/光インタフェースを有する。pRRU が PoE(光/電気ハイブリッドケーブル) 電源を採用している場合、その延長距離は 100/200m 以上である。rHUB は、pRRU のスター接続に対応している [b-CCSA DIS]。この rHUB から pRRU への接続は FH 接続であり、本文書では対象外となっている。

タイプ A1 BBU は、rHUB を介して接続された 48 以上の pRRU と、オプションとして 96 の pRRU に対応する必要がある。タイプ A2 及び A3 の BBU は、32 以上の pRRU、オプションで 64 の pRRU に対応する必要がある [b-CCSA DIS]。

市場で広く使用されているイーサネットケーブルは、CAT5E、CAT6、CAT6A、CAT7 である。CAT5E イーサネットケーブルはギガビットイーサネットに用いられ、伝送距離は 100m に達し、1000Mbit/s の伝送速度に対応できる。CAT5E イーサネットケーブルと CAT6A イーサネットケーブルの伝送距離はともに 100m である。CAT6/CAT6A のイーサネットケーブルは、250MHz 帯域幅で最大 10Gbit/s の伝送速度を提供できる。10GBASE-T のアプリケーションでは、CAT6/CAT6A のイーサネットケーブルの最大伝送距離は 37/55m に達することができる。CAT6A イーサネットケーブルは通常の 5G の屋内シナリオで使用でき、pRRU では PoE 電源が使用される。

光/電気ハイブリッドケーブルは、光ファイバと電力伝送メタル線を統合し、広帯域アクセス、電力供給及び信号伝送の問題を解決できる。ハイエンドの 5G 屋内シナリオで使用可能である。

5G の進化に直面する中で、屋内ネットワークアーキテクチャは、5G NR への進化を迅速に導入するための能力を持つ必要がある。また、ある一定期間内で統合型 LTE+5G NR ネットワークを形成するためには、5G NR モジュールを短期間で重ね合わせることで、新たな 5G モバイルサービスを可能にする必要がある。これにより、5G ネットワークを介したのと同じように高い QoE を加入者に提供できる。しかし、従来の RF ケーブルと屋内で主に展開されていた装置は、C バンドやミリ波バンドなどの新しい 5G NR 周波数帯域に対応していないため、再度展開する必要がある。すべての新しい RF ケーブルを屋内に再度展開するコストは非常に高くなってしまふ。場所によってはスペースがなく、新しいケーブルを導入できないこともある。DIS の構築は、5G の進化を見据えたものであり、DIS の「ケーブルの変更やエンドポイントの増設が不要」という目標の実現や、建設・改修コストの削減、必要に応じた 5G の導入に向けた取り組みが必要である。したがって事業者は、かさばる RF ケーブルを交換し、将来の投資の繰り返しを回避するために、イーサネットケーブル、光ファイバ、光/電気ハイブリッドケーブルなどの、高帯域幅で軽量の屋内伝送を導入する必要がある。

イーサネットケーブルアーキテクチャでは、CAT6A イーサネットケーブルを事前に展開してから 5G モジュールを重ね合わせる必要がある。または、CAT6A が現在は 3G + 4G の統合 pRRU に接続されている場合は、将来は 3G + 4G + 5G の統合 pRRU に置き換えられることになる。



光ファイバーアーキテクチャの進化のためには、光/電気ハイブリッドケーブルによって接続された 3G+4G の統合 pRRU において、5G の pRRU を、CAT6A イーサネットケーブルを介してカスケード接続するか、または 3G+4G+5G の統合 pRRU に置き換えることができる。

DIS システムはマクロ基地局と同じ BBU 装置を使用するため、そのバックホールのベアラはマクロ基地局と同じである。

DIS のベアラの中で、PON を使う可能性のある適用シナリオの初歩的な分析は次のとおりである。

最初に、BBU の容量が小さい場合、BBU と DIS は同じ建物内に配置され、CN と BBU の間に P2MP のスター型トポロジが存在する。現在の Fiber to the block (FTTB) では、10G TDM-PON はコアと BBU の間の BH として使用でき、将来の拡張では高速 PON [b-ITU-T G.9804.x] を使用できる。BBU と rHUB が同じ建物内に配置されているか、または比較的近い場合は、BBU と rHUB の間、そして rHUB と pRRU の間にそれぞれ特定の要件を満たすケーブルを使用するため、PON を適応するようなシナリオはない。これは、DU の場所によっては異ってくる。DU (CU から BBU を分割) が rHUB にある場合は MH リンクを使用することができるので、FTTB と同じ注意事項を適応して、本文書でカバーできる内容となる。

第 2 に、BBU の容量が大きい場合、またはマクロ基地局の BBU とラックを共有する場合、または BBU が局舎内の部屋に設置されている場合は、BBU と rHUB は互いに離れているので、スター型トポロジになる。BBU と rHUB の間の帯域幅と遅延の要件によっては、10G /25G インタフェースを持つさまざまな WDM テクノロジを使用して、BBU と rHUB 間の FH を処理することもできる。

## 10.2 3G・4G 時代のスモールセルを支える PON の研究

3G、4G では、SC の BH サービスに対応する PON の研究・試験が多く行われており、[b-Yang]、[b-Wang-1]、[b-Liu-1]、[b-Lin]、[b-Wang-2] といった関連論文が多数発表されている。この節では 5G 時代の参考のためにそれらを要約して分析する。分析においては比較例として IPRAN 技術を用いた。

### 10.2.1 技術的な利点

#### 10.2.1.1 ネットワークパフォーマンスの向上

Deep Coverage (住宅地、商業地) の対象エリアはブロードバンドユーザにとって注目されるエリアでもあり、ブロードバンドのリソースも豊富であり、LTE の SC 用の BH ネットワークを提供するのに適している。SC の BH サービスに PON を使用することで、既存の ODN、アクセスネットワークポイント及び FTTH ネットワーク構築におけるその他のインフラ資源によるネットワークの効率を十分に活用して、実際のポート使用率を効果的に高めることができる。

#### 10.2.1.2 ファイバのリソースの節約

従来の P2P 型トポロジのネットワークと比べて、PON システムは P2MP 型トポロジの構造を採用しており、これは分散していて予測が難しい SC の展開構造と一致している。PON アクセス方式のために光を分岐することで、支線ファイバの少なくとも 80% と分配ファイバの 50% を節約できる。SC の密度が高いほど、支線ファイバを節約できる量が多くなる。

#### 10.2.1.3 シンプルで迅速な導入

FTTH の ODN の分岐点は、住宅地、建物、道路、村などにある。ブロードバンドネットワークはこれらの場所にあり、屋内配線光ケーブルを敷設するだけでアクセスすることができる。

#### 10.2.1.4 超広帯域アクセス

10G PON の展開により、FTTH は、BS の帯域幅の要件を満たすために、100Mbit/s、1Gbit/s 及び 10Gbit/s

のアクセス能力を柔軟に提供可能である。

#### 10.2.1.5 QoS サポート

QoS に関しては、PON のネットワークは比較的完全な VLAN 機能を備えている。VLAN を使ったマルチサービスの分離により、サービスフローの分類、優先度マーキング、キュースケジューリング、バッファ管理、輻輳制御を実現し、BS の BH サービスに仮想プライベートチャネルを提供することができる。

### 10.2.2 技術的なリスク、不利な点と提案

#### 10.2.2.1 保護機能

PON のネットワークはスター型ネットワークであり、IPRAN のようなリング保護やスイッチング能力を持たないため、BS に対する保護能力は比較的弱い。タイプ B またはタイプ C の保護モードを採用すると、コストが高くなり、ポート使用率が低くなる。

PON UL は次の 2 つの方法に分けられる。

方法 1: ブロードバンドリモートアクセスサーバー(BRAS) / サービスルーター(SR) への OLT のアップリンク接続。通常、BRAS/SR に対する 1 本の UL では、二重の親ノード保護を提供することはできない。OLT は、BRAS/SR への 2 本のアップリンクによって保護機能を向上させることができる。

方法 2: OLT の BS に対するサービスを、マクロ BS のモバイル BH のベアラ網 (IPRAN など) に直接接続して信頼性を向上させる。通常、OLT 装置と IPRAN 装置は同じ通信室にある。IPRAN は、そのネットワークトポロジと他の特性により、強力な保護能力を持っている。

保護の話題は 7 章と 8 章でも扱われている。TDM-PON における進化により、OLT での(地理的)冗長性を使って、保護のための選択肢を改善することができる。しかし、5G 時代においても、これらの冗長性オプションでは「コストが高くなり、ポート利用率が低くなる」という重要な点が残る。ただし、IPRAN の冗長オプションなどの他のバックホールベアリング技術でも、コストが高くなり、ポート使用率は低くなる。PON 保護技術は成熟しているが、PON に基づいた伝送の計画とエンジニアリングのためには、より多くの試験が必要となる可能性がある。この保護に関する条項は、展開戦略に関する 10.2.3 項に関連する。

SC の重要な点は、障害が発生した場合に他のセルカバレッジに「フォールバック」する概念である。TDM-PON は、SC の層がマクロセルの層と補完的である場合には、良好な(非)保護のソリューションになる可能性がある(7 章で説明した無線の回復力を参照)。

#### 10.2.2.2 不正 ONU

GPON ネットワーク固有の不正な ONU の問題により、PON ポート下のすべての BS がオフラインになってしまう可能性がある。

PON 技術の成熟した使用状況により、現在のネットワークでは不正 ONU は非常に少ない。不正 ONU の原因としては、ONU の光モジュール部品の異常、光スプリッタの損傷、ONU の電源モジュールの異常などがあり、それにより長時間の発光、すなわち、不正な ONU の発生となる。長時間発光する ONU の検出機能を ON にすることで、連続発光を検出し、不正 ONU を制御することができる。この機能では接続されている ONU で長時間発光障害を検出したとき、長時間の発光障害の検出間隔とシャットダウン方法 (自動シャットダウン/手動) を設定することができる。制御されていない不正 ONU、ランダム発光、ONU 内の光モジュールが破損しているために有効な情報を OLT が受信できないなどの特殊な状況では、その不正 ONU を特定できないため、オンサイトでのファイバの取り外しが必要となる。

ある異常端末が中央局 (CO) 側機器に影響を与え、他のすべての端末が影響を受けるリスクは、技術としての PON とすべての P2MP では共通である。これについては、TDM-PON の仕様の [b-ITU-T G.987.3]、[b-ITU-T G.9807.1]、[b-ITU-T G.989.3]、[b-ITU-T G.9804.2] で、「不正 ONU」に関連する機能を参照できるかも

しれない。

5G の時代になっても、この問題は依然として注目されている。関連する対策は、コストと保護能力を総合的に考慮する必要がある。多数の FTTH ONU の中で、不正 ONU の問題の影響を避けるために、BH サービスに関して別の PON ポート占有すべきかどうかの問題は、故障確率とコストへの影響を組み合わせるべきである。

### 10.2.2.3 同期

3G 及び 4G 時代には、一部のデバイスで 1588v2 の時刻同期に対応していないという問題があった。

5G 時代では、現在の PON システムの伝送周波数とクロック信号技術が成熟している。OLT は 1588v2 や SyncE などの機能をサポートしており、PON の物理回線のクロックを使用して周波数同期を実現できる。詳細については 7 章及び 8 章を参照。

### 10.2.3 3G と 4G 時代のアプリケーション展開戦略

- マクロ BS は、IPRAN などのネットワークリソースには都合が悪いか、または到達不能な場所にある。マクロ BS が位置するエリアは PON カバレッジを持ち、OLT からの距離は 20km 以下である。PON ネットワークはモバイルバックホールサービスを担うことができ、IPRAN などの他のベアラバックホール技術の補完として推奨することができる。コスト面でもいくつかの利点がある。
- コストと保護機能に関する問題に対処するには、次の戦略を包括的に検討する必要がある。独立した PON ポートを介して OLT に SC を接続することができる。障害箇所の特定制と分離を容易にするためには、BH を搭載する PON ボードは、通常のブロードバンドユーザの ONT への影響を回避できるように、通常の固定回線ブロードバンドサービスを搭載しないようにする必要がある。重要度が低い端末のマクロ BS や、駐車場の DAS のように利用者が少ない SC に対しては、独立せずに利用可能である。
- SC が PON インタフェース(光モジュールに統合された ONU 機能であっても)を持つ必要性は、さらに検討する必要がある。これは、装置のスケラビリティに影響する可能性があることに注意すべきである。

展開戦略は 5G の場合(特に高密度化された SC)で異なる可能性があるが、これは事業者の戦略に大きく依存する。上記の展開戦略は、戦略の一例として考えるべきである。事業者がこれらに必ずしも従う必要はない。例えば、10.2.3.2 項の「もはや通常の固定ブロードバンドサービスを伝送しない」という仕様は、5G の文脈において自動化を進化させた(例えば、仮想スライスによる固定アクセスネットワーク共有する)事業者にとっては異なる可能性がある。

### 10.3 統合化アクセスとバックホール(IAB)と、スモールセル向けのバックホールをサポートする PON の比較

5G ネットワークは超高密度ネットワークであり、経済的、効率的かつ拡張性のある BH ソリューションを提供することは非常に困難である。現在、BH 技術は主に IP 無線アクセスネットワーク(IPRAN) や、PON などの固定回線技術が使われている。5G RAN の無線ベアラ技術では、Sub-6G、ミリ波、リレーも使われる。

5G の展開で最も困難なことの 1 つは、特にミリ波 (FR2) が使用されている場合、セルカバレッジが他のレガシーテクノロジー(例:3G、4G) と比較して小さいという点である。そのため、統合化アクセスとバックホール (integrated access and backhaul: IAB) という新しい技術が [b-3GPP TR 38.901] に追加された。図 31 も参照してほしい。カバレッジは、IAB を通じて拡張できる。トラフィックの多い地域では、無線 BH により光ファイバ敷設のコストを節約できる。ミリ波の展開シナリオでは、BH の経路を柔軟に切り替えることにより、チャンネルのフェージングまたは妨害により生じるチャンネルの問題を低減できる。

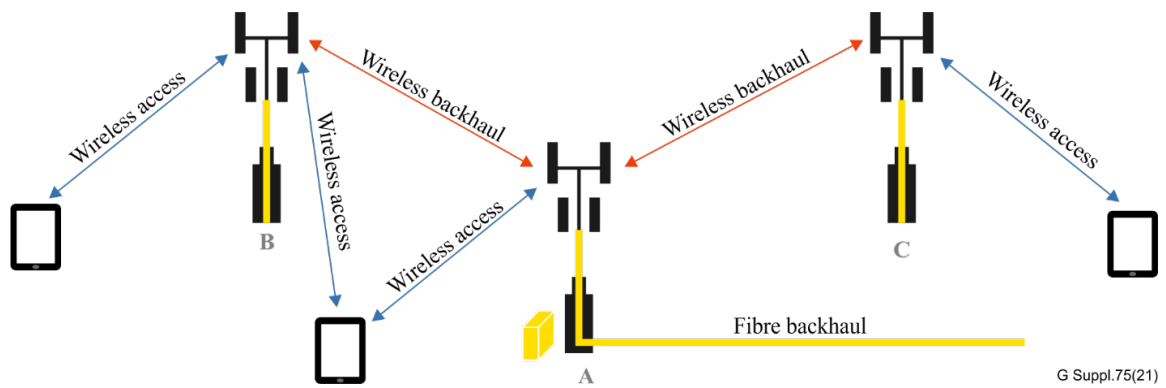


図 31- IAB の概略図

技術的なスキームは次のとおりである。

- 1) L2 アーキテクチャに基づくプロトコルスタック。元の RLC レイヤでは、主にルーティング、ベアリングのマッピング、リンク制御、フロー制御などの機能を提供するバックホール適合プロトコル (backhaul adaptation protocol: BAP) のアダプタサブレイヤが定義されている。
- 2) IAB ノードは、下位 UE へのアクセスサービスと、その子 IAB ノードである BS への BH サービスを提供する。IAB ノードは、「NR Uu リンク」と「MH F1 リンク」を介して親 IAB ノードに接続される。この「NR Uu リンク」は、RAN と 5GC の間の「BH NG インタフェースリンク」とは異なる。

R16 の IAB に対する 3GPP の F1 の定義は、R15 と同じである。上記では、F1 インタフェースのトランスポートは「MH F1 リンク」として定義できる。

F1 は論理インタフェースであることに注意すべきである。2つのノード間の P2P トポロジを持つ論理インタフェースは、複数の中間物理ノードを通過することができる。IAB ノードの F1 インタフェースと IAB ノードの NR Uu インタフェースの両方が、エアーチャネルを介した無線インタフェースである。これは、5G マクロセルの CU と DU 間の通常のケーブル接続とは異なる。通常、5G マクロセルの FH/MH/BH セグメント間の物理ベアラチャネルは分離される。

- 3) 限られたホップ数と限られたモビリティに対応する。簡素化された無線リンク管理と制限されたスイッチングシナリオを考慮できる。

IAB では、通常、マクロ細胞が IAB ドナーとして機能し、1 つ以上の SC (IAB ノードと命名) が IAB ドナーに無線で接続される。IAB ノードは、ドナーに無線で接続された中継セルと考えることができる。UE が IAB ノードに接続されている場合、通信は無線 IAB BH を介してマクロセルに中継され、マクロセルに接続された光ファイバを介して CN に到達する。

IAB の全体的なアーキテクチャを図 32 に示す。

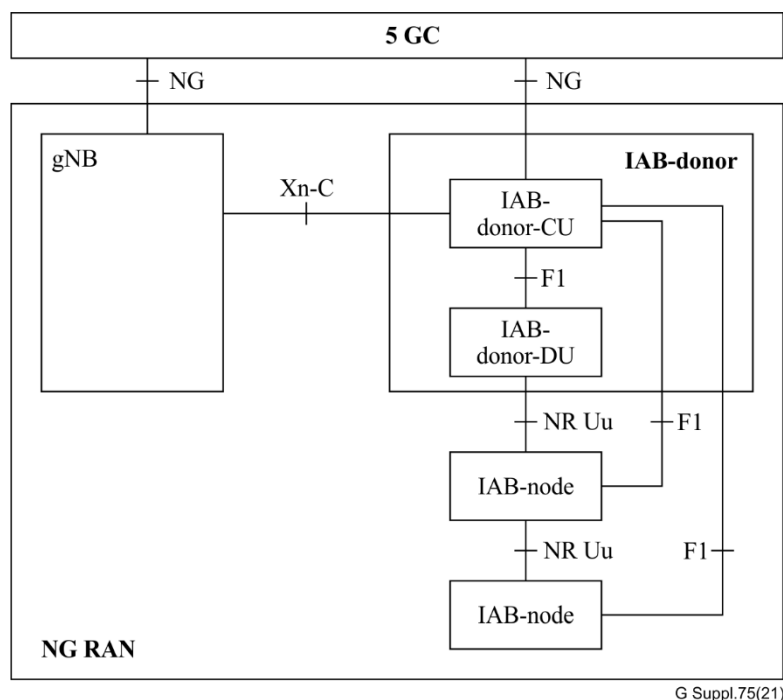


図 32- IAB の全体的なアーキテクチャ [b-3GPP TS 38.401]

NG-RAN は、IAB ノードにサービスを提供できる gNB に、無線で接続する IAB ノードによって IAB をサポートする。これは IAB ドナーと呼ばれる。IAB ドナーは、IAB ドナー-CU と 1 つ以上の IAB ドナー-DU から構成される。gNB-CU-CP と gNB-CU-UP の分離の場合、IAB ドナーは 1 つの IAB-ドナー-CU-CP、複数の IAB-ドナー-CU-UP、及び複数の IAB-ドナー-DU から構成される。IAB ノードは、NR Uu インタフェースの UE 機能の一部 (IAB ノードの IAB-MT 機能と呼ぶ) を経由して、アップストリームの IAB ノード、または IAB ドナー-DU に接続する。IAB ノードは、NR Uu インタフェースのネットワーク機能 (IAB ノードの IAB-DU 機能と呼ぶ) を経由して、ダウンストリームの IAB ノード及び UE に無線バックホールを提供する。

IAB ノードと IAB ドナー-CU 間の F1-C トラフィックは、IAB ドナー-DU とオプションの中間ホップ IAB ノードを介してバックホールされる。IAB ノードと IAB ドナー-CU 間の F1-U トラフィックは、IAB ドナー-DU とオプションの中間ホップ IAB ノードを介してバックホールされる。

前述したように、R16 での IAB に対する 3GPP の F1 の定義は、R15 と同じである。上記の段落では、F1 インタフェースの伝送は「FH F1 リンク」として定義できる。

gNB-DU のために仕様が定義されたすべての機能は、特に明記されない限り、IAB-DU 及び IAB ドナー-DU に等しく適用される。gNB-CU のために仕様が定義されたすべての関数は、特に指定がない限り、IAB ドナー-CU にも同様に適用される。UE コンテキストに対して仕様が定義された全ての機能は、特に明記されない限り、IAB-MT のコンテキストを管理するために等しく適用される。

ただし、PON のバックホールの定義とは異なり、IAB の「BH」は 5GRAN と 5GC 間の BH パスを指していないことに注意しなければならない。したがって、PON BH 技術の使用に矛盾はない。TDM-PON の最良の応用シナリオを決定し、PON ネットワークの資源と能力を完全に利用するために、各種の BH 技術間の比較を行うことが喫緊の研究課題となっている。

IAB ノードの BH は、RAN と 5GC 間の NG インタフェースを参照するのではなく、「MH」(すなわち、MH F1 リンク) と名付けられた F1 トランスポートを参照している。したがって、TDM-PON 上の MH のシナリオは、IAB のコンテキストで「TDM-PON の最適なアプリケーションシナリオを決定する」ためにも使うことができる。逆に、IAB ネットワークの RAN 機能は、TDM-PON ベースの MH ネットワークとほぼ同じである必要がある。

IABはまだSC製品には実装されていないため、技術や製品の開発をしばらく観察し研究する必要がある。  
IABの能力に関するさらなる研究とTDM-PONとの比較が必要である。

IABのSIステージでは、次の3つのIABネットワーク接続トポロジについて議論された。

- スパニングツリーでの接続。各IABノードからIABドナーへの無線中継BHパスは1つだけになる。
- 有向非巡回グラフでの接続。スパニングツリーに基づいて、ノード間の制限された冗長接続が追加され、これにより単一点のリンク障害により生じる全体のデータ伝送遅延を回避できる。
- メッシュネットワークでの接続。ネットワーク接続は、任意の2つの隣接ノード間で確立できる。この方法は最も柔軟だが、ネットワークトポロジ管理が複雑になる。

最終の規格 [b-3GPP TR 38.874] では、スパニングツリーと有向非巡回グラフを採用している。

## 10.4 4G+5G デュアルモードのsmallセル

### 10.4.1 3GPPからのアーキテクチャ

[b-3GPP TR 38.801](5.3節) に示されているように、このシナリオでは、NR機能は、同じBSの一部として、または同じサイトの複数のBSとしてE-UTRA機能と共存する。都市部のマクロなど、すべてのNRの展開シナリオに共存展開を適用できる。このシナリオでは、負荷分散または複数のRAT(例えば、より低い周波数をセルエッジ上のユーザのためのカバレッジレイヤとして利用すること)を介した接続によって、両方のRATに割り当てられたすべてのスペクトルリソースを完全に利用することが望ましい。図33も参照すること。

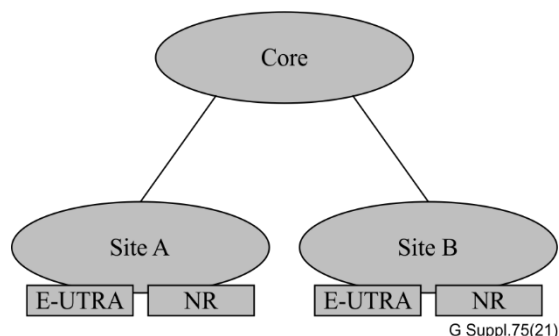


図 33- E-UTRA との共存配置 ([b-3GPP TR 38.801]の図 5.3-1)

[b-3GPP TR 38.801](10.1節) に示されているように、展開シナリオのオプション 3/3a/3x、4/4a、及び 7/7a/7x は、NRとE-UTRAの間の緊密なインターワーキングと見なすことができる。

SCG分割ベアラをサポートするには、別の展開オプションをサポートする必要がある。図34([b-3GPP TR 38.801]の図10.1.2.4.1-1)に示すオプション3xでは、gNBで終端するUプレーンのデータ伝送のために、LTE eNBとgNBの間で実線が用いられている。つまり、EPCからのS1-UデータはgNBで分割される。

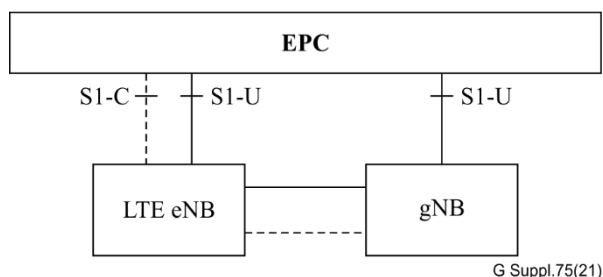


図 34- オプション 3x ([b-3GPP TR 38.801]の図 10.1.2.4.1-1)

SCG 分割ベアラをサポートするには、別の展開オプションをサポートする必要がある。図 35 ([b-3GPP TR 38.801] の図 10.1.4.3-1) に示すオプション 7x では、gNB で終端する U プレーンのデータ伝送のために、eLTE の eNB と gNB の間で実線が用いられている。つまり、NGC からの NG-U データは gNB で分割される。

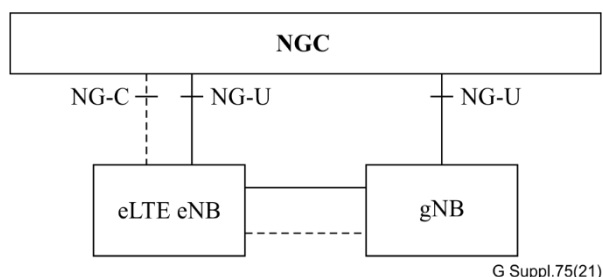


図 35- オプション 7x ([b-3GPP TR 38.801] 図 10.1.4.3-1)

#### 10.4.2 BH 搬送の要件

4G + 5G のデュアルモードの SC をどのように搬送するかは、UE と 5GC による能力と、展開の種類にも関係する。

- 1) UE は、4G のみと、4G+5G のデュアルモードをサポートする 2 つのモードに分けることができる。5G 信号の強度が弱い場合、5G UE は 4G ネットワークにフォールバックする可能性があることに注意しなければならない。
- 2) 4G+5G デュアルモードの SC は、4G UE をサポートしていながら、5G RAN を展開する必要があるシナリオで使用される。BS の 4G 及び 5G BH トラフィックは直接的に追加されることになる。
- 3) CN:
  - バックホールではすでに IP テクノロジに対応しているため、CN の展開モードが 5G NSA であろうと 5G SA であろうと、IP アドレスで到達できる。
  - 複数のオペレータが共同構築し共有化している場合は、TCP/IP をサポートするネットワークを介して、IP アドレスに基づいて各 CN 機器に BH 信号を送信できる。
  - CN 機器の処理能力が限られているため、DU は BH 搬送ネットワークを介して IP アドレスで CN と接続できるが、異なる地域で展開する必要がある。
  - CN の処理能力と何個の BS を接続できるかを、継続的に検討する必要がある。

#### 10.5 5G ミリ波の開発と分析

5G は、高速で低遅延のシナリオの要件を満たし、さまざまな新しいアプリケーションをサポートする必要がある。4G と比較して 5G は、高帯域幅と低遅延を達成するためのミリ波の周波数リソースの使用を含め、異なるタイプのサービスのためにより多くのスペクトルのリソースを使用することができる。5G のミリ波の周波数帯とサブ 6GHz 帯は、5G の基準と最適な QoE を達成するためのキーポイントであり、互いに協力し、補完し合っている。

高度なアンテナ設計と RF 処理技術を組み合わせたキャリアアグリゲーション技術を使用すると、5G のミリ波のネットワークは Gbit/s のピークスループットを容易に達成することができる。さらに、ミリ波の高周波帯域と短波長の特性は、設計と展開において空間的な利点を生み出す。性能を強化し、干渉を低減するためのビームフォーミング技術と組み合わせるのに、これらはより適していると言える。波長が短いため、5G のミリ波の装置のアンテナアレイは、限られたサイズの空間の中で、より多くのアンテナアレイを配置することができ、特に、5G のミリ波の BS のアンテナアレイの数が、256、512、またはそれ以上に達することができるので、より多くのビームフォーミングの利得を、UL と DL の両方で得ることができる [b-GSMA mmW

WP]。

5G ネットワークは、データをスケジュールするためにタイムスロットを使う。タイムスロットの長さが短いと、物理層の遅延はより小さくなる。表 19 に示すように、5G のミリ波のシステムの NR のタイムスロットの最小の長さは 0.125ms であり、これは中・低周波システムの 1/4 である。小さなスロットのケジューリングを適応すると、スロット遅延はさらに小さくなる。したがって 5G のミリ波のシステムは、5G の中周波数及び低周波数のシステムと比較して NR の遅延を低減し、5G の NR の遅延を、可能性としては 1ms 未満にすることができる。これによって産業用インターネット、AR/VR、クラウドゲーム及びリアルタイムクラウドコンピューティングなどの URLLC サービスに対する、5G ネットワークの品質保証を実現できる。AR/VR サービスでは、複数の感覚を協調させた体験と相互作用を実現するために、ミリ秒レベルの遅延が必要になる。産業用インターネットの低遅延に対する要求は非常に明確であり、例えば、典型的な産業用ロボットネットワークの遅延要求はミリ秒レベルで、製品ラインの遠隔リアルタイム制御もミリ秒レベルの遅延保証を必要とする。人工知能(AI) を導入している産業用視覚化の領域では、ときどき大規模な計算をいくらか距離がある場所で行う必要があるため、NR の時間遅延に対する要求も高くなる [b-GSMA mmW WP]。

表 19- 異なる周波数帯に対応する 5G ネットワークのタイムスロット間隔 [b-GSMA mmW WP]

周波数帯域	SCS	タイムスロット間隔
1 GHz	15/30 kHz	1/0.5 ms
1~6 GHz	15/30/60 kHz	1/0.5/0.25 ms
24.25-52.6 GHz	60/120 kHz	0.25/0.125 ms

低域・中域システムと比較して、5G のミリ波システムはビームフォーミング技術により対象物の信号利得を向上させるだけでなく、ビーム指向特性を利用して信号エネルギーを特定の方向に集中させることができるため、他の非対象物への干渉を低減し、隣接リンクや隣接セルの通信品質を確保することができる。従って、5G のミリ波システムは高密度セル展開をより容易に達成できる。このため、5G のミリ波システムは、会議室、コンサート会場、スタジアム、地下鉄駅、その他の人口密度の高いエリアなどの大規模な会場への導入に最適である。

サブ 6GHz と比較して、5G のミリ波コンポーネントのサイズははるかに小さく、5G のミリ波のデバイスはより簡単に小型化できる。5G のミリ波が大規模に実用化されれば、関連部品のコストが削減され、業務用機器、ウェアラブル機器、インテリジェント部品などの分野での応用が期待される。加えて、5G のミリ波の BS は、サイズが小型、かつ軽量で、設置が容易という利点があり、環境に優しく、効率的で、導入に便利な 5G のミリ波のネットワークの構築に寄与できる。

5G のミリ波はまた、以下の課題にも直面している。5G のミリ波は、より高い周波数帯域、高い伝搬損失、弱い回折能力、そして相対的に限定されたカバレッジという特性があり、これは直面している最大の課題でもある。高周波通信の伝送プロセスの中では、経路損失が大きく、屋外から屋内への貫通損失も大きい。また、建物や木の葉、雨水の影響も大きい。[b-CU mmW WP] によれば、5G のミリ波の伝送損失はサブ 6GHz の伝送損失よりもはるかに大きい (表 20 に示されている)。一方、雨、雪、霧などの悪天候もミリ波の伝搬に悪影響を及ぼす。そのため、通常、ミリ波のセルのカバレッジ半径は小さく、移動 UE に対するデータ送信では頻繁なセル切替が発生するため、伝送中断が起こりやすい [b-CU mmW WP] [b-FuTURE mmW WP]。

表 20- 5G のミリ波の浸透損失 [b-CU mmW WP]

樹冠部 (d=4 m)	人体	耐荷重コンクリートの壁	木製の扉 (5 cm)	普通のガラスの扉	レクリエーションルビークルのボディパネル
20 dB	11-28 dB	貫通できない	6 dB	5 dB	17-23 dB

[b-3GPP TR 38.901] に記載されている、都市部における 0-100GHz 帯の直接波の損失モデルによれば、自由空間における損失はキャリア周波数と正の相関があることが分かる。現在、ミリ波帯 (すなわち、24.52GHz



から 52.6GHz の範囲の FR2 の帯域) では、サブ 6G 帯に比べて伝送損失が 10dB 以上となっている。同じ送信電力では、ミリ波の理論的な通信カバレッジも 5G の低周波デバイスの値よりはるかに小さい。26GHz 帯と 3.5GHz 帯を例に、ミリ波帯とサブ 6G 帯の伝送損失の違いを評価した結果を図 36 に示す。ミリ波の伝送損失は 17.42dB であり、理論的な伝搬距離も大幅に減少することが分かる。

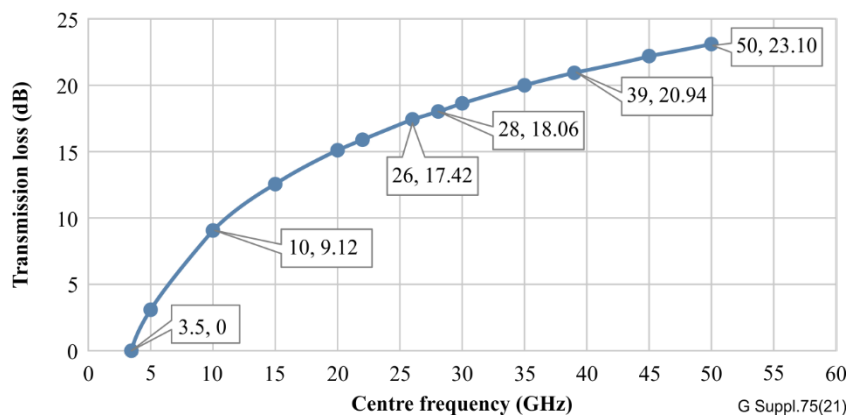


図 36- 異なる中心周波数の伝送損失(3.5GHz との比較) [b-CU mmW WP]

5G のミリ波の展開では、短期間で継続的かつシームレスなカバレッジを実現することは困難であるため、サブ 6GHz と共存する問題、特に協調ネットワークの計画、柔軟なサービス負荷分散、高周波及び低周波の切換え、及び相互運用性の経験が非常に重要である。現在、主流の技術の方向性は、二重接続とキャリアアグリゲーション (CA) である。しかし、通信装置のハードウェアの違いにより、ミリ波とサブ 6GHz キャリアの間ではタイミングは誤りを生じやすく、CA システムの同期に問題を引き起こす。したがって、非同期 CA システムの最適化も必要である。さらに、空間の制限や放熱のような異なるシステムの共存の物理的限界も、ミリ波とサブ 6GHz システムの共存のための技術的な挑戦の一つである。

5G のミリ波は、モビリティ管理の課題にも直面している。高周波信号伝搬の特性により、5G のミリ波のセルのカバレッジ半径は通常小さく、移動状態での頻繁なセルハンドオーバーにより、端末はデータ伝送の中断を受けやすい。この点に関して、3GPP 標準は、シームレスな QoE を確保するために、この課題に対する 2 つの主要なソリューションを提供している。1 つ目は、柔軟で高速なセルハンドオーバーの様々なソリューションである。2 つ目は高速ビーム回復メカニズムである。

将来的にはサービス要件の側面から、新興の業界のアプリケーションは、例えば 4K/8K と AR/VR の映像が保証された高い DL レートを必要とすると同時に、ビデオ監視や遠隔手術が保証された高い UL レートを必要とするなど、サービス要件の大きな違いを持つことになる。5G のミリ波の技術の NR での UL/DL の容量がアンバランスであると、柔軟な展開の要求を完全に満たすことができない。

柔軟なフレーム構造の適応調整の方式は 3 つの利点をもたらす。まず、対象地域の長期的なサービス状況に応じて予測・調整が可能である。2 つ目は、5G の産業利用での緊急状況に応じて、UL と DL フレーム構造を迅速に調整できることである。3 つ目は、5G の産業利用のニーズを満たすことができ、UL 帯域幅に対して明らかに新たな需要があるコンサートやスタジアムなどのパブリックネットワークのシナリオにも効果的に対応できる。したがって、5G のミリ波の柔軟なフレーム構造方式は、様々なシナリオと様々なサービスの変化をカバーすることができる [b-GSMA mmW WP]。

現在、5G のミリ波の開発には機会と課題の両方がある。5G のミリ波の産業は、一部の国ではインフラ建設とともに発展する。またその産業は、ミリ波の技術と製品の進化を推進するために、高周波デバイスの商品化、ミリ波の試験方式の改善、さらなる高周波帯への対応などに取り組んでいる。

## 参考文献

- [b-ITU-T G.813] Recommendation ITU-T G.813 (2003), Timing characteristics of SDH equipment slave clocks (SEC).
- [b-ITU-T G.984.1] Recommendation ITU-T G.984.1 (2008), Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics.
- [b-ITU-T G.984.3] Recommendation ITU-T G.984.3 (2014), Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Transmission convergence layer specification.
- [b-ITU-T G.984.3 Amd2] Recommendation ITU-T G.984.3Amendment 2 (2009), Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Transmission convergence layer specification Amendment 2: Time-of-day distribution and maintenance updates and clarifications.
- [b-ITU-T G.987.3] Recommendation ITU-T G.987.3 (2014), 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence (TC) layer specification.
- [b-ITU-T G.987.x] Recommendation ITU-T G.987.x-series (2012), 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON).
- [b-ITU-T G.988] Recommendation ITU-T G.988 (2017), ONU management and control interface (OMCI) specification.
- [b-ITU-T G.989.3] Recommendation ITU-T G.989.3 (2021), 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Transmission convergence layer specification.
- [b-ITU-T G.989.x] Recommendation ITU-T G.989.x-series (2015), 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2).
- [b-ITU-T G.8262] Recommendation ITU-T G.8262/Y.1362 (2018), Timing characteristics of synchronous equipment slave clock.
- [b-ITU-T G.8262.1] Recommendation ITU-T G.8262.1/Y.1362.1 (2019), Timing characteristics of an enhanced synchronous equipment slave clock.
- [b-ITU-T G.8271] Recommendation ITU-T G.8271/Y.1366 (2020), Time and phase synchronization aspects of telecommunication networks.
- [b-ITU-T G.8271.1] Recommendation ITU-T G.8271.1/Y.1366.1 (2020), Network limits for time synchronization in packet networks with full timing support from the network.
- [b-ITU-T G.8273] Recommendation ITU-T G.8273/Y.1368 (2018), Framework of phase and time clocks.
- [b-ITU-T G.8273.2] Recommendation ITU-T G.8273.2/ Y.1368.2 (2020), Timing characteristics of telecom boundary clocks and telecom time slave clocks for use with full timing support from the network.
- [b-ITU-T G.8273.3] Recommendation ITU-T G.8273.3/Y.1368.3 (2020), Timing characteristics of telecom transparent clocks for use with full timing support from the network.
- [b-ITU-T G.8275.1] Recommendation ITU-T G.8275.1/Y.1369.1 (2020), Precision time protocol telecom profile for phase/time synchronization with full timing support from the network.
- [b-ITU-T G.8275.2] Recommendation ITU-T G.8275.2/Y.1369.2 (2020), Precision time protocol telecom profile for time/phase synchronization with partial timing support from the network.
- [b-ITU-T G.9804.2] Recommendation ITU-T G.9804.2 (2021), Higher speed passive optical networks: Common transmission convergence layer specification.
- [b-ITU-T G.9804.x] Recommendation ITU-T G.9804.x-series (2019), Higher speed passive optical networks.
- [b-ITU-T G.9807.1] Recommendation ITU-T G.9807.1 (2020), 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON).
- [b-ITU-T G.Suppl.51] Recommendation ITU-T G-series Supplement 51 (2017), Passive optical network protection considerations.
- [b-ITU-T G.Suppl.66] Recommendation ITU-T G-series Supplement 66 (2018), 5G wireless fronthaul requirements in a passive optical network context.
- [b-ITU-T G.Suppl.68] Recommendation ITU-T G-series Supplement 68 (2020), Synchronization OAM requirements.
- [b-ITU-T GSTP-TN5G] Technical Report ITU-T GSTP-TN5G (2018), Transport network support of IMT-2020/5G. <https://www.itu.int/pub/T-TUT-HOME-2018-2>
- [b-ITU-T D071] Contribution ITU-T Q2/SG15 Dusseldorf interim meeting D071 (2019), Transport dimensioning for the F1 interface (aka midhaul).
- [b-ITU-T SG15-C-1096] Contribution ITU-T SG15-C-1096 (2018), Accuracy of ToD distribution in NG-PON2. <https://www.itu.int/md/T17-SG15-C-1096/en>
- [b-ITU-R M.1035] Recommendation ITU-R M.1035 (1994), Framework for the radio interface(s) and radio sub-system functionality for International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000).
- [b-ITU-R M.2410-0] Recommendation ITU-R M.2410-0 (2017), Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s).
- [b-ITU-R SM.1046-3] Recommendation ITU-R SM.1046-3 (2017), Definition of spectrum use and efficiency of a radio system.
- [b-ITU-T SG15-C-2862] Contribution ITU-T SG15-C-2862 (2021), General text on end-to-end network slicing. <https://www.itu.int/md/T17-SG15-C-2862/en>
- [b-ISO/IEC 18033-3] ISO/IEC 18033-3:2010 Information technology – Security techniques – Encryption algorithms – Part 3: Block ciphers.
- [b-IEEE 802.1CM] IEEE Std 802.1CM (2018), IEEE Standard for local and metropolitan area networks – Time-sensitive networking for fronthaul.
- [b-IEEE 1588v2] IEEE Std. 1588 (2008), IEEE Standard for a precision clock synchronization protocol for

networked measurement and control systems.

[b-ETSI NFV-INF] Group specification ETSI GS NFV-INF 001 V1.1.1 (2015), Network functions virtualization (NFV); Infrastructure overview.

[b-IETF RFC 791] IETF RFC 791 (1981), Internet protocol.

[b-IETF RFC 2474] IETF RFC 2474 (1998), Definition of the differentiated services field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 headers.

[b-IETF RFC 4301] IETF RFC 4301 (2005), Security architecture for the internet protocol.

[b-IETF RFC 8200] IETF RFC 8200 (2017), Internet protocol, version 6 (IPv6) specification.

[b-IETF TS AR&VR] IETF Internet-Draft (2017), Problem statement: Transport support for augmented and virtual reality applications.

[b-3GPP TR 21.905] 3GPP TR 21.905 V15.1.0 (2018), Vocabulary for 3GPP specifications.

[b-3GPP TR 23.799] 3GPP TR 23.799 V14.0.0 (2016), Study on architecture for next generation system.

[b-3GPP TR 25.912] 3GPP TR 25.912 V15.0.0 (2018), X2 Radio interface protocol architecture for evolved UTRA.

[b-3GPP TR 36.814] 3GPP TR 36.814 V9.2.0 (2017), Further advancements for E-UTRA physical layer aspects.

[b-3GPP TR 37.876] 3GPP TR 37.876 V15.0.0 (2018), Study on eNB(s) Architecture Evolution for E-UTRAN and NG-RAN.

[b-3GPP TR 38.801] 3GPP TR 38.801 V14.0.0 (2017), Radio access architecture and interfaces.

[b-3GPP TR 38.874] 3GPP TR 38.874 V16.0.0 (2018), NR; Study on integrated access and backhaul.

[b-3GPP TR 38.901] 3GPP TR 38.901 V16.1.0 (2019), Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz.

[b-3GPP TS 22.104] 3GPP TS 22.104 V18.1.0 (2021), Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains.

[b-3GPP TS 22.261] 3GPP TS 22.261 V18.3.0 (2021), Service requirements for the 5G system.

[b-3GPP TS 28.530] 3GPP TS 28.530 V16.2.0 (2020), 5G; Management and orchestration; Concepts, use cases and requirements.

[b-3GPP TS 29.281] 3GPP TS 29.281 V15.5.0 (2018), General packet radio system (GPRS) tunnelling protocol user plane (GTPv1-U).

[b-3GPP TS 36.104] 3GPP TS 36.104 V16.7.0 (2020), Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Base station (BS) radio transmission and reception.

[b-3GPP TS 38.104] 3GPP TS 38.104 V15.8.0 (2019), Base station (BS) radio transmission and reception.

[b-3GPP TS 38.214] 3GPP TS 38.214 V15.9.0 (2020), NR; Physical layer procedures for data.

[b-3GPP TS 38.300] 3GPP TS 38.300 V15.6.0 (2019), NR; NR and NG-RAN overall description; Stage 2.

[b-3GPP TS 38.331] 3GPP TS 38.331 V15.6.0 (2019), NR; Radio resource control (RRC) protocol specification.

[b-3GPP TS 38.401] 3GPP TS 38.401 V16.7.0 (2021), NG-RAN; Architecture description.

[b-3GPP TS 38.470] 3GPP TS 38.470 V16.2.0 (2020), NG-RAN; F1 general aspects and principles.

[b-3GPP TS 38.472] 3GPP TS 38.472 V15.4.0 (2019), NG-RAN; F1 signalling transport.

[b-3GPP TS 38.474] 3GPP TS 38.474 V15.2.0 (2018), NG-RAN; F1 data transport.

[b-3GPP TS 38.47x] 3GPP TS 38.47x-series V15.x.0 (2017), NG-RAN; F1 interface.

[b-Artuso] Artuso M. and Christiansen H. (2014), Discrete-event simulation of coordinated multipoint joint transmission in LTE-advanced with constrained backhaul, Proceedings of IEEE eleventh international symposium on wireless communication systems 2014.

[b-BBF OB-BAA] The project of ONAP with Broadband Forum, Open Broadband: Broadband Access Abstraction (OB-BAA) July 2021.  
<https://obbaa.broadband-forum.org/>

[b-BBF TR-370] BBF TR-370 issue-2, Fixed access network sharing – Architecture and nodal requirements.

[b-Bidkar] S. Bidkar, et al. (2020), Mobile Xhaul traffic modelling for high-speed TDM-PON. In: Proceedings of ECOC2020.

[b-CCSA SR208] CCSA SR 208-2017 (2017), Study on PON supporting small cell backhaul.

[b-CCSA 2014B3] CCSA 2014B3 (2014), Study on technical specification for LTE FDD small cell.

[b-CCSA DIS] CCSA 2019-1031T-YD, Technical requirements of 5G digital indoor distribution system.

[b-CU mmW WP] China Unicom (2019), China Unicom 5G millimeter wave technology white paper.

[b-FuTURE mmW WP] Future Mobile Communications Forum (FuTURE) 5G microwave and millimeter wave special working group (2020), 5G millimeter wave technology white paper.

[b-GSMA NS] GSMA (2017), An introduction to network slicing.

[b-GSMA mmW WP] GSMA (2020), 5G millimeter wave technology white paper.

[b-IMT-2020 B REQ] IMT-2020 (5G) Promotion Group (2018), 5G bearing requirements white paper.

[b-Liu-1] Liu Y.B., Liu M.S., and Mei L. (2017), Initial analysis of PON network carrying mobile backhaul business case in Z city. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, Vol. 1, pp. 80–84.

[b-Liu-2] Liu X.F., Shen Z.K., Wang X.H., et al. (2020), 5G wireless enhanced design and international standard, Posts & Telecom Press.

[b-Lin] Lin Y., Hou X., Du Q.J., Wang J.M., and Wen X.G. (2015), Discussion on small cell's backhaul solution and their application scenarios. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, Vol. 10, pp. 72–76.

[b-Lv] Lv Z.C., Bi M., Chen X.K., and Hou Y.Z. (2021), The penetration loss test and analysis of several common objects in the 5G frequency band, Electronic Engineering & Product World, Vol. 4, pp. 76, 77, 84.

[b-MEF 22.3] MEF implementation agreement 22.3 (2018), Transport services for mobile networks.

[b-NGMN BH REQ] NGMN Alliance (2012), Small cell backhaul requirements.

[b-NGMN E2E ARC] NGMN Alliance (2017), 5G end-to-end architecture framework v0.6.5.

[b-NGMN LTE BH] NGMN Alliance (2011), Guidelines for LTE backhaul traffic estimation.

[b-NGMN NET CUS] NGMN Alliance (2021), 5G network customisation based on service based architecture v2.2.

[b-NGMN OBH REQ] NGMN Alliance (2008), NGMN optimized backhaul requirements.

[b-NGMN Verticals] NGMN Alliance (2020), Verticals URLLC use cases and requirements v2.5.4.

[b-O-RAN CUS] O-RAN Alliance technical specification (2020) WG4.CUS.0-v04.00, Control, user and synchronization plane specification.

[b-Pfeiffer] Pfeiffer T. (2019), Considerations on transport latency in passive optical networks, Proceedings of ECOC 2019.

[b-Ruffini] Ruffini S., Johansson M., Pohlman B., and Sandgren M. (2021), 5G synchronization requirements and solutions, Ericsson Technology Review, Vol. 1.

[b-SCF079] Small Cell Forum document SCF079.10.02 (2017), Deployment issues for enterprise small cells.

[b-SCF192] Small Cell Forum document SCF192.09.01 (2017), Small cell siting challenges

[b-SCF195] Small Cell Forum document SCF195.10.01 (2018), Small cell siting challenges and recommendations.

[b-SCF199] Small Cell Forum document SCF199.10.01 (2018), URLLC and network slicing in 5G enterprise small cell networks.

[b-SCF222] Small Cell Forum document SCF222.10.01 (2019), 5G FAPI: PHY API specification.

[b-SCF234] Small Cell Forum document SCF234.10.01 (2020), Edge computing and small cell networks.

[b-SCF235] Small Cell Forum document SCF235.10.01 (2020), Private cellular networks with small cells.

[b-SCF238] Small Cell Forum document SCF238.10.01 (2020), 5G small cell architecture and product definitions.

[b-SCF500] Small Cell Forum document SCF500.10.01 (2018), Study on small cells and dense cellular networks regulatory.

[b-Sutton] Sutton S., 5G Radio Access Network Architecture Evolution, Annual IET talk at 6th Annual 5G conference, February 2019.  
<https://blog.3g4g.co.uk/2019/02/prof-andy-sutton-5g-radio-access.html>.

[b-Wang-1] Wang Z., Fang D., and Mao D. (2017), Research on FTTH network carrying micro base station backhaul. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, Vol. 4, pp.73–75.

[b-Wang-2] Wang G.Q. Positioning of PON equipment in mobile backhaul network. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, Vol. 11, pp.1–3.

[b-Yang] Yang Z.D., Sun D., and Dong B. (2017), Research on new technology of mobile backhaul network with GPON. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, Vol. 5, pp.72–76.

[b-Zhang] Zhang Y.Y. (2017), Study on multiband penetration loss from outdoor to indoor, Mobile Communications, Vol. 41, No. 24, pp. 53–57.

[b-Zhou] Zhou F., Sun J., and Cheng K. (2021), Comparative measurement of radio wave penetration loss and indoor coverage analysis of 5G system bands, Mobile Communications, Vol. 45, No. 2, pp. 24–28.

[b-ZTE WP] ZTE (2020), 5G indoor coverage white paper.