

超高速サービスを経済的に提供する光アクセスネットワーク構成法に関する研究

上 田 裕 巳 東京工科大学コンピュータサイエンス学部教授

1 まえがき

現在、光アクセスネットワークの TDM-PON (Time Division Multiplexing Passive Optical Network) を用いて、経済的にブロードバンドサービスの提供が行われている[1]。しかし、更に高速のサービスを提供しようとする、TDM-PON では ONU (Optical Network Unit) の動作速度も速くなり、ONU を経済的に実現するのが難しくなる。また、現在さかんに研究開発が行われている WDM (Wavelength Division Multiplexing)-PON では、その基本構成要素の AWG (Arrayed Waveguide Grating) が高価であるため経済的な実現が厳しい。

本研究では、より高速なサービスを経済的に提供する目的で、OSDM (Orthogonal Subcarrier Division Multiplexing)-PON を提案する。更に、提案した OSDM-PON の実現性についてシミュレーションにより評価する。

2 OSDM-PON の提案

提案する OSDM-PON のイメージを図 1 に示す。OSDM-PON では、互いに直交する複数のサブキャリアを各 ONU に割り当てる。上り方向 (ONU から OLT への方向) では、ONU に割り当てられたサブキャリアでユーザデータを QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 等でデジタル変調して送信する。デジタル変調された送信信号は、光スプリッタで多重化されて OLT に届き、復調される。下り方向 (OLT から ONU への方向) では、OLT は各 ONU に割り当てられたサブキャリアでデジタル変調した信号を送信し、各 ONU は受信信号を割り当てられたサブキャリアで復調する。デジタル変復調はデジタル信号処理が適用できること、光は強度変調のみを用いることから、OSDM-PON の ONU は経済的に実現できる可能性がある。

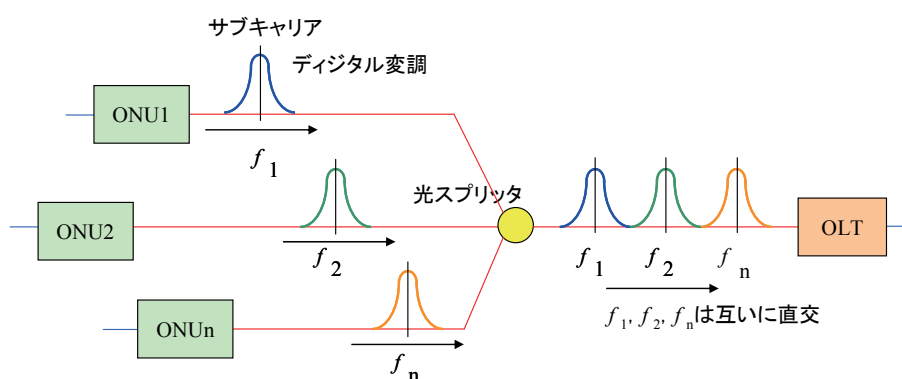


図 1 OSDM-PON の構成

3 検討手順

OSDM-PON では、ONU からの信号が光スプリッタで多重化される上り方向に課題が多くあるので、上り方向を検討する。そして、検討のし易さを考慮して、まず ONU からデジタル変調した電気信号をその

まま送信する電気 OSDM-PON (図 2 (a))から検討を始める. つづいて, 光信号を伝送する本来の光 OSDM-PON (図 2 (b))の実現性の検討を行う.

本研究では, 検討の第 1 歩として, 次の条件でシミュレーションにより検討を行う.

- (1) 各ユーザ速度を 1 Gbps とする. ユーザは常時 1 Gbps の速度を使えることが, TDM-PON と異なる.
 - (2) 各 ONU に割り当てる互いに直交するサブキャリアの数を 1 とする.
 - (3) 各 ONU に割り当てるサブキャリアのデジタル変調方式を 16-QAM とする.
 - (4) PON に収容する ONU の台数は, 現行の PON と同様に 32 を目指す. 電気 OSDM-PON では, ONU32 台を収容して検討を行う. しかし, 光 OSDM-PON では, 時間の制約上 ONU16 台に限定して検討する.
- なお, シミュレーションは OptSim[3]を用いる. ビット誤りの評価は, 送受信データを照合して行い, ここでは excel (Office 2003)を用いる. このため, 照合データは 30,000 ビット (誤り率 0.3×10^{-4} まで)となる.

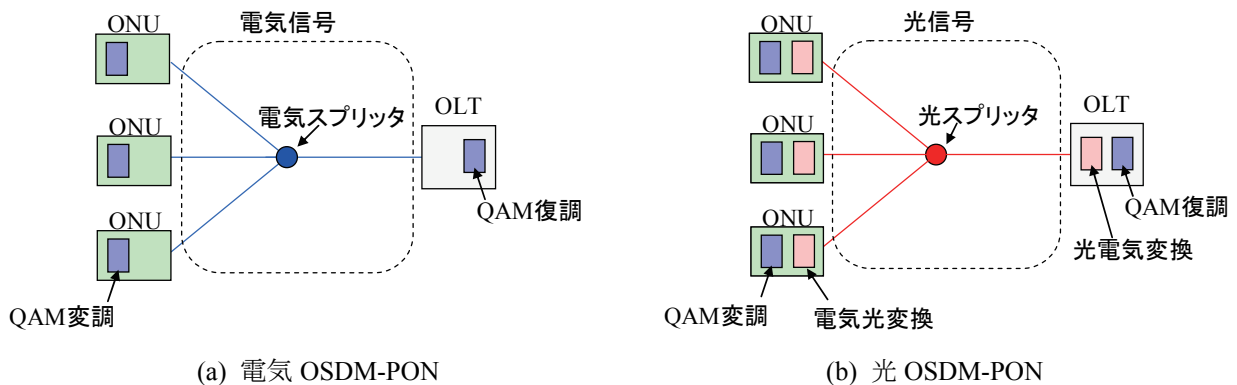


図 2 検討手順

4 電気 OSDM-PON の実現性の評価

4-1 評価条件

ONU32 台を収容する電気 OSDM-PON について, ビット誤りなしで通信できる条件を明らかにする. この中で, 最小サブキャリア周波数, ONU 間の最小サブキャリア周波数間隔を明らかにする. 更に, OLT の復調時に所望の信号のみを抽出する Bessel フィルタに基づく BPF (Band Pass Filter)の次数と通過帯域について評価する.

4-2 評価結果

ONU32 台から OLT への伝送特性を評価した. まず, スプリッタで多重化された電気信号のスペクトラムを図 3 に示す. これより, ONU32 台からの変調信号が多重されていることが分かる.

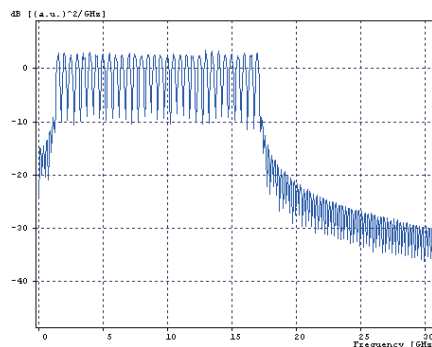


図 3 電気信号のスペクトラム

このときのサブキャリア周波数を図 4 に示す。サブキャリアの最小周波数は 1.5 GHz である。サブキャリアがこれより低い周波数であると、より高いサブキャリアで変調された信号の影響を受け、誤りなしで復調することができないことが分かった。また、サブキャリア周波数の最小間隔は 0.5 GHz である。0.5 GHz よりサブキャリア間を狭めるとビット誤りを観測した。したがって、サブキャリアの最大周波数は 17.0 GHz となる。すなわち、サブキャリア周波数は次式で与えられる。

$$f_n = (n + 2) \times 0.5 \text{ [GHz]} \quad (n=1, 2, \dots, 32) \quad (1)$$

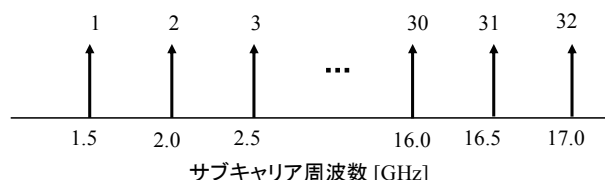
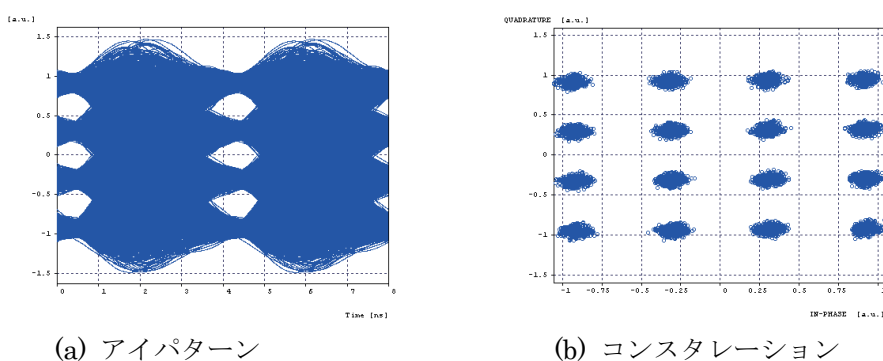


図 4 ONU32 台を収容する場合のサブキャリア周波数

一例として、サブキャリア周波数 $f_1=1.5$ GHz, $f_8=5.0$ GHz, $f_{16}=9.0$ GHz, $f_{24}=13.0$ GHz, $f_{32}=17.0$ GHz のときの OLT で復調したアイパターンとコンスタレーションを各々図 5, 図 6, 図 7, 図 8, 図 9 に示す。これらより、いずれもアイは開いており、コンスタレーションも各信号点が分離されていることが分かる。実際に送受信データを照合し、ビット誤りなしを確認した。また、図 5～図 8 まではほぼ同じ特性であり、最大サブキャリア $f_{32}=17.0$ GHz の図 9 がもっとも特性がよい。これは最大サブキャリア周波数であり、これよりも高いサブキャリア周波数で変調された信号の影響を受けないからである。

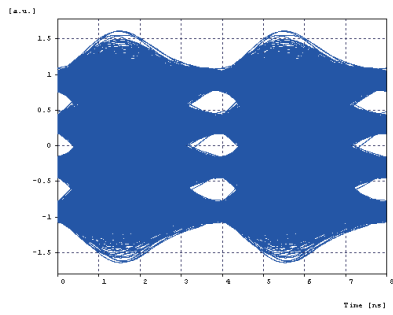
このとき、OLT の受信側で各 ONU 対応に必要な BPF は次数 5、通過帯域 0.3 GHz が、最大アイ開口という意味で最適であることが分かった。

なお、ONU が 3 台以下では、最小サブキャリア周波数は ONU が 32 台のときの 1.5 GHz よりも低くでき、1.0 GHz でもビット誤りなしで伝送できることを確認した。また、ONU が 4 台以上では、32 台のときと同様に最小サブキャリア周波数は 1.5 GHz になることを確認した。

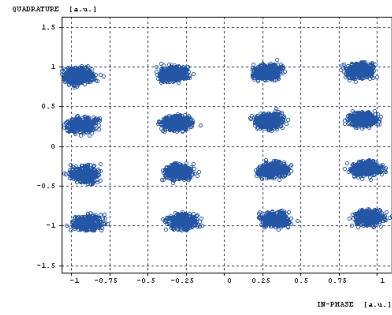


(a) アイパターン (b) コンスタレーション

図 5 サブキャリア周波数 $f_1=1.5$ GHz の伝送特性

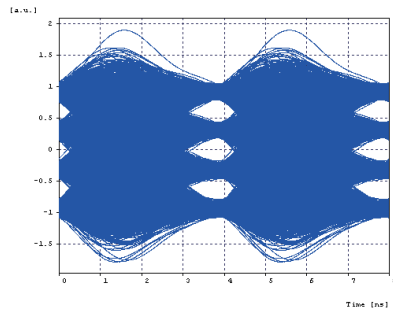


(a) アイパターン

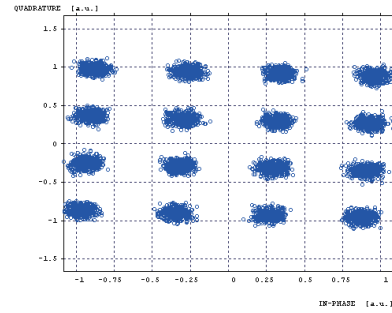


(b) コンスタレーション

図 6 サブキャリア周波数 $f_s=5.0$ GHz の伝送特性

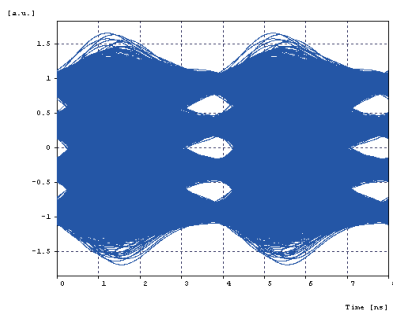


(a) アイパターン

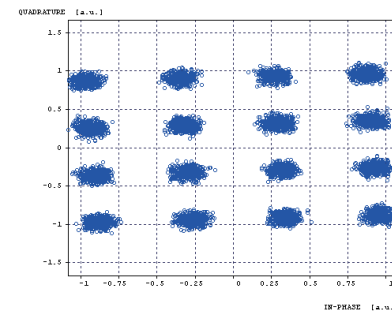


(b) コンスタレーション

図 7 サブキャリア周波数 $f_s=9.0$ GHz の伝送特性

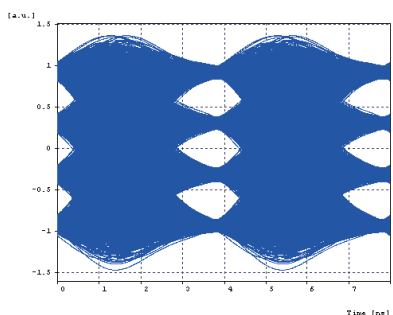


(a) アイパターン

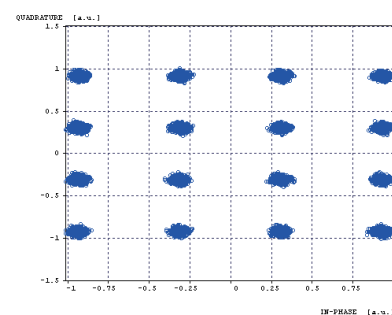


(b) コンスタレーション

図 8 サブキャリア周波数 $f_s=13.0$ GHz の伝送特性



(a) アイパターン



(b) コンスタレーション

図 9 サブキャリア周波数 $f_{s2}=17.0$ GHz の伝送特性

5 光 OSDM-PON の実現性の評価

5-1 評価条件

4.で電気 OSDM-PON の実現性が分かったので、ONU で電気光変換した後に送信する光 OSDM-PON の

検討を行う。まず、光 OSDM-PON では ONU からの光信号が光スプリッタで多重化されることから、同一の波長を使用した場合における、ビート雑音の影響を調べる。この結果、同一の波長でビット誤りなしで通信できない場合には、ONU に割り当てる波長を変えて検討を進める。複数の波長を用いる必要がある場合、波長に対するサブキャリア周波数の割り当て方法を考察する。また、電気 OSDM-PON のときと同様に、サブキャリアについて、最小周波数、最小間隔を明らかにする。更に、OLT で復調時に所望の信号のみを抽出する BPF の次数と通過帯域について評価する。

3.で述べた前提条件の他、下りの波長は現状の TDM-PON と同様に 1310 nm 帯とする。また、時間の制約上、当初から光 OSDM-PON に収容する ONU の台数を 32 とするのは厳しいので、ここでは ONU の台数を 16 として検討する。また、ONU と OLT の距離はすべて 10 km とする。

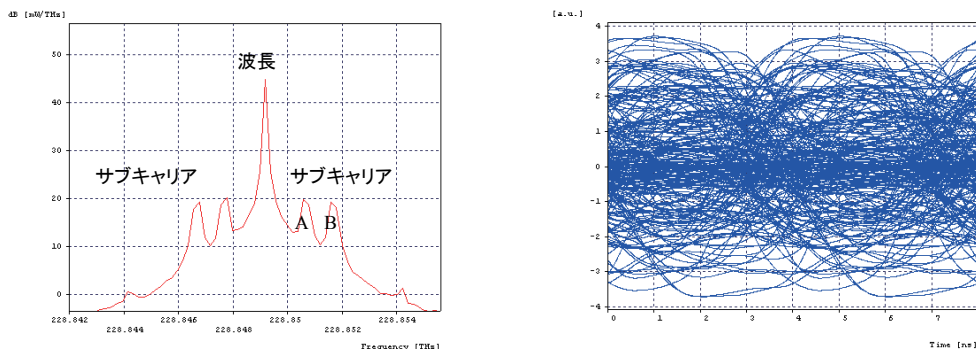
5-2 評価結果

(1) 複数の ONU が同一波長を用いる場合の伝送特性

光 OSDM-PON において、同一の波長を使用した場合、ビート雑音の影響を調べる。

波長を 1310 nm とし、2 台の ONU A, B それぞれのサブキャリア周波数を 1.0 GHz, 1.5 GHz とした場合、光スプリッタ通過後の光スペクトラムを図 10 (a)に示す。その信号を OLT で電気に戻したときのアイパターンを図 10 (b)に示す。図 10 (a)より、ONU A, B で各々サブキャリア周波数 1.0 GHz と 1.5 GHz で変調された信号が、波長 1310 nm (228.8492 THz)で強度変調され、光スプリッタで多重化されていることが分かる。図 10 (b)より、OLT で光から変換された電気信号のアイパターンがつぶれており、このままではビット誤りなしで伝送できないことが分かる。

以上より、複数の ONU に同一波長を用いると、ビート雑音の影響のためにビット誤りなく伝送できないことが分かった。ONU ごとに波長を変える必要があるため、これらの波長にサブキャリアを割り当てる方法について検討を進める。



(a) ONU2 台からの光多重信号のスペクトラム

(b) サブキャリア 1.0 GHz の信号のアイパターン

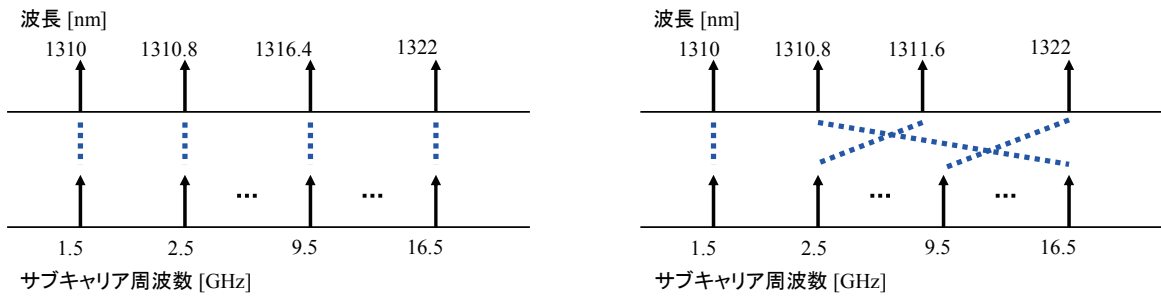
図 10 同一の波長 1310 nm を使用したときの伝送特性

(2) 波長に対するサブキャリアの割り当て方法

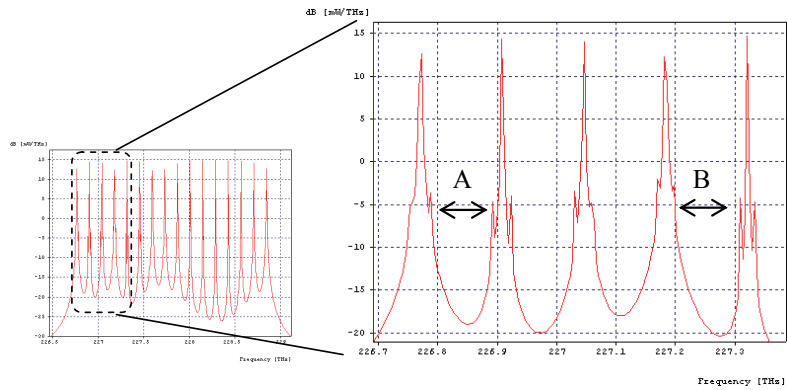
複数の波長を用いる場合、波長間隔を狭め過ぎるとサブキャリアで変調した信号間の干渉で伝送できない恐れがある。また、波長間隔を広くし過ぎると現状の有効な波長帯域に入らない可能性がある。ここでは、検討の第 1 歩として DWDM で適用されている波長間隔でもある 0.8 nm (周波数間隔で 100 GHz)として検討を進める。

複数のある波長に各サブキャリア周波数を割り当てる方法として、波長に対して周波数を昇順で割り当てる方法 (図 11 (a)) が一般的に考えられる。ここでは、周波数の低いものと高いものを交互に割り当てる方法 (図 11 (b)) を提案する。

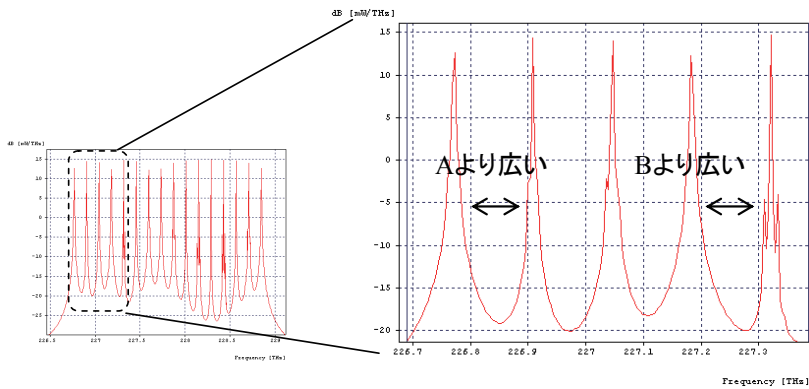
提案方法のねらいを、図 12 に示す。提案方法では、昇順に割り当てる方法に比し、隣どうしの波長に対してサブキャリア間をより広くとれ、隣からの信号の影響を少なくすることができる。



(a) 周波数を昇順で割り当てる方法 (b) 周波数を交互に割り当てる方法
 図 11 複数波長に各サブキャリアの割り当て方法



(a) 周波数を昇順で割り当てる方法



(b) 周波数を交互に割り当てる方法

図 12 複数波長のサブキャリア周波数の割り当て方による隣接サブキャリア間の様相

実際に提案方法と昇順で割り当てる方法と比較評価した。提案した交互に割り当てる方法は、0.8 nm (100 GHz)の波長間隔でビット誤りなしで伝送できることを確認した。昇順に割り当てる方法では、波長間隔 0.8 nm では、ビット誤りが生じ、波長間隔をより大きくする必要があることが分かった。

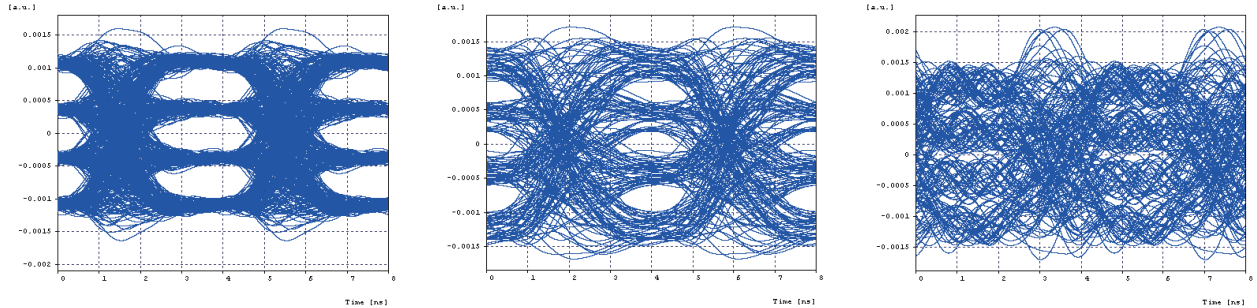
(3) サブキャリア周波数の評価結果

波長にサブキャリアを割り当てる方法として(2)で提案した方法を適用し、ONU16 台に対して波長帯 1310 nm、波長間隔 0.8 nm の場合に、各波長に割り当てるサブキャリア周波数について評価した。

まず、最小サブキャリアとサブキャリア周波数間隔の評価例を図 13 に示す。図 13 (a)は、最小サブキャリアが 1.5 GHz、最小周波数間隔が 1.0 GHz の場合であり、アイが開いており、実際にビット誤りが無いことを確認した。図 13 (b)は、最小サブキャリア周波数が 1.0 GHz、周波数間隔 1.0 GHz の場合であり、アイの劣化がみられ、実際にビット誤りを観測した。図 13 (c)は、最小サブキャリアが 1.5 GHz、最小周波数間隔が 0.5 GHz の場合であり、最小周波数間隔が狭すぎ、アイはつぶれており、実際にビット誤りを観測した。

この結果、最小サブキャリア周波数は 1.5 GHz、最小サブキャリア周波数間隔は 1.0 GHz であることが分かった。サブキャリア周波数を波長とともに示すと図 14 のようになる。また、サブキャリア周波数 f_n は次式で与えられることを明らかにした。

$$f_n = (2n + 2) \times 0.5 \quad [\text{GHz}] \quad (n=1, 2, \dots, 16) \quad (2)$$



(a) 周波数 1.5 GHz; 間隔 1.0 GHz (b) 周波数 1.0 GHz; 間隔 1.0 GHz (c) 周波数 1.5 GHz; 間隔 0.5 GHz
図 13 サブキャリアの最小周波数と周波数間隔

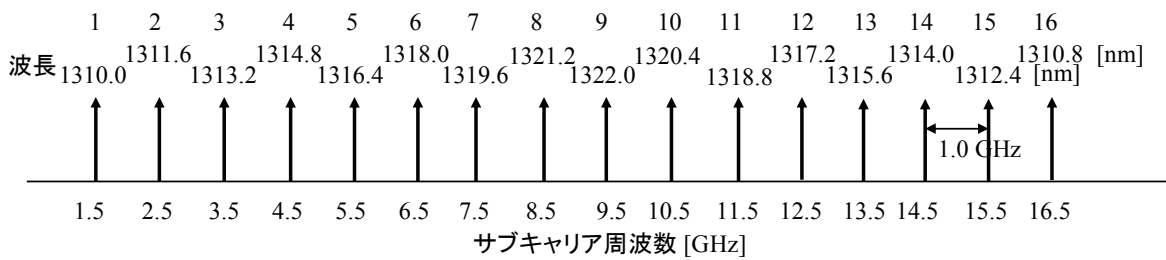


図 14 波長とサブキャリア周波数

(4) ONU16 台を収容する光 OSDM-PON の伝送特性

図 14 を波長順に並べ替え、更に便宜上波長に対する周波数を示したものを表 1 に示す。表 1 に示す波長とサブキャリアの割り当てで、ONU16 台から同時に送信し伝送特性を評価した。まず、各 ONU からの光信号が光スプリッタで多重化された信号のスペクトラムを図 15 に示す。図 15 より 16 多重されていることが確認できる。

次に、(No., 波長, サブキャリア周波数) とするとき、(1, 1310 nm, 1.5 GHz), (2, 1310.8 nm, 16.5 GHz), (9, 1316.4 nm, 5.5 GHz), (16, 1322 nm, 9.5 GHz) に対して、OLT における受信信号のアイパターンとコンスタレーションを各々図 16, 図 17, 図 18, 図 19 に示す。このようにアイは十分に開いており、またコンスタレーションの信号点間は十分離れていることが分かる。実際、これらの場合に送受信データを照合し、ビット誤りなしを確認した。

なお、OLT の BPF は、次数が 5 (電気 OSDM-PON のときと同じ)、通過帯域が 0.5 GHz (電気 OSDM-PON のときは 0.3 GHz) が、最大アイ開口という意味で最適であることが分かった。

表 1 本検討で使用した波長、波長の周波数、サブキャリア周波数

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
波長 [nm]	1310.0	1310.8	1311.6	1312.4	1313.2	1314.0	1314.8	1315.6
周波数 [THz]	228.8492	228.7095	228.5700	228.4307	228.2915	228.1526	228.0137	227.8751
サブキャリア周波数 [GHz]	1.5	16.5	2.5	15.5	3.5	14.5	4.5	13.5

No.	9	10	11	12	13	14	15	16
波長 [nm]	1316.4	1317.2	1318.0	1318.8	1319.6	1320.0	1321.2	1322.0
周波数 [THz]	227.7366	227.5983	227.4601	227.3222	227.1843	227.1155	226.9092	226.7719
サブキャリア周波数 [GHz]	5.5	12.5	6.5	11.5	7.5	10.5	8.5	9.5

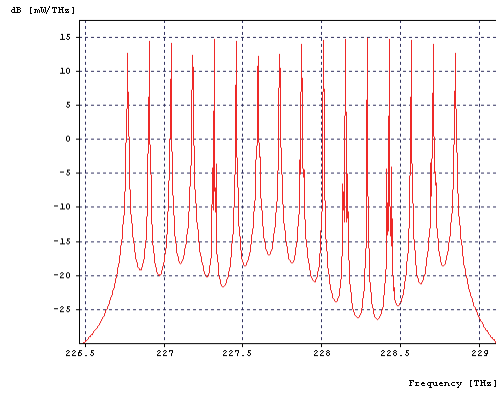
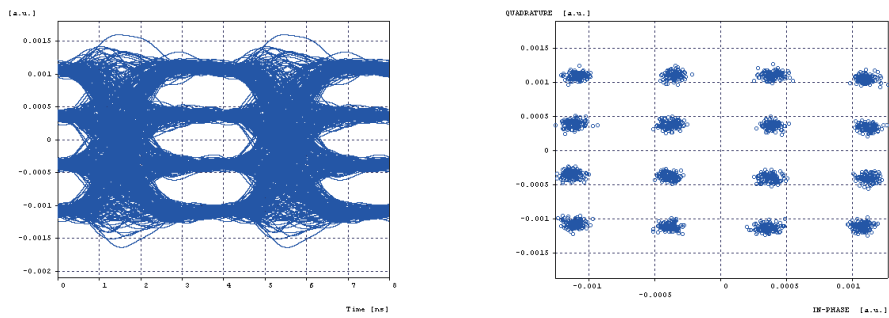


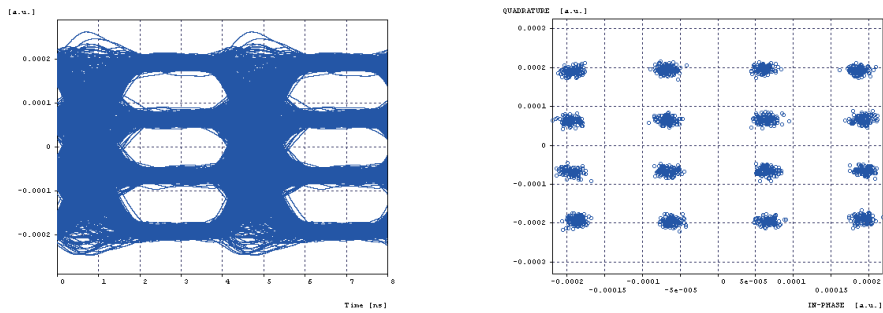
図 15 光信号のスペクトラム



(a) アイパターン

(b) コンスタレーション

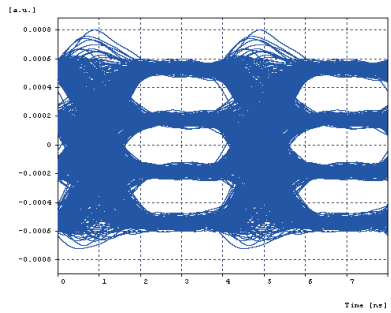
図 16 No.1, 波長 1310 nm, サブキャリア 1.5 GHz の伝送特性



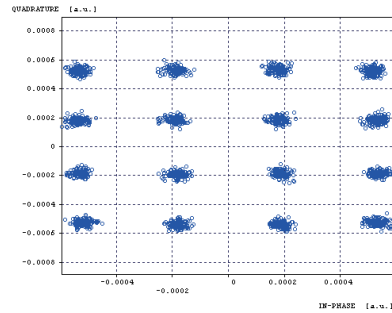
(a) アイパターン

(b) コンスタレーション

図 17 No. 2, 波長 1310.8 nm, サブキャリア 16.5 GHz の伝送特性

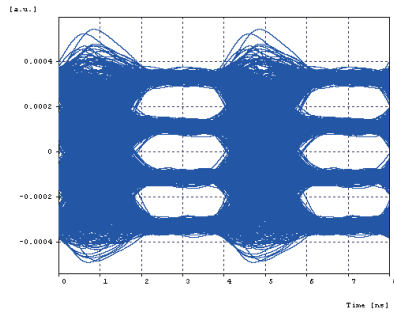


(a) アイパターン

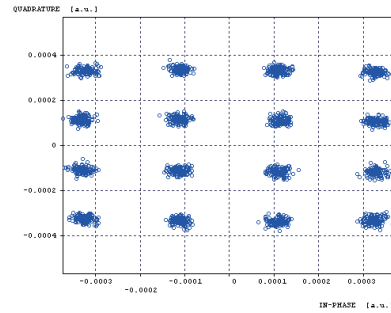


(b) コンスタレーション

図 18 No. 9, 波長 1316.4 nm, サブキャリア 5.5 GHz の伝送特性



(a) アイパターン



(b) コンスタレーション

図 19 No. 16, 波長 1322 nm, サブキャリア 9.5 GHz の伝送特性

5 むすび

より高速なサービスを経済的に提供可能とするために、複数の直交サブキャリアに基づくデジタル変調を用いた OSDM-PON を提案した。提案した OSDM-PON について、各ユーザ速度として 1.0 Gbps を実現するものとし、検討の第 1 歩としてデジタル変調として 16-QAM を使い、ONU から電気信号で伝送する電気 OSDM-PON を検討した。つづいて ONU から光信号で送信する本来の光 OSDM-PON について検討した。

電気 OSDM-PON では、ONU32 台を収容するシステムの実現性を示すことができた。このとき、最小キャリア周波数 1.0 GHz、最大キャリア周波数 17.0 GHz、サブキャリア周波数間隔 0.5 GHz であることを明らかにした。

光 OSDM-PON では、時間の制約上 ONU16 台を収容するシステムの実現性を追求した。この結果、ビート雑音の影響で、各 ONU は異なる波長を用いる必要があることが分かった。このため、波長として現行の TDM-PON と同様に 1310 nm 帯を用い、波長間隔を 0.8 nm として検討を進めた。各波長にサブキャリア周波数を割り当てる方法として周波数の低いものと高いものを交互に割り当てる方法を提案した。提案方法は、一般に考えられる波長の昇順で割り当てる方法よりも、光スペクトラム上でサブキャリア周波数間隔が広くとれ、よりよい伝送特性が得られることを明らかにした。また、サブキャリアについて、最小周波数 1.5 GHz、最小間隔 1.0 GHz であることを明らかにした。

これらの結果より、提案した OSDM-PON の実現性の見通しを得ることができた。今後の課題として、次の項目が残されている。

- (1) ONU32 台を収容する光 OSDM-PON の実現性。
- (2) ユーザ速度とサブキャリア周波数の関係とその最適化
- (3) 誤り訂正符号の導入法とその効果
- (4) 復調用サブキャリア位相の自動調整法とその実現
- (5) 電気光変換法のオールタナティブとその評価
- (6) ビット誤り率算出データの増加
- (7) 64-QAM や 256-QAM の適用とその効果

【参考文献】

- [1] NTTアクセスサービスシステム研究所, “技術講座 GE-PON 技術 第1回 PONとは,”NTT 技術ジャーナル, Vol.17, No.8, pp.71-74, 2005年8月.
- [2] 高 将士, 栗山宜己, 上田裕巳, “直交サブキャリア多重方式を用いた OSDM-PON の提案,” 2011 信学総大, B-8-7, March 2011.
- [3] http://www.rsoftdesign.co.jp/product_system.html

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
直交サブキャリア多重方式を用いた OSDM-PON の提案	電子情報通信学会 総合大会	2011年3月
16-QAM を用いた直交サブキャリア多重方式に基づく OSDM-PON の検討	電子情報通信学会 通信方式研究会	2011年9月予定(登録済)