

修士学位論文要約（令和4年3月）

# デジタルコヒーレント光伝送における GAWBS 位相雑音の補償技術に関する研究

佐藤 耕造

指導教員：廣岡 俊彦

## Study on GAWBS Phase Noise Compensation Technique in Digital Coherent Optical Transmission

Kozo SATO

Supervisor: Toshihiko HIROOKA

Digital coherent quadrature amplitude modulation (QAM) optical transmission, which achieves high spectral efficiency by encoding data on both the amplitude and phase of a lightwave, is one of the key technologies supporting today's information and communications infrastructure. In a QAM system, the transmission capacity increases with a higher multiplicity, but the tolerance to noise becomes lower. Thus, it is important to precisely compensate for waveform distortions that occur during transmission. Recently, it has been revealed that guided acoustic-wave Brillouin scattering (GAWBS) phase noise may cause performance degradation in ultra multi-level or long-haul transmission. Our laboratory has proposed a method of compensating for GAWBS phase noise with a pilot tone (PT). In this study, I clarified the influence of chromatic dispersion on the compensation performance and the GAWBS phase noise correlation between cores in multi-core fibers (MCFs), which are important when applying the PT-based GAWBS phase noise compensation method to WDM and MCF transmission, respectively.

### 1. はじめに

近年、デジタルコヒーレント光伝送において導波音響波型ブリルアン散乱 (GAWBS: Guided acoustic-wave Brillouin scattering)<sup>1)2)</sup>が伝送特性の劣化要因の一つであることが明らかになっている<sup>3)</sup>。当研究室ではこれまでに、パイロットトーン (PT: Pilot tone)を用いた GAWBS 位相雑音補償方式を提案し、本補償方式を用いることで 1024 QAM 信号伝送時のエラーフロアを低減することに成功している<sup>4)</sup>。一方、本補償方式の適用はシングルコアファイバを用いた単一チャネル伝送のみに留まっていた。そこで本研究では、波長分割多重伝送およびマルチコアファイバ伝送における GAWBS 位相雑音補償の実現に向けた基盤技術を確立することを目的とし、波長分散が補償効果に与える影響ならびにコア間の GAWBS 位相雑音の相関特性を明らかにした。

### 2. GAWBS 位相雑音補償における光ファイバ伝送路中の波長分散の影響

波長分散が GAWBS 位相雑音の補償効果に及ぼす影響を調べるにあたり、波長分散の異なる Ultra-large-area fiber (ULAF)と Dispersion-shifted fiber (DSF)の2種類の光ファイバ伝送路を用いて補償実験を行った<sup>5)</sup>。実験系を図1に示す。本実験では Signal を無変調キャリア信号とし、Signal と PT の周波数間隔

$\Delta f$ をパラメータとしてその補償効果を測定した。

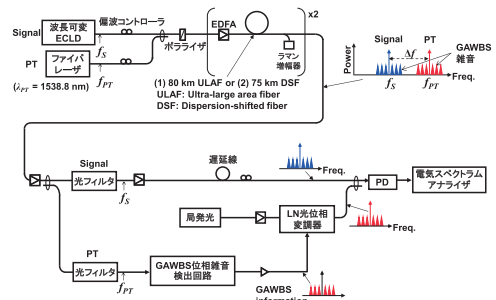


図1 PTを用いた GAWBS 位相雑音の補償実験系

図2(a), (b)にそれぞれ  $\Delta f=10$  GHz, 100 GHz に対する ULAF 160 km 伝送後の GAWBS 位相雑音補償前後における IF 信号の RF スペクトルを示す。図中の青線で示されている補償前の RF スペクトルにおいて、50 MHz から 600 MHz の領域に多くの GAWBS 位相雑音モードが観測されている。一方、赤線は補償後の RF スペクトルを示す。ULAF において最大変調強度を示す  $R_{0,4}$  モード (177 MHz) における補償前後の GAWBS 位相雑音成分の電力比を抑制比と定義すると、 $\Delta f=10$  GHz の場合、抑制比は 9.2 dB と高い値が得られたのに対し、 $\Delta f=100$  GHz の場合、抑制比は 1.3 dB に低下した。

次にULAFに比べ波長分散の影響が小さいDSFを伝送路として同様の実験を行った結果を述べる。図2(c)に $\Delta f = 100$  GHzにおける測定結果を示す。DSFはULAFに比べ有効コア断面積が小さいため、GAWBS位相雑音モードが観測される帯域が50 MHzから1500 MHzと広くなり、また最大変調強度を示すモードは高次のモード( $R_{0,8}$ モード, 368 MHz)となる<sup>6)</sup>。DSFの場合、 $\Delta f = 100$  GHzの場合においても10 dB近い抑制比が得られた。しかしながら、 $\Delta f$ を1780 GHzまで大きくするとその抑制比は0.1 dBに低下した。以上の実験結果より、GAWBS位相雑音の補償効果は波長分散に強く依存することがわかった。そのため、PTを用いたGAWBS位相雑音補償方式においては、ファイバ伝送路の種類および伝送距離に応じてPTの周波数配置を適切に設定する必要がある。

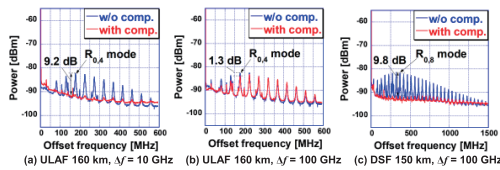


図2 GAWBS位相雑音の補償効果測定結果

### 3. マルチコアファイバにおけるコア間のGAWBS位相雑音の相関特性

今回、非結合型4コアファイバを対象として各コアで発生するGAWBS位相雑音の相関評価を行った<sup>7)</sup>。実験系を図3に示す。本実験系では、fan-in/out素子によって選択した2つのコアからの信号光に対しヘテロダイン検波方式による雑音の相対位相比較を行うことによって、コア間のGAWBS位相雑音の相関を評価している。

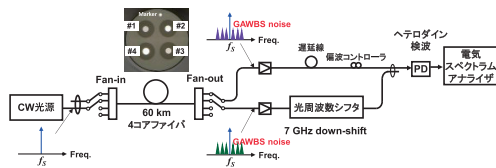


図3 GAWBS位相雑音の相関評価実験系

図4にGAWBS位相雑音の相関測定結果を示す。図4(a-1)および(a-2)中の赤線ではそれぞれ隣接コア(#1-#2)間および対角コア(#1-#3)間のヘテロダイン検波信号のRFスペクトルを表している。黒線は自己遅延ヘテロダイン検波によって測定したコア#1中のGAWBS位相雑音スペクトルであり、これを基準スペクトルとして相関の強度を評価した。図4(b-1)および(b-2)に、それぞれ図4(a-1)および(a-2)中に示した異なるコア間のヘテロダイン検波信号と基準スペクトルの雑音電力差をそれぞれ示す。図中に示した-3 dBにおける水平線は、相関のない雑音ヘテロダイン検波時に干渉せずに累積される場合に対応する。

すなわち、この水平線よりも上および下の領域はそれぞれ同位相および逆位相の相関を持つことを示している。図4(b-1)および(b-2)中で強い相関が観測された代表的な $TR_{n,m}$ モードを矢印で示す。これらの図に示すように $R_{0,1}$ および $TR_{4,4}$ モードは、どちらの場合においても同位相の相関がある。一方、 $TR_{2,3}$ および $TR_{2,4}$ モードは双方に相関が反転する関係にある。さらに $TR_{1,2}$ モードは、図(b-2)のみに逆位相の相関が見られた。以上より、コア間の $TR_{n,m}$ モードによる位相雑音の相関は、コア配置と次数 $n$ に強く依存することを明らかにした。しかしながら、ある特定の音響モードを除いて、大半の音響モードに対してはその相関が弱く、その結果、各コアで誘起されるGAWBS位相雑音は大きく異なる。そのためマルチコアファイバにおいてGAWBS位相雑音を補償するには、コア毎に独立に雑音検出をする必要がある。

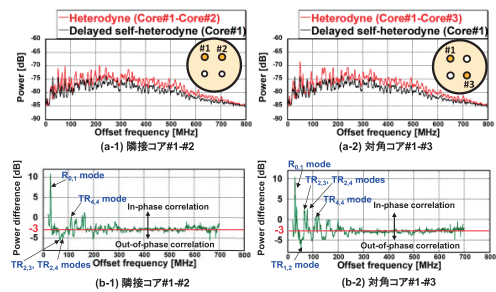


図4 GAWBS位相雑音の相関測定結果

### 4. まとめ

本研究では、まずGAWBS位相雑音補償に対し波長分散が及ぼす影響の評価を行った。その結果、PTを用いたGAWBS位相雑音補償方式においては波長分散の影響を考慮し、ファイバ伝送路の種類および伝送距離に応じて補償対象の信号とPTとの周波数間隔を適切に設定する必要があることを明らかにした。次に、マルチコアファイバにおけるコア間のGAWBS位相雑音の相関特性の評価を行った。その結果、マルチコアファイバにおいてGAWBS位相雑音を補償するには、コア毎に独立に雑音検出をする必要があることを明らかにした。

### 文献

- 1) R. M. Shelby et al., Phys. Rev. Lett., **54**, 939 (1985).
- 2) R. M. Shelby et al., Phys. Rev. B, **31**, 5244 (1985).
- 3) M. Nakazawa et al., Opt. Express, **26**, 9165 (2018).
- 4) M. Yoshida et al., Opt. Express, **27**, 36691 (2019).
- 5) K. Sato et al., Opt. Express, **29**, 10676 (2021).
- 6) N. Takefushi et al., Opt. Express, **28**, 2873 (2020).
- 7) K. Sato et al., Opt. Express, **29**, 42523 (2021).