

氏 名 佐 藤 克 久

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大乙第85号

学位授与の日付 平成13年3月23日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 Development of an Ultra Stable Fiber Optic Frequency
Distribution System Using an Optical Delay Control
Module

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 川口 則幸
教授 河野 宣之
助教授 野口 卓
助教授 吉澤 正則 (国立天文台)
チームリ 吉野 泰造 (総務省)
ーダー

論文内容の要旨

This thesis describes investigation and development of an ultra stable frequency distribution system, of which response speed for phase fluctuations is fast, to achieve the required ultra stable phase stability level of 1×10^{-16} in Allan standard deviation (ASD) for 1000 seconds averaging time for the frequency distribution.

The thesis consists of six chapters. In Chapter 1 (Introduction), the objectives of the thesis are described. In Chapter 2, statistics for frequency stability measurement are reviewed to evaluate phase stability in frequency distribution. Specifically, a method to evaluate phase stability of a frequency distribution system in a time domain is explained to apply the theory for evaluating the development system. Histories of development of fiber optic links for frequency distribution are also reviewed. Chapter 3 reviews the fiber optic link systems applied in frequency distribution. The phase stabilized optical fiber and the two-way system are mentioned. Chapter 4 presents development of the ultra stable fiber optic frequency distribution system. In this chapter, the stability requirement for a frequency distribution system is studied. The components for a fiber optic link are evaluated. Also, the developed system configuration is described. The developed system is evaluated with laboratory measurements in Chapter 5 and the test results are also presented. Chapter 6 gives conclusion of this thesis with discussions of the measured results, including some recommendations for the direction of further improvement and development.

This ultra stable frequency distribution system is the first equipment which an optical delay module (ODM) is applied to, and achieved the best stability in frequency distribution systems. This system responds to phase change caused by change of environmental conditions within one second and compensates it within several seconds. The new phase stability measurement system was also developed to measure high stability of this system. The system consists of a local unit and a remote unit connected by a fiber optic cable. The phase stabilized optical fiber (PSOF) cable is used for the reference frequency transmission. An optical signal, which is modulated by an injected reference signal, is transmitted to a remote unit through a fiber optic cable. An optical signal, which is modulated by the received reference signal in the remote unit, is sent back from the remote unit to the local unit through the same optical fiber cable. On the other hand, the delay at the remote end of the cable has exactly half the round trip delay. The phase difference between the transmitted and the returned signals at the transmitting end in the local unit is proportional to the round trip delay. Therefore, the phase at

the remote end of the cable would be zero, when the phase difference between the transmitted and the returned signals from the remote unit, is adjusted by just a half of this round trip delay. A $1.55\ \mu\text{m}$ laser diode for the signal transmission from the local unit to the remote unit and a $1.31\ \mu\text{m}$ laser diode for the signal transmission from the remote unit to the local unit are installed in the developed system. The phase difference between the transmitted and the returned signals is compensated by an optical delay control module (ODM). This ODM induces no internal electronic noise in the fiber optic frequency distribution system.

The system noise level of conventional frequency stability measurement systems is commonly the order of 10^{-16} for 1000 second integration time in ASD and this order is insufficient to measure the stability of this developed ultra stable frequency distribution system with stability level of 10^{-17} . Thus, the frequency stability measurement system, of which system noise is the order of 10^{-17} for 1000 second integration time, has been designed this time. The vector voltmeter outputs a DC analog signal proportional to phase difference between a reference signal and a test signal from the direct analog output terminal. The DC analog outputs are AD converted by a multimeter with long integration time to achieve the lowest system noise in a frequency stability measurement system. This is the first direct DC analog output usage of a vector voltmeter to be implemented for use in a frequency stability measurement system. The system noise level which is used for the laboratory measurement this time is better than any dual mixer time difference systems.

The stabilities of the developed ultra stable fiber optic frequency distribution system in ASD are 7.5×10^{-17} and 1.1×10^{-17} at 1000 second and 10,000 second averaging time respectively while the environmental temperature of the PSOF cable varies in the range of 10°C and at the rate of $10^\circ\text{C}/12$ hours. This system has the best stability in frequency distribution systems developed so far.

This system can be applied for the distribution of reference frequency from the ultra stable new frequency standard such as an ion storage frequency standard, to the differential VLBI system used for the precise measurements of the distance to galactic radio sources and to the connected radio interferometer in sub-millimeter range.

論文の審査結果の要旨

本博士論文は、電波天文学における重要な観測法の一つであるVLBIを近い将来のミリ波あるいはサブミリ波へ展開するため、また現在開発されつつあるイオンストレージ型超高安定原子周波数標準等に必要の高安定周波数の分配システムを開発し、現在世界最高の1万秒で 10^{-17} の周波数安定度を達成し、この成果をまとめたものである。

一般に、厳重な温度管理下に置かれた原子標準で発振される高安定周波数は数百m以上伝送されて観測機器などに分配される。しかし伝送の間にケーブルの温度変化や捻れにより伝搬遅延の変化を生じ、その結果として周波数安定度が劣化するため、米国ジェット推進研究所（JPL）などを含む国際的な開発競争が行われて来た。

佐藤氏は先ず、Hメーザ（周波数標準）から得られる高安定周波数1.4GHzで振幅変調された光を位相安定化光ケーブルで往復させ、復調した1.4GHz周波数信号と送信する高安定周波数とを位相比較して、往復する間に生じた位相を測定した。次いでこの位相変化量の1/2を送信する高安定周波数に加え、伝送路で生じる遅延変化を補正した高安定周波数を、光ケーブルの終端にある光復調器を通して観測機器に供給できることを示し、実現した。本システムの開発に当たって、要求されている1.4GHzで0.1度の位相変化に相当する極めて微少な遅延をしかも速く補正できるかが鍵であった。従来、アクティブ遅延補正には高安定周波数の位相を変化させたり、光ケーブルを直接温度変化させる方法が採用されていた。佐藤氏は近年開発された光遅延器を初めて導入し、光でアクティブに補正することを実現した。この光ケーブルを含む位相補正回路はループを組んでおり、遅延補正は1ステップ0.1ps（1.4GHzで0.05度に相当）で応答速度は約0.1秒と極めて速く、要求精度を満足していることはもちろん、室内の温度変化が数分以上の周期であることを考慮すると十分な応答速度も持つと考えてよい。

一般に機械的に駆動される遅延器はバックラッシュを持ち、必ずしも仕様通りの性能は発揮されない。ここで用いた光遅延器もその例外ではなかった。そこで、光遅延器を駆動するDCに微少なACを加えることにより、バックラッシュを避けることに成功した。また電源周波数の影響を詳しく解析し、その除去など数多くの工夫を凝らし、高安定周波数分配システムを完成させた。

更に、佐藤氏は 10^{-17} という超高安定度を測定できる装置がそもそも現存しないため、位相差を測定するベクトルボルトメーターのDC出力を積分しながらサンプリングする事により、これまでにない 10^{-18} オーダーの安定度を持つ測定系を完成させた。この自ら開発した測定系により、氏の開発した高安定周波数分配システムが世界最高の安定度を持つことを実証した。

これらの成果は今後、新しい天文学を開きつつある光干渉計などにも応用ができ、今後広い分野での利用が期待される。

以上の判断から、本審査委員会は全員一致して、本論文は博士（工学）の学位を受けるに相応しいものであると判定した。