

氏 名 長野昌生

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大乙第182号

学位授与の日付 平成20年3月19日

学位授与の要件 学位規則第6条第2項該当

学位論文題目 Theory and Experimental Evaluation of the Super Sweep  
Spectrum Analyze

論文審査委員 主 査 准教授 森田 耕一郎  
准教授 井口 聖  
教授 近田 義広  
准教授 花田 英夫  
教授 藤下 光身（九州東海大学）

## 論文内容の要旨

著者は掃引式スペクトラム・アナライザの掃引速度を高速化するアーキテクチャを開発し、実験装置を製作した。これにより掃引式のダイナミックレンジの優位さと測定条件の多様性という特長を保持したまま、測定速度を向上させることができた。測定速度が向上することでスペクトルの検出感度も向上し、電波天文観測にも簡易な分光計としても使用可能であることが分かった。

(1) 掃引式スペクトラム・アナライザは擬似的なフーリエ変換装置である。掃引式スペクトラム・アナライザでは、掃引速度を高速にすると「過掃引現象(over sweep response)」が発生し、観測結果にひずみが生じる。一般には、そのひずみの許容値を定め、それに対応した低速の掃引速度で使用しているのが実情である。著者は数値および実機による実験からその性質を分析し、動作原理と数学モデルを明らかにした。このモデルから掃引式の過掃引現象を厳密に議論することができた。その結果、掃引式における掃引速度がこのように制限される主たる理由は、スペクトラムを得るために、周波数掃引しながら、分解能フィルタにIF信号を入力させていることにあることが明確になった。

(2) 掃引式スペクトラム・アナライザの掃引速度の制限を軽減するには、IF信号のチャープ成分を複素信号処理により相殺すればよい。著者はこの新しい手法を「Super Sweep Method(超掃引方式)」と名づけた。その数学モデルを確立し、有限の掃引速度においても擬似的フーリエ変換が成立することを確認した。このモデルは、観測スペクトラムが、分解能フィルタのフーリエ変換と被測定信号のフーリエ変換の畳み込みで得られる、というものである。

(3) (2)の数学モデルを検証する実験装置を考案・製作し、その詳細な実験結果を報告した。実験装置は、既存のスペクトラム・アナライザを用い、局部発振器が掃引発振する周波数ダウンコンバータとして活用したもので、そのIF信号出力(21.4MHz)を80MHz 14bitにてA/D変換し、デジタルダウンコンバータにより帯域幅とサンプルレートを、測定条件に応じた所定の割合で減じたのち、複素数の係数を持つ「逆チャープ・フィルタ」によりスペクトラムを抽出するものである。

提案方式において掃引と同期してスペクトラムを得るには高速な演算装置が必要となる。本方式で要求される演算速度は、分解能帯域幅と倍速率(従来の掃引式に対する掃引速度の倍率)の二乗に比例することを解明した。

本方式を実現するには、システムに関与する多数のパラメータを整合させなくてはならない。特に、水平軸を測定すべき周波数と合致させるには、各処理段階におけるサンプル数を厳密に管理しなくてはならない、著者は、これらのパラメータの最適化を計り、歪のないスペクトル計測を超高速の周波数掃引で実現した。

(4) 著者が製作した実験装置により、従来方式よりも3倍、10倍、30倍、100倍の掃引速度においても過掃引現象が発生しないことを確認した。より高速な掃引を実現するには、より広帯域なIF信号に対して複素信号処理を施せばよいことを明らかにした。IF信号の広帯域化に伴って高速演算が必要になるが、昨今のDSPやFPGAを用いれば十分実現は可能であり、そのモデルを提案し将来の発展方向も示した。

(5) 著者は超過掃引方式の性質について議論し、次のよう3つの特徴を明らかにした。

1. FFT方式ではIFフィルタの周波数特性は、観測スペクトラムに対する乗算の形で観測結果に影響を与えるのに対して、超掃引式では畳み込みの形で現れる。超掃引式ではIFフィルタの特性は、より狭帯域な分解能フィルタの効果が支配的になり、観測結果にほとんど影響しない。これはFFT方式に対する優位性である。

2. 著者は、既存のスペクトラム解析手法であるチャープZ変換と超掃引方式の関連を明らかにした。超掃引方式はチャープZ変換と主要な部分を共有し、重要度の低い部分を簡略化し、前半はアナログ、後半をデジタル信号処理で実現したものであることを明確にした。本実験装置は、掃引式局部発振器をもつ受信機を前段に用いることでチャープZ変換によるスペクトル分析を可能にした最初の装置である。

3. 掃引式スペクトラム・アナライザでは、ときとして内部のひずみ等によるスプリアスが発生し、観測信号との識別が困難である。本方式では、スプリアス信号は、周波数軸上で拡散され、かつレベルが低下した状態(過掃引現象の状態)で観測されることにより、実際の測定信号との判別が可能となっている。これは従来の掃引式にもFFT方式にもなかった特徴である。

(6) 本研究の実験装置により、電波望遠鏡による水メーザ天体のスペクトル観測を行った。掃引式に対してスペクトル計測感度の点で格段の優位性を実証した。電波望遠鏡の簡易な分光器としての応用も可能であることを確認した。また本方式による性能の限界と実現可能性を考察し、より高性能な分光装置開発の可能性を検討した。

## 論文の審査結果の要旨

申請者は掃引式スペクトラム・アナライザの掃引速度を高速化するアーキテクチャを開発し、実験装置を製作した。これにより掃引式のダイナミックレンジの優位さと測定条件の多様性という特長を保持したまま、測定速度を向上させることができた。測定速度が向上することでスペクトルの検出感度も向上し、電波天文観測にも簡易な分光計としても使用可能であることを明らかにした。

(1) 掃引式スペクトラム・アナライザは擬似的なフーリエ変換装置である。掃引式スペクトラム・アナライザでは、掃引速度を高速にすると「過掃引現象 (over sweep response)」が発生し、観測結果にひずみが生じる。一般には、そのひずみの許容値を定め、それに対応した低速の掃引速度で使用しているのが実情である。申請者は数値および実機による実験からその性質を分析し、動作原理と数学モデルを明らかにした。このモデルから掃引式の過掃引現象を厳密に議論することができた。

(2) 掃引式スペクトラム・アナライザの掃引速度の制限を軽減するには、IF 信号のチャープ成分を複素信号処理により相殺すればよい。申請者はこの新しい手法を「Super Sweep Method (超掃引方式)」と名づけた。その数学モデルを確立し、有限の掃引速度においても擬似的フーリエ変換が成立することを確認した。このモデルは、観測スペクトラムが、分解能フィルタのフーリエ変換と被測定信号のフーリエ変換の畳み込みで得られる、というものである。

(3) 申請者は上で示した数学モデルを検証する実験装置を考案・製作し、その詳細な実験結果を報告した。実験装置は、既存のスペクトラム・アナライザを用い、局部発振器が掃引発振する周波数ダウンコンバータとして活用したもので、そのIF信号出力(21.4MHz)を80MHz 14bitにてA/D変換し、デジタルダウンコンバータにより帯域幅とサンプルレートを、測定条件に応じた所定の割合で減じたのち、複素数の係数を持つ「逆チャープ・フィルタ」によりスペクトラムを抽出するものである。

本方式を実現するには、システムに関与する多数のパラメータを整合させなくてはならない。申請者は、これらのパラメータの最適化を図り、歪のないスペクトル計測を超高速の周波数掃引で実現した。

(4) 申請者が製作した実験装置により、従来方式よりも3倍、10倍、30倍、100倍の掃引速度においても過掃引現象が発生しないことを確認した。より高速な掃引を実現するには、より広帯域なIF信号に対して複素信号処理を施せばよいことを明らかにした。IF信号の広帯域化に伴って高速演算が必要になるが、昨今のDSPやFPGAを用いれば十分実現は可能であり、そのモデルを提案し将来の発展方向も示した。

(5) 申請者は超掃引方式の性質について議論し、特に次のよう 3 つの特徴を明らかにした。

- F F T方式では I Fフィルタの周波数特性は、観測スペクトラムに対する乗算の形で観測結果に影響を与えるのに対して、超掃引式では畳み込みの形で現れるので、より狭帯域な分解能フィルタの効果が支配的になり、観測結果にほとんど影響しない。
- 超掃引方式はチャープ Z 変換と主要な部分を共有し、重要度の低い部分を簡略化し、前半はアナログ、後半をデジタル信号処理で実現したものである。
- 超掃引方式では、スプリアス信号は、周波数軸上で拡散され、かつレベルが低下した状態(過掃引現象の状態)で観測されることにより、実際の測定信号との判別が可能となっている。

(6) 本研究の実験装置により、電波望遠鏡による水メーザー天体のスペクトル観測を行った。掃引式に対してスペクトル計測感度の点で格段の優位性を実証した。電波望遠鏡の簡易な分光器としての応用も可能であることを確認した。また本方式による性能の限界と実現可能性を考察し、より高性能な分光装置開発の可能性を示した。

申請者の博士論文に示された以上の結果は、申請者のスペクトル解析に対する深い理解とまた数学モデルを構築できる高度な数学的能力、さらにはそれを実際の装置で実現できるアナログ回路およびデジタル回路の設計力などの工学的能力が備わっていることを示している。本論文は、従来から広い範囲で使われている掃引式スペクトル・アナライザの欠点を画期的に改良する方式を提案しただけでなく、実際に装置を作成して、その性能を実証したものである。特に、キーとなる超掃引方式のアーキテクチャーは申請者がほぼ単独で開発したものであり、申請者が独創的な開発能力を持ち、自立した工学者であることを示すものである。この方式は、天文学を含む様々な分光測定分野において大きな恩恵をもたらすことは確実である。これにより審査委員会は、全員一致で本論文が博士論文として十分な価値を有し、合格であると判定した。