

V L F ドップラー実験のデータ処理*

松尾敏郎**・木村磐根**・チュー・ホック・シオン**

Data Processing of the VLF Doppler Experiments

By

Toshiro MATSUO, Iwane KIMURA and Chew Hook Siong

Abstract: In order to simplify the data processing system of the rocket-VLF Doppler experiments, two processes were improved: One is concerned with the real time data acquisition process at KSC, that is, for recording of Doppler beat signals the FM data recorder so far used is substituted by an usual tape recorder. The other is concerned with the analysis of a frequency spectrum of the Doppler beat signal, namely the Fast Fourier Transform (FFT) program of an electronic computer is used to analyse the frequency spectrum, from which the Doppler shift is deduced through a pattern recognition technique and finally the electron density profile can be automatically obtained by the computer.

概 要

ロケットによるVLFドップラー実験のデータ処理を簡便化するために以下の2点に工夫が行われた。1つは内之浦KSCにおけるロケットからのテレメータ信号のリアルタイムデータ取得に関して、FM式データレコーダを用いる代わりに通常のテープレコーダで記録する方式をとったことである。もう1つは得られたドップラービート信号を周波数分析する際、ソナグラフによらず電子計算機の高速度フーリエ変換法による方法をとったことで、得られた周波数スペクトルのパタンから自動認識によりドップラーシフトを求め、電子密度プロフィールを自動的に得る方式を開発した。

§ 1. 緒 言

VLFドップラー法はロケットによる電子密度の測定法として簡単で絶対誤差の少ない方法であることが度々の実験で明らかにされたが、その意味で今後共標準機器的になる場合には(i)塔載機器の簡易化、(ii)内之浦に於けるリアルタイムでのデータ処理の簡易化と、(iii)ドップラービート(f_b)の周波数分析を行って正しいドップラーシフトを求め電子密度を計算するプロセスの簡易化をはからなければならない。(i)については既にK-9M-38, 42

* 宇宙研特別事業費による論文

** 京都大学工学部

号機において改良を行いロケット搭載の局部発振器としてLC発振器を用いるが、その周波数とIF信号を共にテレメータで送る方法で大巾に簡易化、小形化された。(ii), (iii)については昭和48年8月21日、16:00 JST 打上げのK-9M-43号機について試みられたもので(ii)は内之浦でリアルタイムデータ記録にデータレコーダを使わずにすむ工夫を行い、又、(iii)についてはドップラービートの周波数分析法として従来のソナグラフによるものの外、電子計算機による周波数分析法を試みた。本報告はこれらの点について述べる。尚VLFドップラー法の原理等についてはこれまで度々報告しているので[1] ここでは省略する。

§ 2. 地上リアルタイムデータ処理装置

図1はK-9M-43号機のロケット搭載受信装置のブロック図である。愛知県刈谷市の依佐美局(NDT)からの17.4kHz信号はロケット上のモノポールアンテナで受信される。ドップラーシフトを受けたこの信号はLC発振器による10.0kHzのローカル周波数でビートダウンされ7.4kHzのIF信号となりテレメータで地上へ伝送される。又、10.0kHzのローカル発振周波数も同時に伝送される。

一方図2はK-9M-43号機による観測データをリアルタイムでドップラービート周波数に変換する地上データ処理装置のブロック図である。点線で囲まれた部分が今回の改良点で

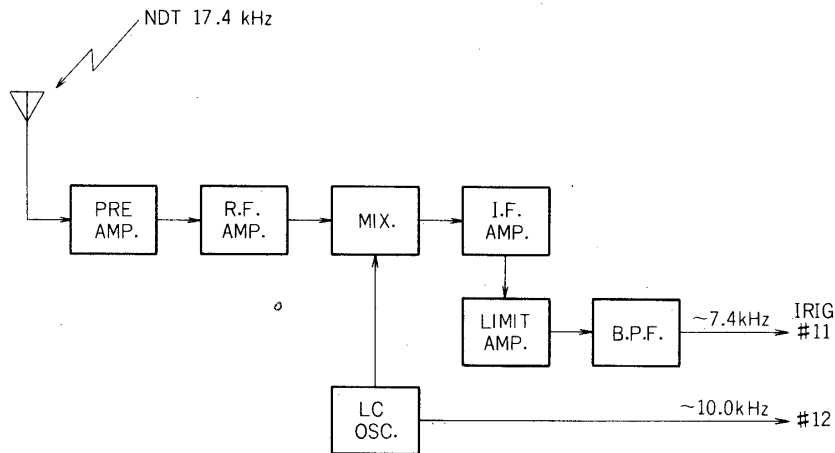


図1 K-9M-43号機; ロケット搭載装置のブロック図

これにより従来の装置より大巾に簡易化、小型化された。ロケットから伝送されてきたローカル発振周波数10.0kHzは地上データ処理装置の高安定な水晶発振器で発振された17.390kHzと混合され7.39kHzだけを取り出す。この出力と、一方ロケットから送られてきた7.40kHzの信号とのビート(約10Hz近傍)が最終データであるがこれの記録にはデータレコーダを必要とする。そこでこの2つの信号は単純に加えて通常のテープレコーダで録音される。これまでがリアルタイム処理である。7.4kHzと7.39kHzをテープレコーダーの異なるトラックに録音し、あとでビートをとる方法も考えられるがテープ走行中、異なるト

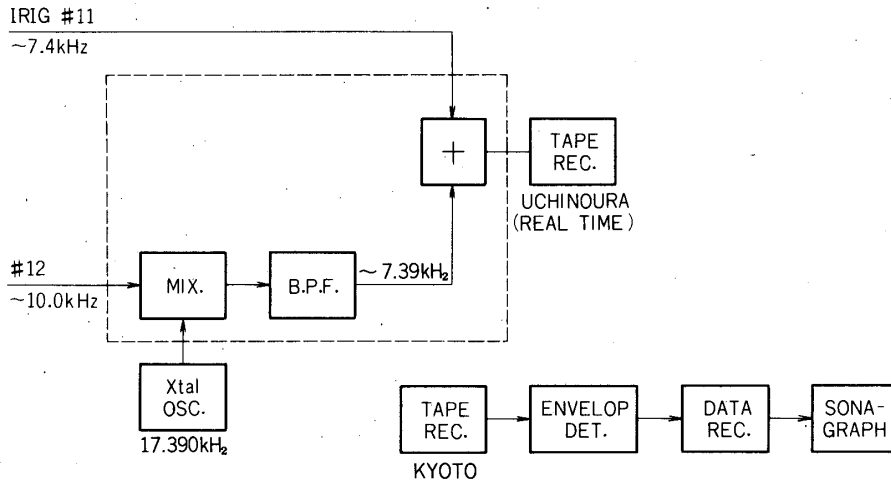


図2 地上リアルタイムデータ処理装置のブロック図

ラック間の相対的ワウフラッターが10Hz以上にも及び使いものにならなくなる。後は京都大学にてドップラービートの周波数を取り出すには磁気テープの再生信号を包絡線検波しLPFを通してやればよい。このビートの記録にはデータレコーダが必要になる。ドップラービートの周波数分析にはテープスピードを200倍(10×10×2)に上げソナグラフで周波数分析する方法が従来から使用されて来たが、今回は後に述べるように電子計算機で周波数分析する方法も試みられた。

図3は上記に述べた方法でデータ処理し、ソナグラフで周波数分析した結果である。今回のロケット実験では本装置と並行して従来の方法(即ち、内之浦でリアルタイムでドップラービート(約10Hz)をデータレコーダに記録する方法)でもデータ処理は行われた。

この方法によるソナグラムは図示されていないが図3と比較するとデータの品質はソナグラム上では全く同じで今回の簡易地上データ処理装置は十分実用性を有し、内之浦ではデー

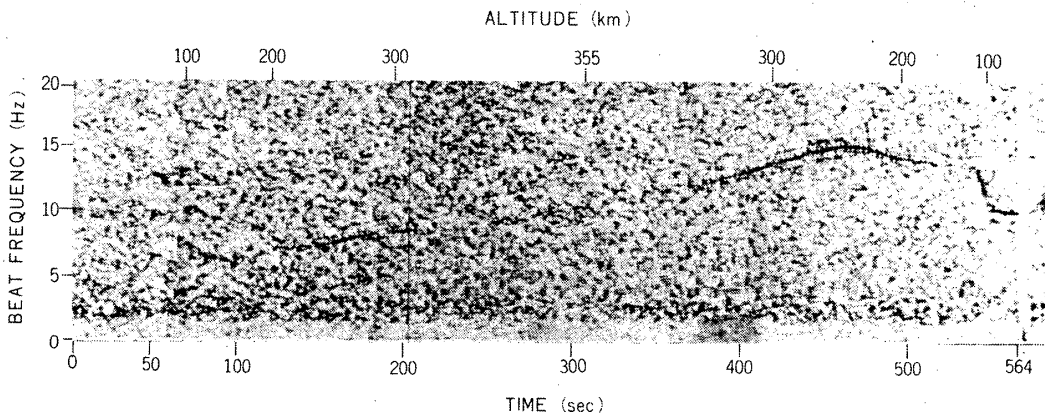


図3 K-9M-43号機で観測されたNDT 17.4kHz信号のドップラービート

タレコーダに代って普通のテープレコーダの使用が可能となり、従来の装置の性能を満たし装置が大巾に簡易、小型化された。

§ 3. ドップラービートの計算機による周波数分析

緒言にも述べた様に従来は観測で得られたドップラービート(約10Hz)をデータレコーダにより周波数を200倍程度に上げソナグラフで周波数分析し、ソナグラムから眼でドップラービートを読み取っていた。ドップラービートが得られればそこから電子密度を求めるプロセスは計算機で行われていた。そこでもし、データレコーダに記録されたドップラービートをA-D変換し、そのデータを直接計算機で周波数分析すれば電子密度分布まで自動的に求められることになりデータ処理は大巾に簡易化される。以下では計算機によるドップラービートの周波数分析について述べる。

時間と周波数の対応はフーリエ解析で結びつけることができる。しかしVLFドップラー観測データの電圧波形のように時間的に不規則に変動している波形からその周期性を見出すことは解析的に求めることができない。このようなときは有限個(区間)の標本値から数値的に計算する方法しかない。これには離散的フーリエ変換(Discrete Fourier Transform; DFT)が利用できる[2]。X(t)を周波数Fで帯域制限された波形とする。これに標本化定理を適用してN個の標本点をもつ時系列を作る。A_kをDFTのk番目の係数とすれば有限複素フーリエ変換をA_k = a_k - i b_kとおくと

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} X_j \cos \frac{2\pi j k}{N}$$

$$b_k = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} X_j \sin \frac{2\pi j k}{N}$$

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \frac{N}{2}$$

となる。X_j ≡ X(jΔt) (j = 0, 1, …, N-1) は時間々隔Δtで標本化された時系列である。フーリエ変換の2乗、P_k = a_k² + b_k²をパワースペクトルとする。時間区間T_n = NΔtの時間幅の値でフーリエ変換するとその結果は波形の切れ目の急激な変化の影響を大きく受けることになる。このままでDFTの計算を行なうと波形の区間の取り方による誤差が問題になる。この様なときはサンプリング区間の始まりと終りに図4に示すようななだらかに零に近づく時間関数をもとの波形に掛けることが考えられた[3]。これにより計算された周波数スペクトルは時間区間の中心付近で正しい周波数スペクトルを示す。

直接X_jと時間の窓との積をフーリエ変換するよりもX_jのフーリエ変換とスペクトルの窓(時間の窓のフーリエ変換)とのコンボリューションを計算する方がよい。スペクトルの窓はHanningのものを使った。DFTにおけるa_kとb_kの計算はNが大きいと演算時間が長くなるのでCooleyとTukeyが演算時間を飛躍的に短縮できる高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform; FFT)の算法を発表した[4]。実際にはR. W. Hockneyの作ったFFTのサブルーチン、FOUR67[5]を使って計算された。このようにFFTとスペク

トルの窓を使ったパワースペクトルを P_k とすると、この P_k を $f_k = k/T_n$ に於けるパワースペクトルとした。次に実際のデータ処理法を述べる。

データレコーダで記録されたドップラービート電圧波形はA-Dコンバーターでデジタル化され磁気テープに記録される。制御指令はFACOM U-200で行われ、0.02秒ごとにサンプリングされた。

ドップラーシフト周波数(Δf)は0.1Hz程度の周波数分解能が必要とされるので計算時間区間は10.24秒間(2^9 個のデータ数)のデータにわたって周波数分析された。 N は512, 計算時間区間 T_n は 512×0.02 秒とし、FOUR67とHanningのスペクトルの窓を使ってパワースペクトル P_k の計算は2.56秒ずつずらして行われた。

このようにしてK-9M-43号機によるVLFドップラー観測結果について、FFTを使って周波数分析をしX-Yプロッターで描かれたのが図5である。

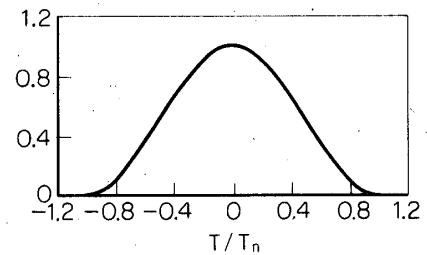


図4 Hanningの窓の時間波形

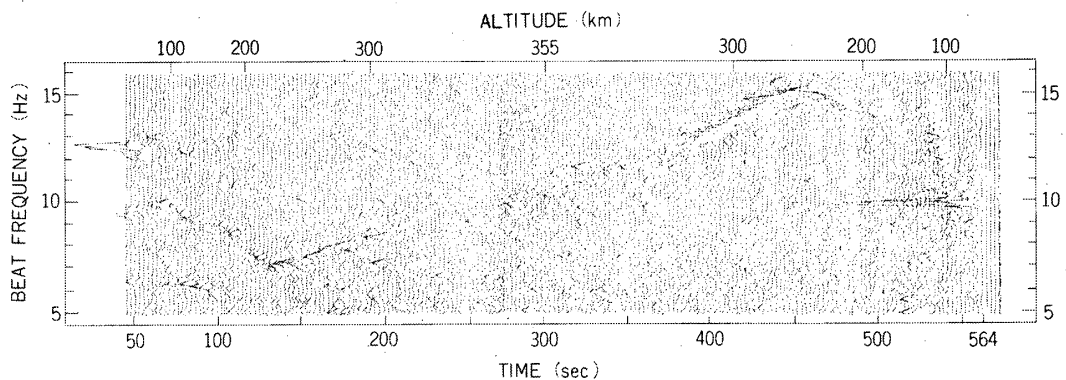


図5 FFTによるスペクトル分析の結果

この図ではソナグラムと異なり、各区間に対するスペクトルが縦軸周波数、横軸(時間軸と一致する)に強度(左方向に振幅増大とする)を描いてある。前述の簡易地上データ処理装置を使ってソナグラムで周波数分析した図3とよく一致する。ソナグラムから読み取った f_b とX-Yプロッターの出力による f_b はよく一致し、最大の相違でも0.2Hz以下であり、目的の信号が T_n 区間内で急激に変化しない限りFFTによる f_b は妥当と考えられる。しかし、急峻な変化があるときは T_n を短かくすると良いがこのときは周波数分解能が下るので問題がある。

§ 4. 周波数分析結果からのドップラーシフト周波数の自動読取り

次にソナグラムに相当する計算機による周波数分析結果からパターン認識して、計算機の出力リストから目的の信号を選びだす必要がある。計算機によるデータ処理(パターン認識)を

行う場合、信号処理過程で雑音の取扱いが重要な問題となってくる。目的の情報を含んでいるデータの中で目的の信号とこれ以外の雑音との識別が問題となる。

(1) 計算機で自動的に、 T_n 区間ごとのパワースペクトルから最大のパワーに相当する周波数を求め、それから電子密度を計算する。もちろん信号も雑音も混在するが P_k の最大は信号である確率が圧倒的に高い。

(2) 目的の信号と雑音が混在する場合に、信号は引き続き T_n 区間内で互いに近い周波数で生起する筈であるという信号の性質 (coherency) を利用し、これを条件として逐次、信号と雑音の区別を計算機で行い、それにより電子密度分布を計算する。

(1), (2) は共に計算機で自動的に f_b を求められるので電子密度分布も自動的に計算される。次に(1), (2) の実際のデータ処理法について述べる。

(1) については P_k の大きさとソナグラムによる f_b の関係が調べられた。その結果、最大 P_k による f_b とソナグラムによる f_b は良い一致を示し、更に P_k の二番目のピークによる f_b をとって最大ピークによる f_b と重ねることにより、ソナグラムの f_b をほとんどカバーすることがわかった。各区間における P_k の最大を取り出し図示したのが図6である。

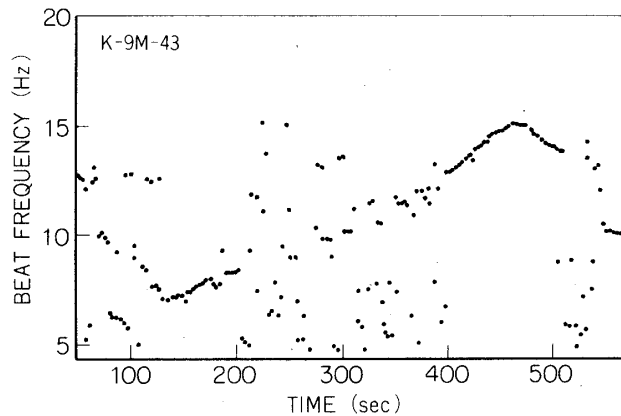


図6 各時間区間 (T_n) の最大 P_k を与える周波数

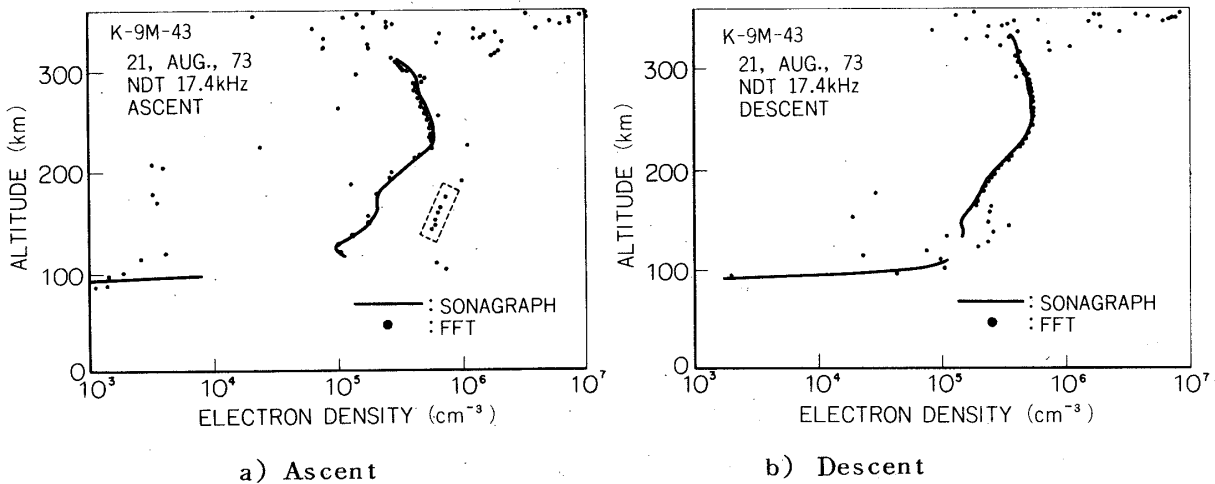


図7 最大 P_k のドップラービートから計算された電子密度プロフィール

図6からもわかるように信号と雑音の区別は可能で f_b がばらついている所は雑音部と考えられる。この図のすべての点の f_b から電子密度プロファイルを計算したのが図7(a), (b)で雑音部分はばらつき、信号部はソナグラムによる電子密度(図中実線)とよく一致する。この方法は雑音も含んだままなので最終的な信号と雑音の区別は電子密度プロファイルを見て判断する。

(2)については、図6に示してある最大 P_k 点について信号と雑音を区別し、信号だけを取り出し図示したのが図8で、図9はこれを電子密度プロファイルにしたものである。信号点の取り出し条件は、

- (a) 10秒間当りの変化率が $\pm 0.8\text{Hz}$ の範囲で最大 P_k 点があること。
- (b) 相隣る3区間で引き続いて(a)の条件を満足すること。

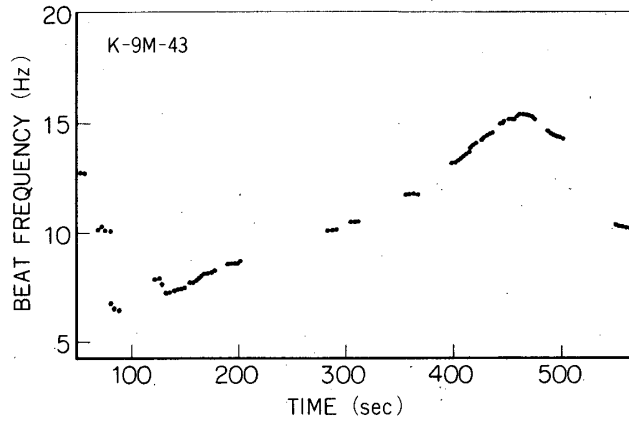


図8 図6からパターン認識により弁別された信号

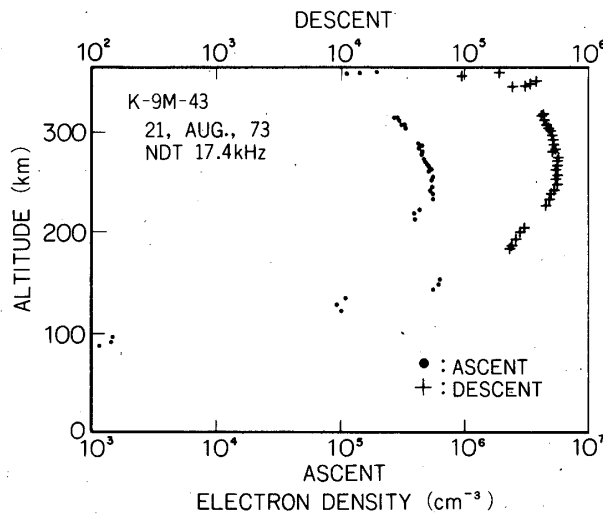


図9 図8のドップラー・ビートから計算された電子密度プロファイル

この二つの条件を満足する点のみを信号とした。今回の計算では(a)の条件が少しゆるいので電子密度分布をみると Δf の絶対値が小さいロケットの頂点付近で電子密度分布に雑音によるものが分離できずに残っている。

検 討

K-9 M-43号機のロケット実験で開発された地上データ処理装置は簡易、小型化され実用上問題ないことがわかった。又、FFTによるドップラービートの周波数分析も従来のソナグラフによる方法と f_b はよい一致を示した。 f_b の計算機によるパターン認識はドップラーシフトが急激に変わるE層下部では若干工夫を要するが信号の十分強い所では全く問題がない。又、電離下部で右廻り、左廻りの両偏波が混在する所ではスピンの影響で同時に2本の f_b が得られる。またK-9 M-43号機のようにロケット軸に直角にモノポールを出したときはモノポールアンテナ側の受信信号はスピン周波数分だけずれるがロケット本体がアンテナとして受信される信号はスピン周波数の影響はなくやはり f_b が2本になる。

この2本のモードの判別は電子密度分布を計算してから判別することができる。例えば図7, (a)で破線で囲まれた部分はそれに対応する。従って本稿に述べたように計算機による自動データ処理は実用になるとと思われる。

謝 辞

K-9 M-43号機ロケット実験は東京大学宇宙航空研究所特別事業として行われたもので関係各位の御協力に深甚の謝意を表す。ロケット搭載装置については明星電気㈱の製作になるが特に芥川守廸氏に御苦勞をおかけした。なお筆者等が御指導を頂いている前田憲一名誉教授に深く謝意を表すと共に、有益なる助言を頂いた松本紘助教授に深謝します。大学院生、金政晃氏にはロケット実験でご協力頂き、又、大石智子氏には計算機のプログラミングでお世話になった。その他研究室の方々には諸事にわたってご協力頂き感謝の意を表します。

1974年7月30日

参 考 文 献

- [1] Kimura, I: VLF Doppler Experiment for Observation of the Ionosphere by means of Rocket, Rep. Ionos. Space Res. Japan, Vol, 21, 173-185, 1967.
- [2] 角川・中津川・高杉・鈴木・高速フーリエ変換と最近のスペクトル分析装置, 電波研究所季報, Vol, 15 No. 76, 43-63, 1969.
- [3] R. B. Blackman and J. W. Tukey: The Measurement of the Power-Spectra—from the point of view of communications engineering, DOVER (1958)
- [4] J. W. Cooley and J. W. Tukey: An algorithm for the Mathine Calculation of Complex Fourier Series, Maths. Comp, Vol, 19 297, 1965.
- [5] J. P. Christiansen and R. W. Hockney: FOUR 67, A fast fourier transform package, Comp. Phys. Comm. 2, 127-128, 1971.