鉱物の弾性波速度および減衰特性を 測定する新しい装置の試作

東京大学地震研究所 藤 沢 英 幸

気 象 大 学 校 木 下 肇・鉢 嶺 猛

(昭和 48 年 10 月 18 日受理)

New Apparatus for Measurements of Velocity and Attenuation of Elastic Waves in Minerals

Hideyuki FUJISAWA

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Hajimu KINOSHITA and Takeshi HACHIMINE

Meteorological College

(Received October 18, 1973)

Electronic circuits for the measurements of velocity and attenuation of elastic waves are outlined. Two modifications are proposed. These are essentially apparatuses for the pulse-superposition method and used for the measurements in minerals. First of them gives output voltage of about 60 (P-P) of RF burst with varying carrier frequency of 10-50 MHz. The other one provides a similar output with a fixed carrier frequency of 10 MHz. Latter one is advantageous for attenuation measurement due to easy impedance matching of whole system for detection of very weak reflection of waves.

Since a principle of this sort of circuits are well known, the present paper will provide only a practical guide for construction of the circuits.

§ 1. はじめに

固体中を伝播する音波の速度を精密に測定する方法の一つに、パルス重ね合わせ法【例えば、McSKIMIN (1961)】がある。そして、このパルス重ね合わせ法に用いられる装置は、そのまま音波の減衰の測定に用いる事ができる。しかしながら、この測定法に必要な諸種の電子装置のうち、その中心をなすパルス発生器関係は、構成が複雑で製作がむずかしく、入手困難であつた。筆者らは、最近著しく発達をとげた各種固体電子素子、特にディジタル集積回路と高周波高出力トランジスタを活用し、回路を簡単化し、安価で、素人にも製作でき、しかも高性能の装置の製作に成功した。

また、デジタル集積回路を用いる目的は、単に、回路を簡単化するためのみではない。デジタル集積回路によつて、パルスを計数的に処理し、パルスを適当なタイミングで、必要な個数だけ発生させるということが、特別な技術なしに可能になるからである。今回製作した二種の装置の一つでは、このデジタル波数操作を採用している。

§ 2. 構 成

Fig. 1 は、本装置のブロック図である。まず、試料を中心として全体を二つに分け、前段のパルス発生器関係の機能を Fig. 1 に即して簡単に述べる。パルス発生器 (Pulse Generator) で矩形パルスを発生させる。このパルスのくり返し周波数は、前段の発振器 (CW Oscillator) (または内部発振器) の周波数によつて決められる。このパルスにより、次段の高周波パルス発生器 (RF Pulse Gated Oscillator) が駆動される。高周波パルス発生器は、矩形パルスが働いている時だけ発振をくり返し、断続的に高周波を発振する (後述の FKH-II では、多少事情が異なるが、原理的には全く同じ)。パルス重ね合わせ法による測定 of 分解能の一部は、Fig. 1 に示されたシステムのうち、パルス発生器関係の性能に負うている。即ち、高周波パルスの立上り、立下りの鋭さ、実用上の最小パルス幅等が重要な要素となる。今回は、このパルス発生器関係について、多少性能の異なる二種の装置を試作した (FKH-I, FKH-II)。以下にその特徴を述べる。

a* for FKH-I.

b* for FKH-II.

Fig. 1. Block diagram of the equipment.

FKH-I: 高周波発振に LC 発振回路を用い、搬送波周波数を 10~50 MHz の範囲で可変にした。パルス幅可変、遅延調整可能。出力 (AMOP) は、ピーク値 (P-P) で 60 V 程度である。この装置の欠点は、高周波パルスの立下りが完全でなく、余韻 (残留振動) が存在し、これが、試料からの反射波の時間間隔が短い場合 (つまり、試料の音波速度が大きい、またはその形が小さい場合)、余韻と反射波が重なって、測定障害になることである。

FKH-II: この機種は、三つの特徴を持つている。第一に、内部に、くり返し周期発生用の安定な水晶発振回路と分周回路を持つていること。第二に、デジタル集積回路によつてパルスの波数を計数的に処理していること。第三に、高周波の発振に水晶発振回路を用いていること。したがって、搬送波周波数は固定 (現在、10 MHz) である。それ故インピーダンス整合も容易で、高周波パルスの波形のくずれも極めて少ない。他の性能は、FKH-I とほぼ同じである。

実際の測定の場合、ブロック図の通りパルス発生器の出力 (AMOP) は、直接受信側にも入り、試料による反射波より振幅が圧倒的に大きいため、反射波の観測のさまたげになる。この

Fig. 2. Electronic circuit of FKH-I type equipment.

困難を解決するため、適当なタイミングで (AMOP) を消去する必要がある。FKH-II では、内部の波数操作でこれが出来るが、FKH-I では、外部の抑制パルスと抑制回路を必要とする。その詳細は次節で述べる。

さて、次に、ブロック図で見る通り、インピーダンス整合用トランス (Transformer), 広帯域前置増幅器 (Broad-Band Receiver) が介在してオシロスコープで反射波を観察する。トランスと増幅器については、次節で述べる。

§ 3. 回 路

FKH-I : (Fig. 2, 上から下に向つて).

一段 : 矩形パルスの発生と、パルス幅・遅延の調整 (出力 → Z). 簡単な発振回路を内蔵している。

二段 : 矩形パルスを前二段で増幅。三段目の 2SC517 にスイッチングを行なわせる。2SC517 が on で、2SC320 が導通すると発振回路が完結して、高出力の高周波パルスを出す (AMOP). 終段は LC 発振回路であるから、C を変化させて搬送波の周波数を変えることができる (10~50 MHz). 実際の測定の場合、試料からの反射波を見やすくするため、出力高周波パルス (AMOP) を適当なタイミングで消去してやる必要がある。そのため、普通、ブロック図でも示されている通りオシロスコープからの抑制パルスを用いて、抑制回路 (Fig. 2, Suppress) の 2SC320 を on にして、2SC517 を駆動するパルスをアースしてやる。しかし、2SC320 の残留抵抗の存在により、パルスを完全にはアースできない。それ故、最終的な出力に雑音が残る。この雑音の振幅は、試料の反射波のそれと同程度なので測定のじゃまになる。これを防ぐため、一点鎖線で囲んだ抑制回路 (Fig. 2, Suppress) を Fig. 2 の第一段目の IC, 7400 と 74121 の間に入れて、矩形パルスの発生そのものを押えてしまえば、回路は完全に働く。ただしこの場合、7400 を破壊しないように、G に接続する部分に多少手を加える必要がある。この改良により、FKH-I の雑音はほぼ完全に消去でき、測定精度は一段と向上した。

ブロック図の Matching Network 以下の部分は FKH-II と共通で、Fig. 5 に示されている。

FKH-II: (Figs. 3, 4, 5, 上から下に).

一段 : 10 MHz の水晶発振器からの波を分周し、くり返し周波数 10 MHz~100 KHz の矩形パルスを作る。(出力 → X).

Fig. 3. A part of electronic circuit of FKH-II type equipment.

Fig. 4. A part of electronic circuit of FKH-II type equipment.

二～五段： 矩形パルスを 100 ケ出した後、空白時間をそれぞれ 10, 100, 1000 パルス相当分だけ設ける。この空白分の切換えは SW_2 で行なう (出力 $\rightarrow Y$)。

六段： 矩形パルスの幅と遅延調整を行なつた後、このパルスによりゲートを駆動して 10 MHz の発振を行なわせる (出力 $\rightarrow Z$)。

七段の： 上段の出力を同調増幅器 (ブッシュプル) で増幅し、高周波パルス出力 (AMOP) (AMOP) までを取り出す。

FKH-II を I と同じに矩形波パルスによつて高周波発振を起させる場合には、五段目真中の 7400 を用いて外部パルスによるゲートの開閉をやつても良い。なお、図中 * の付いた部分は、素子を意識的に悪用してパルスを歪ませ、正弦波を取り出したことを示したものである。

トランス： インピーダンス整合用の空気トランスは MATTABONI and SCHREIBER (1966) のデータを参考にして製作した。ただし、形状、寸法は、同じ周波数範囲でも彼等の原形とはかなり異なるものとなつた。

前置増幅器： (Fig. 1, Broad-band Receiver). (Fig. 3, 下段参照)。

搬送波周波数が 10~50 MHz と広く変動するので、広帯域増幅用集積回路 SG 733 C または相当品を用いて製作した。SG 733 C は、帯域幅 0~120 MHz, 入力感度数 μV , 利得 50 db, 差動型である。実用上 40 db 程度で用いるのが安定で、これは電源の性能にもよる。さて、実際の測定では、数十ボルトの入力 (Transducer から見て) 高周波パルス (AMOP) 自身も試料による反射波と同時に前置増幅器に入る

Fig. 5. A part of electronic circuit of FKH-II type equipment.

IC: SN74 series TTL (Texas Instruments, U.S.A.)

V_{cc} : DC + 5v.

 $V_{CM} : DC + 25 - 30 V.$

ので、(AMOP) の頭をシリコンダイオードで切つて (± 0.7 V 内外) 増幅器を保護している。

コイル： フェライトのトロイダルコア (~ 100 MHz, 内径 10 $\sim$ 20 mm, 外径 20 $\sim$ 30 mm, TDK およびトミタ電機製) に, 0.5 $\sim$ 1.0 ϕ 程度の銅線を数回 $\sim$ 30 回程度まく。まき数は, 実験をくり返して最適なものをさがす。

§ 4. 試用結果

まず, 速度の測定の精度について考える。測定装置の分解能のみならず, 試料そのものの形状誤差が全体の精度を左右する。したがって, ここでは, 今回試作した装置の分解能に限って考える。

今までに行なつた測定は, 長さ 10 mm 程度の熔融石英を用いた極めて予備的な実験に限られている。この場合, くり返し周期を決定する発振器の精度 (10^{-8}) が悪かつたため, 測定系全体の精度がこれによつて決定されてしまつた。現在, この点を改良するため, 周波数合成器 (精度 $\sim 10^{-8}$) を用いることにしている。しかし, たとえ高精度の発振器を用いたとしても, さらに, 実際にパルスが重なつた点を, いかに精度よく見分けるかという問題が残る。この点を改良するため「高精度タイミング回路」の製作を行なつている。さしあつて, この装置の総合的な精度の目標を 10^{-5} におき, さらに改良を目ざしている。

減衰特性の測定については, まだ試料と振動子の接着等の問題で定量的なことは言えないが, とにかく, 現在程度のあらい実験でも, 10 ケ以上の反射波を観測することができた。搬送波周波数の範囲をさらに広げて, 種々な減衰の機構について定量的な実験を行なうことを目指している。

謝 辞

今回, 回路を作るに当つて多くの助言と励ましを下さつた京都大学工学部の曾我助教授, 名古屋大学理学部の熊沢助教授, ならびに東京大学物性研究所の生島助教授に, この紙面を借りて深く感謝致します。

文 献

- MATTABONI, P., and E. SCHREIBER, 1966, Variable Air Transformer for Impedance Matching, Rev. Sci. Instr., **37**, 1625-1626.
MCSKIMIN, H. J., 1961, Pulse Superposition Method for Measuring Ultrasonic Wave Velocities in Solids, J. Acoust. Soc. Am., **33**, 12-16.