195. トリチウムガスモニタ用 α バックグラウンド打消し回路の改良

松本 譲*, 隈部 功*

(1988年 7月13日 受理), (1988年 10月21日 再受理)

Improved Alpha-Background Cancellation Circuit for Tritium Gas Monitor

By Yuzuru MATSUMOTO and Isao KUMABE

A new cancellation circuit which eliminates component due to α -particles from Rn in the ionization current of a tritium gas monitor has been designed and constructed. In order to eliminate the α -particle component, a gated integrator circuit that form signals having the same pulse shape as initial α -particle signals was newly adopted in the cancellation circuit. The transfer function of the cancellation circuit was calculated for the α -particle signal by means of the Laplace transformation.

The test for the system showed that the cancellation circuit eliminated successfully the component of α -particle signals. By use of the gated integrator, the cancellation circuit functioned very well even when the counting rate of α -particle signals is as high as 1 cps in the input. This circuit is essential to measure the tritium-gas concentration below the maximum permissible concentration.

KEYWORDS: *cancellation circuit, tritium gas monitor, elimination, alpha particles, gated integrator, transfer function, radon, Laplace transformation, tritium gas concentration, radioactivity*

I. 緒 言

一般に、トリチウムガスモニタの検出器としては積分型の電離箱が用いられていて、トリチウムの β 線による電離電流を測定している。電離箱のバックグラウンドとしては、空気中のラドン(Rn)からの α 線による電離電流がかなり大きく、しかもRnの濃度は日時変化、気象変化によって大きく変動する。この影響は従来の方法⁽¹⁾では取り除くことができない。それゆえ、従来のスタックモニタではその感度を排気許容濃度 $0.2\text{pCi}/\text{cm}^3$ まで上げることが困難となっている。しかし、Rnからの α 線のエネルギーは約 5.5MeV でその信号が大きいため、注意深く取り扱えばパルス型として十分検出可能である。

さきに我々はこの点に着目し、Rnからの α 線の影響を電子回路によって打ち消して、トリチウムモニタの感度をこれまで以上に向上させることを目的として研

究⁽²⁾を行なった。その原理は次のようである。電離箱からの信号中の大きい成分、つまり α 粒子による成分をパルスの取り出すことによって、トリチウム β 線による成分から分離し、元の信号中の α 粒子による波形と同じ波形に整形してから、元の信号からこれを差し引き、 α 線の影響を除去するというものである。

前報⁽²⁾では、打消し回路を製作し、空気中のRnからの α 線の影響を電子回路を使って除去できることを確かめた。また、大容量の電離箱で生じる連続した α 粒子による信号を取り除き、排気許容濃度以下のトリチウム測定の可能性を示した。しかし、以下の問題点が残った。

- (1) 打消し回路の構成や動作がやや複雑であった。
- (2) パルスの整形回路の時定数が大きいため α 粒

* 九州大学工学部応用原子核工学教室 (Fac. of Eng., Kyushu Univ.)

対する応答速度も速い。

一般に入力バイアス電流が小さい演算増幅器は、その周波数特性が悪いものが多い。本研究で用いた演算増幅器は α 粒子によるパルス信号も増幅するので、必要とする周波数特性を持ち、入力バイアス電流ができるだけ小さいものを選んで、ケース温度を一定に保つことで安定な微小電流増幅器を構成した。

2. 打消し回路

実用的な大容量の電離箱を用いたトリチウムガスモニタでは、 α 線によるバックグラウンドが多くなり、1つの α 粒子による信号の減衰時間以内に連続して次の α 粒子による信号が重なる確率が増える。よって、連続した α 粒子による信号と同じ形の打消し信号を作

る回路が必要である。前報では、ピークホールド回路、サンプルホールド回路、加算回路を用いてその動作を複雑にコントロールすることにより打消しのための信号を形造っていたが、今回はゲイテッドインテグレイタ(gated integrator)のみで行い、回路を簡単にした。

また、前回の回路方式では、打消し信号と元の信号中の α 信号の波形を同じにするために、微分、積分回路の整形時定数を長くする必要があった。しかし、今回の回路はゲイテッドインテグレイタを用いることにより、短い時定数でも元の信号波形を再現することができる。回路のブロック図をFig. 4に、タイミング図をFig. 5に示しブロック図に沿って動作を説明する。(文中のA, B, C, ……はFig. 4, 5中の記号を示す。)

Fig. 4 Block diagram of cancellation circuit

Fig. 5 Schematic timing diagram of cancellation circuit

微小電流増幅器からの信号は、積分回路Ⅰ(integrating circuit I)で雑音の高周波成分が除かれる。その信号A(段がついている部分が α 粒子による信号に対応する)は、微分回路(differentiating circuit)と積分回路Ⅱ(integrating circuit II)へ送られる。微分回路では、 α 粒子による信号成分Bが他の成分から分離される。 α 粒子のパルス信号Bは、波高弁別器(discriminator)の設定値以上の波高の信号だけ、ゲイテッドインテグレイタで一定の時間幅だけ積分される。この

時間幅は単安定マルチバイブレータ(monostable multivibrator)で設定されたもの(D)で、波高弁別器の出力Cの立上がりでトリガされたものである。微分されて幅が狭くなっている α 粒子による信号はゲイテッドインテグレイタで元の信号と同じ減衰時定数を持つ波形Eに整形され差動増幅器(differential amplifier)へ送られる。

一方、Aからの信号は積分回路Ⅱでその信号波形の立上がりの部分の波形を、ゲイテッドインテグレイタの出力波形と同じ形にするために微分回路と同じ時定数で積分される(F)。差動増幅器では信号のそれぞれの差をとり、 α 粒子による成分を除去している(G)。回路図をFig. 6に示す。回路は市販のアナログやデジタルの集積回路を使用し、その応用回路で構成されている。ゲイテッドインテグレイタの動作については後の節で詳しく述べるが、他の回路については前回⁽²⁾報告したので省略する。

(1) 波形解析

波形解析にはラプラス変換を使用した。最初に微小電流増幅器をも含めて元の信号の流れ(ブロック図のA-E)と打消し信号の流れ(ブロック図のA-B-F)に

Fig. 6 Circuit diagram of cancellation circuit

対応する伝達関数を求める。次に、入力信号として電離箱からの電荷パルスを入力して、それぞれの信号の流れの出力信号波形を求め、その形が同じになることを示す。信号としては寄与分についてだけ考える。

Fig. 7 に示すように、それぞれの信号の流れに対応

Fig. 7 Basic block diagram and input charge signal for signal analysis

する伝達関数を $H_A(t)$ および $H_B(t)$ とし、電離箱からの電荷パルス信号 $Q(t)$ を図中に示すような、大きさ 1、幅 a の矩形と仮定する。

Fig. 8 に、微小電流増幅器と打消し回路の構成回路を伝達関数で表わしたブロック図を示す。それぞれの回路の伝達関数は次のようになる。式中の T_1, T_2 はそれぞれ回路の時定数である。〔付録〕参照

$H_1(s)$: 微小電流増幅器

$$H_1(s) \equiv \frac{V_o(s)}{Q(s)} = -\frac{sR_1}{(1+sT_1)}$$

$H_2(s)$: 積分回路 I

$$H_2(s) \equiv \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{1}{(1+sT_2)}$$

Fig. 8 Block diagram of signal flow using transfer function

$H_3(s)$: 微分回路

$$H_3(s) \equiv \frac{V_3(s)}{V_1(s)} = \frac{sT_2}{(1+sT_2)}$$

$H_4(s)$: ゲイテッドインテグレイタ

$$H_4(s) \equiv \frac{V_4(s)}{V_1(s)} = -\frac{1}{(1+sT_1)}$$

$H_5(s)$: 積分回路 II

$$H_5(s) \equiv \frac{V_5(s)}{V_1(s)} = -\frac{1}{(1+sT_2)}$$

信号の流れ A, B の伝達関数はそれぞれ次式のようになる。

$$H_A(s) \equiv \frac{F_A(s)}{Q(s)} = H_1(s)H_2(s)H_3(s) \quad (1)$$

$$H_B(s) \equiv \frac{F_B(s)}{Q(s)} = H_1(s)H_2(s)H_3(s)H_4(s) \quad (2)$$

Fig. 7 に示す電荷信号は次式で表わせる。

$$Q(t) = 1\{u(t) - u(t-a)\}$$

ここで, $u(t)$: ステップ信号

$Q(t)$ のラプラス変換は次式になり,

$$Q(s) = \frac{1}{s} - \frac{e^{-as}}{s}$$

それぞれの出力は次式のようになる。

$$F_A(s) = \frac{H_A(s)}{s} - \frac{H_A(s)e^{-as}}{s} \quad (3)$$

$$F_B(s) = \frac{H_B(s)}{s} - \frac{H_B(s)e^{-as}}{s} \quad (4)$$

(3), (4) 式をラプラス逆変換して, それぞれの信号の流れに対応する出力信号波形を求める。(3), (4) 式の逆変換は第 1 項の応答, すなわちステップ応答 $V_A(t)$, $V_B(t)$ を求め, その関数の時間を a だけ遅らせた $V_A(t-a)$, $V_B(t-a)$ との差をとることにより得られる。したがって, ここでは $V_A(t)$, $V_B(t)$ についてだけ考える。

(3), (4) 式の第 1 項はそれぞれ次のようになる。

$$V_A(s) = -\frac{sR_1}{s(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_2)} \quad (5)$$

$$V_B(s) = -\frac{s^2R_1T_2}{s(1+sT_1)(1+sT_2)(1+sT_2)(1+sT_1)} \quad (6)$$

(5), (6) 式を部分分数に分解し, ラプラス変換表を用いて逆変換すると, 次式のようになる。

$$V_A(t) = -\frac{R_1T_1}{(T_1-T_2)^2} \left[e^{-(1/T_1)t} - \left\{ 1 - \frac{t}{T_1} + \frac{t}{T_2} \right\} e^{-(1/T_2)t} \right] \quad (7)$$

$$V_B(t) = -\frac{R_1T_1T_2}{(T_1-T_2)^3} \left[\left\{ 1 - \frac{T_2}{T_1} - \frac{t}{T_1} - \frac{T_2}{T_1}t \right\} e^{-(1/T_1)t} - \left\{ 1 + \frac{T_2}{T_1} - \frac{t}{T_1} + \frac{t}{T_2} \right\} e^{-(1/T_2)t} \right] \quad (8)$$

ここで, 各時定数を $T_1=2.2$ s, $T_2=3$ ms, ゲイテッドインテグレイタの積分時間幅を $T_i=50$ ms とすると, $0 \leq t \leq T_i$ の時間では (7), (8) 式は

$$V_A(t) = -\frac{R_1T_1}{(T_1-T_2)^2} \left\{ e^{-(1/T_1)t} - \left(1 + \frac{t}{T_2} \right) e^{-(1/T_2)t} \right\} \quad (7')$$

$$V_B(t) = -\frac{R_1T_1T_2}{(T_1-T_2)^3} \left\{ e^{-(1/T_1)t} - \left(1 + \frac{t}{T_2} \right) e^{-(1/T_2)t} \right\} \quad (8')$$

のように近似でき, 応答の形が等しくなる。

また, $t > T_i$ の時間では (8) 式は

$$V_B(t-T_i) = V_B(T_i)e^{-(1/T_2)(t-T_i)}$$

となり, また (7) 式の第 2 項は無視できるので応答の形は等しくなる。よって電荷 $Q(t)$ に対する信号の流れ A, B の出力信号 $F_A(t)$, $F_B(t)$ は (3), (4) 式に対応して次式のようになる。

$$F_A(t) = V_A(t) - V_A(t-a)$$

$$F_B(t) = V_B(t) - V_B(t-a)$$

以上のことから, α 粒子によるパルス信号の打消しがうまく行われることが証明できた。

(2) ゲイテッドインテグレイタ

この回路は, 高計数率の γ 線のスペクトロスコーピーに使用されている整形回路方式で, 短い時定数でプリフィルタされたパルス信号を, その立上がり時点から一定時間幅 ($\approx$ パルス幅) を積分することにより, その信号のエネルギー情報 (元の信号のパルス波高) を再現する方法である⁽⁴⁾。この方法を用いると, 他の整形方式より短いパルス幅でエネルギー分解能を損なうことなく高計数率の波高分析が行える。また元の信号のパルス波高が同じで立上がり時間が異なる信号を, 短い時定数の整形回路でプリフィルタした場合, 同じ波高にならない。しかし, その信号をゲイテッドインテグレイタを通すとその波高を同じにすることができる。

本研究では, ①電離箱が同心円筒なので, α 粒子による電離が生じる場所によって, 同じエネルギー損失でもパルス信号の立上がり時間が異なる, ②電離箱の印加電圧を低くしたため立上がり時間が遅い, ③電離箱の容積が大きく, α 粒子の計数率が増加するため

ルス信号を分離する微分回路の時定数を短くする必要がある, 等の点を考慮して打消しのための信号を造る回路にゲイテッドインテグレイタを採用した。

回路の基本構成をFig. 9(a)に示し, その動作を説明する。(文中のH, I, JはFig. 9(a), (b)中の記号を示す。) 信号Hの波高が波高弁別器の設定値を超すと, 単安定マルチバイブレイトがトリガされ, その出力Iでゲイ

テッドインテグレイタのリニアゲート(linear gate)が開き, 単安定マルチバイブレイトで決まる時間幅だけ積分回路で積分される。リニアゲートを閉じると, 信号は積分コンデンサと復帰抵抗で決まる時定数で減衰を始める(J)。減衰途中で次の信号がディスクリの設定値を超すと, 前の信号に加え合わされるように次の信号の積分が行われる。

(a) Simplified circuit diagram

(b) Schematic timing diagram

Fig. 9(a), (b) Gated integrator

この過程を繰り返すことにより, 連続した信号波形を形造ることができる。積分回路は演算増幅器(オペアンプ)の応用回路で反転増幅回路と呼ばれているもので, その帰還部にコンデンサ C_f と抵抗 R_f を並列に接続したものである。積分回路の入力部では $I_s = V_s / R_s$ の関係が成り立ち, その電流 I_s が R_f と C_f の並列回路を流れ, その電圧降下が出来信号Jとなる。Fig. 9(b)のように, 入力信号として矩形波の信号が入ると出力は $T = R_f C_f$ の時定数で積分された信号となり, 入力信号がなくなると同じ時定数で減衰を始める。また1つの信号の減衰途中で次の信号が入っても, 出力信号の状態に無関係に入力信号に比例した電流が帰還部に流れ, 前の信号に加え合わされた出力信号になる。

Ⅲ. 実験結果

1. テストパルスによる打消し回路の調整

連続パルスを発生するテストパルスからの信号を用いて, 打消し回路の調整を行なった。パルスの時間間隔を1sに調整し, 10s間に連続して1~10個のパルスを入力してテストを行なった。結果をFig. 10に示す。aはパルサからの信号, bはゲイテッドインテグレイタの出力信号, cは打消し回路の出力信号である。連続したパルス信号に対してほとんど打ち消されていることがわかる。信号cに少し打消し残しがあるのは, ゲイテッドインテグレイタの時定数が微小電流増幅器の時定数に合わせてあるため, パルサ信号の減衰時定数と少し異なるためである。

2. 打消し回路のテスト

91の電離箱からの信号を入力して, 打消し回路の

a: Input signals from pulser
b: Output signals of gated integrator circuit in cancellation circuit
c: Output signals from cancellation circuit

Fig. 10 Responses of cancellation circuit for test signals

テストを行なった。電離箱には外気に比べて R_n 濃度が高いコンクリート室内の空気を入れた。結果をFig. 11に示す。aに電離箱からの信号を示す。環境 γ 線による信号(直流成分)に α 粒子によるパルス信号が加え合わさっている。bにゲイテッドインテグレイタの出力信号を示す。 α 粒子によるパルス波形と同じ波形が造られていることがわかる。また, 連続入射に対しても重なった波形が造られている。cに打消し回路からの出力信号を示す。 α 粒子によるパルス信号はほぼ完全に打ち消され, 環境 γ 線による成分だけが残っている。

Ⅳ. 結論

本報では次のように結論できる。

a: Input signals from ionization chamber
b: Output signals of gated integrator circuit in cancellation circuit
c: Output signals from cancellation circuit

Fig. 11 Responses of cancellation circuit for 9l ionization chamber

- (1) 打消し回路にゲイテッドインテグレイタを用いることにより、回路の構成が簡単になった。また、回路のパルス信号に対する応答関数を求め、元の信号と打消し信号の形が同じになることを示した。
- (2) 打消し回路にゲイテッドインテグレイタを用いて微分回路の時定数を小さくしたことにより、回路の不感時間が前報の約1/5になった。これにより、 α 粒子の計数率が高い場合(約1 cps)でも打消し残しを少なくすることができると。
- (3) 湿度が高い場合に電離箱の高電界側電極表面に吸着した水分吸着層から、高電界による荷電粒子放出に起因する暗電流が流れる。これを少なくするために電極間の印加電圧を低くした。しかし、このことにより α 粒子による信号の立ち上がり時間が遅くなるが、打消し回路にゲイテッドインテグレイタを用いることでうまく打ち消すことができた。
- (4) 改良した打消し回路の調整と動作を確認する目的でテストを行なった。連続したテストパルス信号を用いて回路の調整を行い、その打消しができることが確かめられた。また、実際の電離箱からの α 粒子によるパルス信号に対しても打消しができることが確かめられた。
- (5) 本研究の方法は、トリチウムガスモニタの高感度化に有効であると考えられる。

—参考文献—

- (1) JALBERT, R. A., HEIBERT, R.D.: *Nucl. Instrum. Methods*, **96**, 61 (1971).
- (2) 松本 謙, 三戸美生, 中村 宏, 隈部 功: 原子力誌, **26**(2), 157 (1984).
- (3) 御所康七: 電学誌, **94-A**[8], 38 (1974).
- (4) RADEKA, V.: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-19**[1], 412 (1972).

〔付 録〕

本文中に示した伝達関数を求める。

(1) 微小電流増幅器

回路構成を Fig.A1 に示す。この回路は電離箱からの電荷 $Q(t)$ が帰還部 R , C の並列回路を流れ、その電圧降下が出力電圧 $V_o(t)$ となる。入力と出力との関係は次式のようにになる。

$$I(t) = -\frac{V_o(t)}{R} - C \frac{dV_o(t)}{dt}$$

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$$

これをラプラス変換すると次式のようになり、

$$I(s) = -\frac{V_o(s)}{R} - sC V_o(s)$$

$$I(s) = sQ(s)$$

伝達関数は次式のようにになる。

$$H(s) \equiv \frac{V_o(s)}{Q(s)} = -\frac{sR}{1+sCR} = -\frac{sR}{1+sT},$$

$$T = CR$$

Fig. A1 Small-current amplifier circuit

(2) 積分回路

回路構成をFig. A2に示す。この回路は入力電圧 $V_i(t)$ と R で決まる電流 $I(t)$ が帰還部の R と C の並列回路を流れ、その電圧降下が出力電圧 $V_o(t)$ となる。入力と出力との関係は次式のようになる。

$$I(t) = -\frac{V_o(t)}{R} - C \frac{dV_o(t)}{dt}$$

$$I(t) = \frac{V_i(t)}{R}$$

(1)項と同様に伝達関数を求めると次式のようになる。

$$H(s) \equiv \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{1}{1+sT}, \quad T=CR$$

Fig. A2 Integrating circuit

(3) 微分回路

回路構成をFig. A3に示す。この回路は入力電圧

$V_i(t)$ と C と R で決まる電流 $I(t)$ が帰還部の R を流れ、その電圧降下が出力電圧 $V_o(t)$ となる。入力と出力との関係は次式のようになる。

$$V_i(t) = \frac{1}{C} \int I(t) dt + RI(t)$$

$$V_o(t) = -I(t)R$$

(1)項と同様に伝達関数を求めると次式のようになる。

$$H(s) \equiv \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{sT}{1+sT}, \quad T=CR$$

Fig. A3 Differentiating circuit

(4) ゲイテッドインテグレイタ

回路構成をFig. A4に示す。この回路は(2)項の積分回路と同じように考えることができる。よってこの回路の伝達関数は次式のようになる。

$$H(s) \equiv \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{1}{1+sT}, \quad T=CR$$

Fig. A4 Gated integrator

○第4回 ESR 応用計測研究発表会○

主催 ESR応用計測研究会、協賛 本会ほか

日時 1989年6月30日(金) 9:30~17:30

場所 大阪大学理学部物理学科(豊中市待兼山町1-1)

発表テーマ ESR年代測定の紹介、海洋の化石、火山灰と地熱、断層、化石骨、線量測定、古文化財、ESR画像処理、ESR顕微鏡など新しい装置の開発

今回は通常の研究発表会に加えて、フィッシュン・トラップ(FT)および熱ルミネッセンス(TL)研究者にも呼びかけ、「放射線地殻物性、FTとTLとの接点」ミニシンポジウムを企画し、共通のテーマ「照射効果物性」をも議論することを検討中です。(ESR顕微鏡を公開します)

講演申込締切 1989年5月26日(タイトルのみ)

予稿原稿締切 1989年6月14日 必着

懇親会 当日、大学近くのニュージランドハウスにて(会費4,000円)

問合せ・申込先 (〒560)豊中市待兼山町1-1
大阪大学理学部物理学科 池谷元何
(06-844-1151, 内線 4168)

Chemical Abstracts 抄録員を求む

日本語の論文をC.A.用に英文抄録して下さる方を募集します。経歴は問いませんが簡単なテストをします。今回は下記の分野での抄録員を募集します。

核化学、光・スペクトル・レーザー、量子化学、計算機化学

連絡先 (〒113)東京都文京区弥生2-4-16 学会センタービル

化学情報協会 CASインプットセンター

担当 佐藤 (03-816-3574)