

## O-5-05

固体フォトンカウンティングモジュールの使い方の工夫  
A device of usage of Solid-state Photoncounting Module  
中島一光  
Kazumitsu Nakajima  
中島一光技術士事務所  
NakajimaKazumitsu's Professional Engineer Office

Abstract: An solid-state photoncounting-module has an advantage to high photon-dedection probability, but there are the disadvantages that small detection diameters and low count-rate and much dark noise count. I describe the result that devised to eliminating disadvantages, in order to use for laser radar detector .

固体フォトンカウンティングモジュールには以下に述べるような利点がある反面、幾つかの問題点もありレーザレーダ等に使用するのに躊躇することもある。メーカー在職中にモジュールを用いた装置を試作し各種試験を行った。その際に生じた問題点を把握した上で利点を生かすべく工夫し、特許とした。これらを中心に使い方に関する工夫を披瀝し参考に供したい。

1. 固体フォトンカウンティングモジュールの利点
  - ・ 量子効率（光子検知確率）が高い（特に  $1\ \mu\text{m}$  前後の長波長で）
  - ・ 小型かつ電源も簡単である（高電圧を使用しない）
  - ・ 比較的強い光入力に対しても破損し難い
2. 固体フォトンカウンティングモジュールの問題点
  - ・ 受光面積（径）が小さい（最大  $\phi\ 500\ \mu\text{m}$  程度 実効径約  $450\ \mu\text{m}$ ）
  - ・ カウントレートを大きくし難い（ $10\text{Mc}/\text{s}$  程度）  
PMTフォトンカウンティングでは  $100\text{Mc}/\text{s}$  程度
  - ・ ノイズ（誤カウント）が大きい（ $1000\text{c}/\text{s}$ ）
3. レーザレーダ等にとってこの問題点はどのような影響があるのか
  - ・ 受光径が小さいと大口径の受信系（焦点距離も長くなる）では受光視野が限定される。焦点距離  $1\text{m}$  で  $1\text{mrad}$  の視野を得るには  $\phi\ 1\text{mm}$  が必要となり、実現し難い。
  - ・ カウントレートに相当する光強度以上のものが入るとフォトンカウント誤差が増える。光子検出レベルでは等間隔で光が到来する訳でなく、間隔がランダムとなり  $10\%$  の検知ミスを許容した場合  $1\text{Mc}/\text{s}$  即ち  $1\ \mu\text{s}$  あたり  $1$  光電子に相当する入力が限度
  - ・ 最大カウントレートに比してノイズは小さいのであまり積算しない場合の影響は少ないと考えられるが、長時間積算の必要があるものでは無視できない。長距離測距で光子を検知してストップパルスを得ようとする際には誤測距の原因となる。
4. 受光面積不足を解消し実効的にカウントレート向上させる工夫（特許第 2658843 号参照）

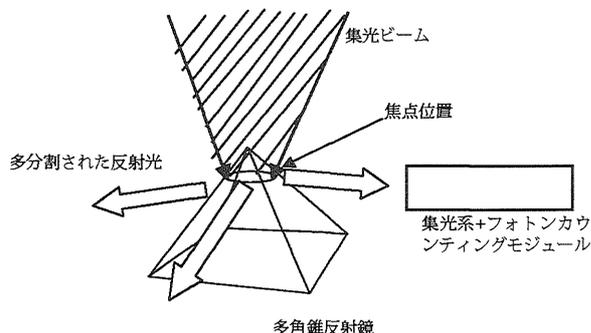


Fig1-1 Beam splitting by pyramid mirror

Fig1-1（説明図） Fig1-2（平面図）に示すように望遠鏡等の集光系の焦点面に多角錐型の反射鏡を置き、集めた光を分割してそれぞれを別のフォトンカウンティングモジュールで受光しカウントする。焦点面でのビーム径はモジュールの有効径より大きくても分割された光を集光したものはより小さくできる。

集光したビームがより大きい場合、Fig1-3に

示すような多面体反射鏡を利用することも考えられる。

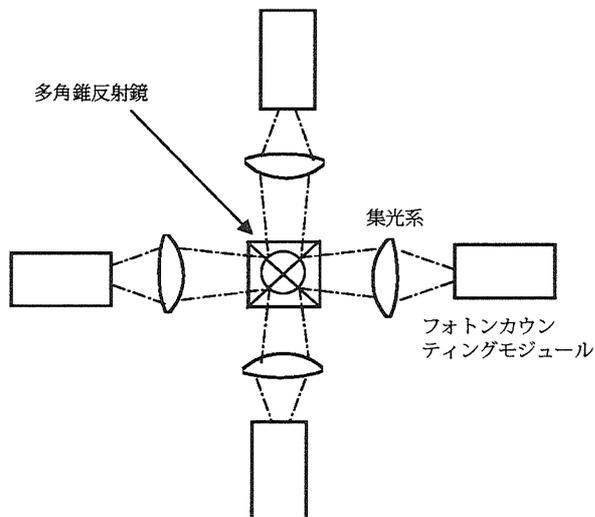


Fig1-2 Beam splitting by pyramid mirror

この方式の特徴は光束径とモジュールの有効径の問題を解決する以外に固体光子カウンティングモジュールのカウンレートの問題点もカバーすることである。Fig1-4 に示すように光子の到来（積算されてメモリに格納されるものに対応）が時には一つのモジュールでは対応できないほどの短い間隔であっても、別のモジュールに光子が到来する限りはそれぞれで検知されその出力パルスが積算カウントされるので、より強い光（高いカウンレート）に対応することができる。（当然のことながらノイズカウントも積算されるがこれは最大カウンレートに比して小さい）

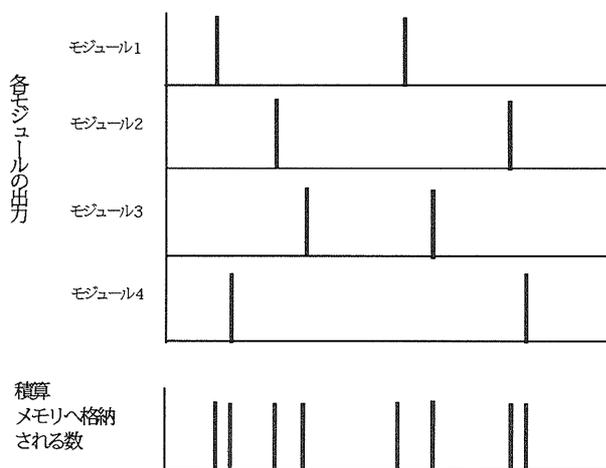


Fig1-4 Photoncounting Module output pulse

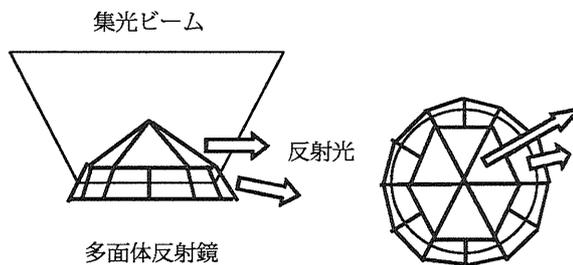


Fig1-3 Beam splitting by polyhedron mirror

この方式の特徴は光束径とモジュールの有効径の問題を解決する以外に固体光子カウンティングモジュールのカウンレートの問題点もカバーすることである。Fig1-4 に示すように光子の到来（積算されてメモリに格納されるものに対応）が時には一つのモジュールでは対応できないほどの短い間隔であっても、別のモジュールに光子が到来する限りはそれぞれで検知されその出力パルスが積算カウントされるので、より強い光（高いカウンレート）に対応することができる。（当然のことながらノイズカウントも積算されるがこれは最大カウンレートに比して小さい）

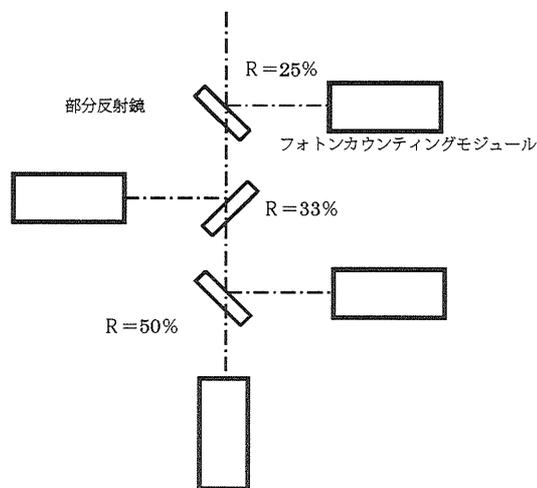


Fig1-5 Beam splitting by partial reflection mirror

受信視野を大きなものとするのは、送光ビームの拡がり角に対応するという面もあるが、それ以上に送受のミスアライメント（温度・振動によるズレの許容を含む）や送受の軸を離れたことによる高度に応じた集光点位置の移動も考慮しているためである。その場合は瞬時の集光ビームの大きさは小さく、かつその位置が時間（高度に対応した戻り光）と共に若干移動するので、ある時間で考えると多角錐反射鏡のどれかの面に当たって一つのモジュールの方向に反射されるのみである。

従って多数のモジュールで光を受けることによりカウンレートを向上させるという効果を期待することはできなくなる。カウンレートの向上のために多数のモジュールを用いるのを主目的にするなら Fig1-5 のように部分反射鏡で光を分割せざるを得ない。この場合、幾つかの光子が到来したものが反射率に応じた比で分割されて各モジュールに到達するという考え方ではなく、

「離散的に到来した単一の光子が何れかのミラーで反射または透過して、何れかのモジュールで検

出される。この検出の頻度？が反射率に対応している」と考える必要がある。

5. システムのダイナミックレンジを拡大する方法 (特許第 2820095 号参照)

衛星から大気を観測する場合、Fig2-1 に示すように大気および雲からの散乱光受光レベルは数桁の違いがあり、上空からの散乱光の受光レベルはフォトンカウンティングで計測するレベルであるが、低い高度からの散乱光の受光レベルは強すぎ飽和してしまう。また巻雲等からの反射光はアナログ計測が相応しいレベルとなる。

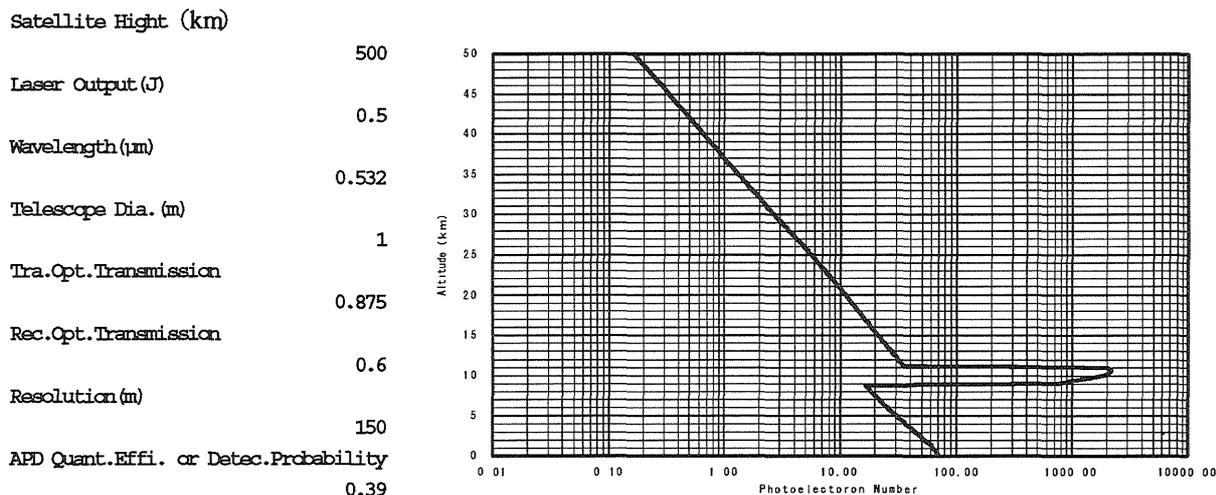


Fig2-1 Spaceborne lidar detection level

受信光を大きく異なるレベルの2つに分けて2つのフォトンカウンティングモジュールで計測する方法は受光レベルをそれほど落とさず、ダイナミックレンジを広げるためによく用いられている。しかしこれにアナログ計測を追加するとなると受信光を2分割せねばならずレベルを半分以下に下げかつ別の光検出器も必要となるので、Fig2-2 に示す構成とすることにより解決した。

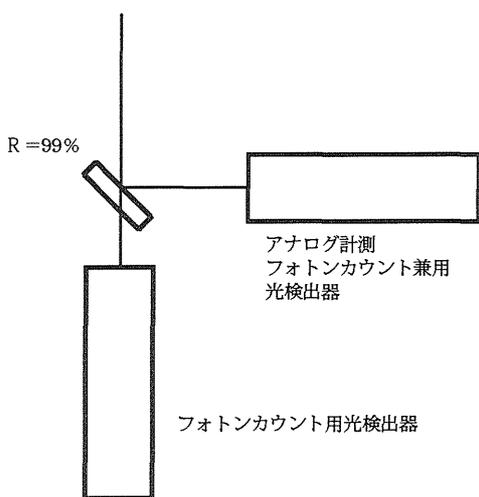


Fig2-2 Expansion of detection dynamic-range

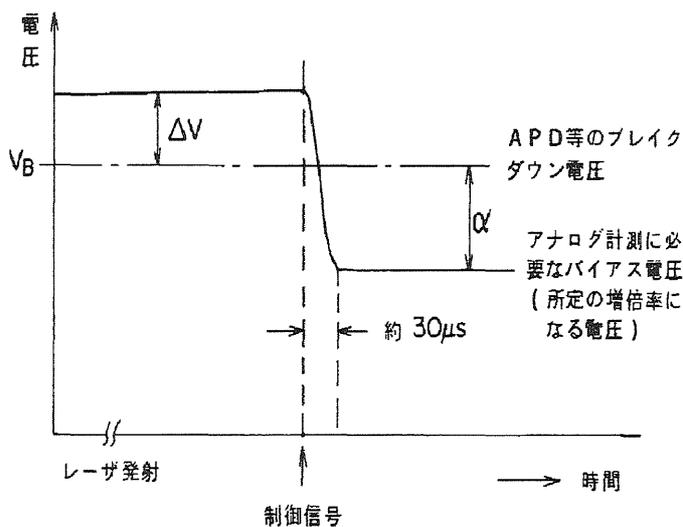
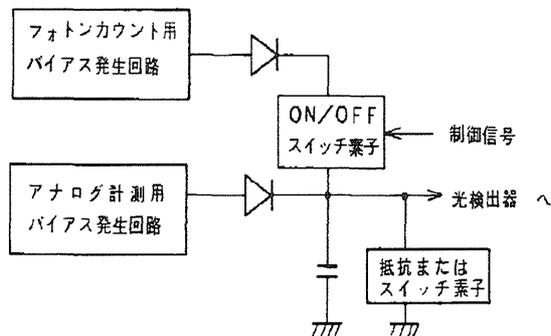


Fig2-3 Voltage change image (photoncount to analog-measurement)

最初に上空からの散乱光を 99%反射させた側にある兼用検出器をフォトンカウントモードで使用して検出する。低い高度からの散乱光が到達し始めると兼用検出器は徐々にカウント数が増えると共にミスカウントも増えてくる。一方 1%透過した光を検出するフォトンカウント (専用) 検出器で適当なカウント数の出力が得られるので、ある高度を境にこちらの検出器の出力を信号として利用する。その時点で兼用検出器の印加電圧をアナログ計測に必要なレベルまで下げる。過渡時



間を  $30 \mu\text{s}$  ( $4.5\text{km}$  の高度に相当) 程度で所定の電圧にすることが可能とされている。従って  $1\%$  透過した側の専用検出器が飽和する以前にアナログ計測が可能となり、両者が並存して使用できる。途中で巻雲等があり強い反射光が到来して光子カウント側は飽和してもアナログ側で検知しているためデータとしては完結する。印加電圧を急変させる回路はメーカーのノウハウとのことで知ることは出来なかったが Fig2-4 のような考えの回路で実現できると考えられる。

Fig2-4 Voltage change method (photoncount to analog-measurement)

## 6. 超長距離測距への応用 (特許第 2765530 号参照)

$100\text{ km}$  を越すような超長距離の測距では光検出器の検出レベル限界 (ノイズレベルの  $10$  倍程度) 以下の受光レベルとなり、アナログ方式ではストップパルスを得ることができない。光子カウンティングモジュールを使用してストップパルスを得ることが考えられる。入力は数十光子以上あるのでミスすることはなく、また最初の光子で  $1$  発のパルスを出せばよいので、到来光子数が多くても問題とはならない。しかしながら、ノイズ (誤カウント) によって測距のストップ回路が誤動作する。仮に  $1000\text{ cps}$  としても平均して  $1\text{ ms}$  ( $150\text{ km}$  相当) に  $1$  パルスのノイズは避けられない。実際にはランダムにノイズが発生するので  $100\text{ km}$  以上の測距ではノイズか信号かの識別ができないことになる。 Fig3-1 に示すように到来光を  $3$  以上に分け各々を

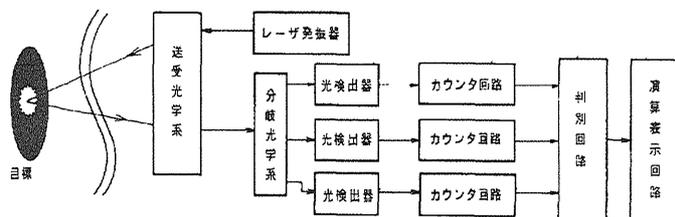


Fig3-1 Ultra long distance measurement method

光子カウンティングモジュールにて検出する。検出パルスを AND 回路に導き、 $2$  個以上の検出器出力が一致した時のみ測距用のストップパルスを出すことにより解決することができる。光が戻ってくる以前にどの検出器もノイズを出す可能性もあるが、カウントレート  $10\text{ Mcps}$  のモジュールは  $100\text{ ns}$  で回復するので  $2$  個以上が同時に ( $100\text{ ns}$  以下のズレで) ノイズを出す可能性はほとんど無い。

## 7. まとめ

$500\ \mu\text{m}$  径の光子カウンティングモジュールを前提としたもので纏めかけていた矢先、展示会で今まで試験してきたメーカーの製品が製造中止になったことを知った。ノイズが多く需要も少なかったので  $180\ \mu\text{m}$  径のもののみとしたとのことである。別のメーカーでは  $500\ \mu\text{m}$  タイプのものが作られているが光子検知確率が若干低いこと、特に Nd:YAG レーザ ( $1064\text{ nm}$ ) 波長で  $1\%$  程度 (限界波長の公称値は  $1060\text{ nm}$ ) であり、またノイズも  $5000\text{ c/s}$  になるとのことであり、今後改めて評価し直す必要があると考えられる。かつてはレーザーレーダに十分利用可能と考えられた固体光子カウンティングモジュールも現在のカタログでは当初の性能に比して劣るものが記されており、製造上の問題 (歩留まり等?) のことであるが不安を残している。

他の分野では固体化の趨勢であるが、微弱光検出の分野に関しては固体化の流れが逆行したため光電子増倍管出番がまだまだ続くように感じられた。

(なかじま かずみつ kazumitu@basil.ocn.ne.jp <http://www1.ocn.ne.jp/~kazumitu/>)