

魚体反射率測定における同時較正法

誌名	水産工学研究所報告
ISSN	03889718
著者	宮野鼻, 洋一 石井, 憲 古沢, 昌彦
巻/号	3号
掲載ページ	p. 187-193
発行年月	1982年3月

魚体反射率測定における同時較正法

宮野鼻洋一*・石井 憲*・古沢昌彦*

目 次

1. はじめに	187	4.3 送受信系統	191
2. 反射率測定の際の較正方法の検討	187	5. 検証実験	191
3. 同時較正法の原理及び特徴	188	6. おわりに	191
4. 同時較正法の問題点の検討	189	参考文献	192
4.1 ハイドロホンの指向性	189	Summary	193
4.2 ハイドロホンと反射体との距離	189		

1. はじめに

水産資源を合理的に活用しようとした場合、まずその質的量的な把握が必要となる。そのため、従来より漁獲統計の解析、標識放流、卵稚仔魚調査等の方法によって水産資源調査が行われてきた。しかしながらこれらの方法には多大の時間と労力を要し、しかも間接的な結果しか得られないという欠点がある。

これに対し、近年、魚群探知機等の超音波機器を用いた資源調査方法が直接性、迅速性、確度等の点で注目されるようになった。この音響による資源調査方法には種々の方式がある¹⁾。

このうち、現在主流となっている魚量または資源量推定の方法は、魚群のエコーのパワーをアナログ的に処理する積分方式である²⁾。この方式によって得られるのは魚体反射率（ターゲットストレングス）と分布密度の積、即ち体積散乱強度である。したがって魚体反射率があらかじめわかっていなければ、分布密度を求めることはできない。

また体長推定に関しては、反射率方式³⁾が実用化されつつあるが、この方式では対象魚群のエコーから単体エコーを分離し、この大きさから反射率を測定し、反射率と体長との関係から体長を推定する。したがって、この場合にも魚体反射率を体長の関数として予め知っておかねばならない。

反射率の測定については従来より数多くの報告があるが、それらについて整理した Love (1971) によると、同一体長及び周波数に対する反射率が一桁以上も異なる場

合がある³⁾。また筆者らもこれまでに簡単な方法で反射率を測定してきたが、測定結果にかなり大きな変動が出ることが多い。これらのことは反射率測定方法自体にも問題が多く、その確立が急務であることを示している。

そこで筆者らは従来の測定方法を検討し、改良を加えることによって、反射率測定の確度向上をはかりつつある。今回は主として送受信系の較正方法について改善し、較正誤差の少ない同時較正法を考案し、検討を加えたので報告する。

2. 反射率測定の際の較正方法の検討

反射率の測定は一般に図1のようにして行われる。送信パルスの振幅を E_s 、送波器の感度（送波感度）を S 、反射体と送受波面との距離を r 、反射体の音圧反射率を γ 、受波器の感度（受波感度）を M 、受信器の増幅度を

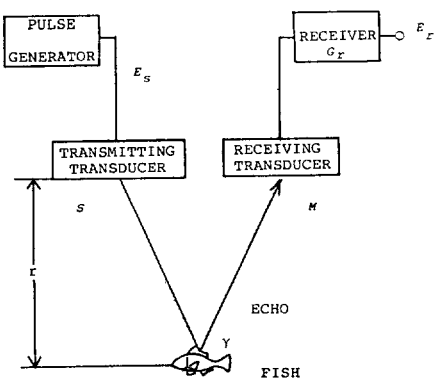


図1 一般的な反射率測定方法

Usual method for target strength measurement

* 漁船工学部

G_r とすると、近距離を対象とするため吸収減衰を無視することができるのでエコーパルスの振幅 E_r は次式となる。

$$E_r = E_s S \frac{1}{r} \gamma \frac{1}{r} M G_r$$

$$\gamma = \frac{1}{E_s S M G_r} r^2 E_r \dots\dots\dots (1)$$

(1)式の分母(送受信係数)は反射率測定前に予め較正しておく必要がある。従来行われてきた較正方法には大別して以下の4方法がある。

- ① 送波器と受波器とを対向させ、送受信係数を測定する(送受対向法)。
- ② 較正済みのハイドロホンまたは送受波器によって較正する(標準ハイドロホン法)。
- ③ 標準反射体によって較正する(置換法⁴⁾)。
- ④ 直接波音場と反射波音場とを受波器を反転させて測定し、送受信係数を得る(スライド法⁴⁾)。

ところで、反射率に寄与する環境要因として水温、塩分濃度、海水密度、気泡、濁度等が考えられるが、これらは反射率に寄与すると同時に、送受信係数にも影響を与えると考えられる。図2は昭和55年11月に鹿児島県の長島で、150mmφの標準反射体の反射波レベルを観測した結果である。この測定は上記の③の置換法に相当する方法で行ったもので、周波数50kHzの送受波器を使用した。が、海中の気泡等の影響によって反射波レベルの測

定値は大きく変動することがわかる。なお、図中*印をつけた異常値は送波面に付着した気泡によるもので、送波面を洗浄したところ解消した。

このような現象がある限り、予め送受信係数を測定し較正を済ませていても、時間が経過し、環境要因が変動すれば、較正をやりなおさなければならないことになる。したがって、較正と同時に反射率を測定しなければ、正確な測定はできない。しかし、上に述べたような方法で較正を行う限り較正と測定とが別個に行われるので、較正と測定との間に時間的ずれが生じ、この時間的ずれが送受信系の較正上の誤差を生み、反射率測定の高さを低いものにしてしまうと考えられる。

3. 同時較正法の原理及び特徴

以上のことから反射率測定において環境要因や送受波感度などの変動を受けないようにするには、較正と測定を極力同時に行う必要がある。そのためには、各送信パルス毎に直接波と反射波とをとらえれば良い。図3にこれを可能にする同時較正法の原理を示した。すなわち送波器と反射体との中間に小型無指向性ハイドロホンを設置し、これによって直接波と反射波とを観測する。

ここで送波器からハイドロホンまでの距離を r_h 、送波器から反射体までの距離を r_r 、送信時から直接波の立ち上がりまでの時間を t_d 、同様に反射波の立ち上がりまでの時

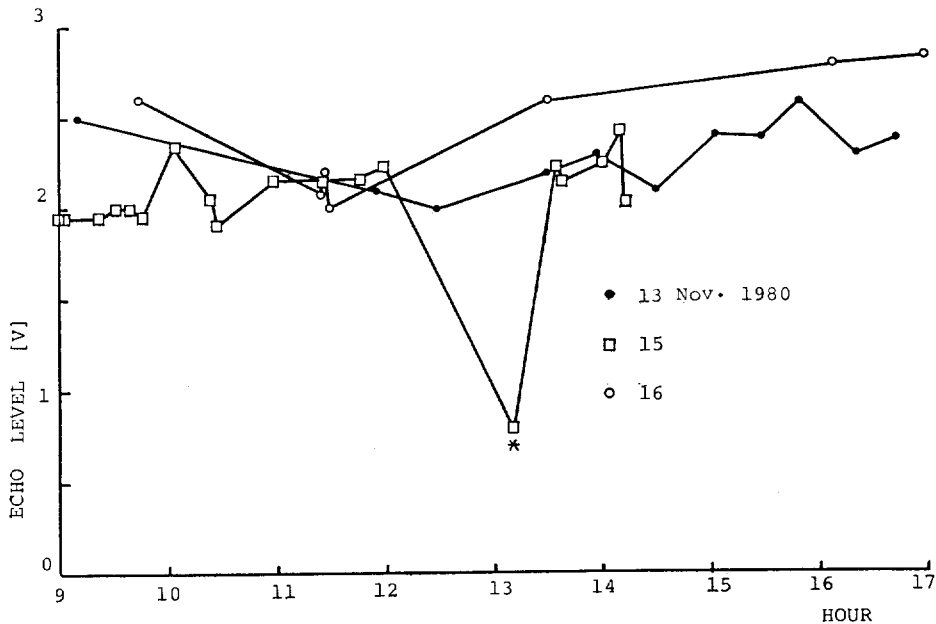


図2 標準反射体の反射波レベルの変動
Fluctuation of the echo level of a solid sphere

間を t_r 、送波音圧を p_0 、反射体の反射率を γ 、音速を c 、直接波に対するハイドロホン感度を M_d 、反射波に対するハイドロホン感度を M_r 、直接波に対する受信器ゲインを G_d 、反射波に対する受信器ゲインを G_r 、直接波の出力電圧を E_d 、反射波の出力電圧を E_r とすると以下の式が成立する。

$$E_d = p_0 \frac{1}{r_h} M_d G_d \dots\dots\dots (2)$$

$$E_r = p_0 \frac{1}{r_r} \gamma \frac{1}{r_r - r_h} M_r G_r \dots\dots\dots (3)$$

$$\therefore \gamma = \frac{G_d}{G_r} \frac{M_d}{M_r} \frac{r_r(r_r - r_h)}{r_h} \frac{E_r}{E_d} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{r_r(r_r - r_h)}{r_h} = \frac{c(t_r^2 - t_d^2)}{4t_d}$$

直接波及び反射波が同一の受信系で増幅される場合には、その直線範囲が広い限り、 $G_d/G_r=1$ である。

また M_d/M_r はハイドロホンの直接波側と反射波側との (180°異なる方向の) 感度比であり、予め較正を必要とするが、超小型、無指向性のハイドロホンを使用すれば、 $M_d/M_r=1$ となり、この較正の誤差はごくわずかである。したがって予め r_r 、 r_h または t_d 、 t_r を測定しておけば、 E_r 、 E_d から反射率 γ を計算することができる。

この同時較正法の長所は以下の通りである。

- ① 直接波と反射波を、同一送信波に対して同時に測定するのであるから、較正する必要がなく、較正の手間・時間が省略できる。
- ② 気泡等による送波レベルの変化、軽微な吸収減衰、受波感度の変化などによる較正上の誤差の影響を受けにくい。
- ③ 送波器、ハイドロホン、反射体が同一直線上に有

れば、送波器の揺れ (指向性) の影響がない。

- ④ 送波レベルの変動が同時にモニターできる。一方、以下のような問題点がある。
 - ⑤ 小型・無指向性のハイドロホンを必要とする。
 - ⑥ 送受信系の Q 、反射体の近距離音場、 E_r/E_d などの値を考慮してハイドロホンや反射体の設置位置を慎重に決定する必要がある。
 - ⑦ 受信系のダイナミックレンジを広くし、雑音を十分小さくする必要がある。
- 以下これらの問題点について検討を行う。

4. 同時較正法の問題点の検討

4.1 ハイドロホンの指向性

この測定に用いるハイドロホンは180°異なる方向の感度がほぼ同じであり、ハイドロホンが反射体への入射音波の邪魔にならないよう小型である必要がある。このような条件を満たすハイドロホン (Brüel & Kjaer製, TYPE 8103, 9.5mmφ) の指向特性から得た 180°異なる方向の感度比 (M_d/M_r) の値を、指向特性測定の際の基準方向からの角度 θ に対して示したのが図4である。この図に従うと、 θ を50°または150°付近に選べば25~200kHzの周波数について測定する場合でも $M_d/M_r=1$ となり、較正誤差をごくわずかにすることができる。

4.2 ハイドロホンと反射体との距離

同時較正法では受波器が無指向性であるため、一般にSN比が低下する。そこでSN比を向上させるには(3)式より明らかにようにハイドロホンと反射体の距離 (r_r -

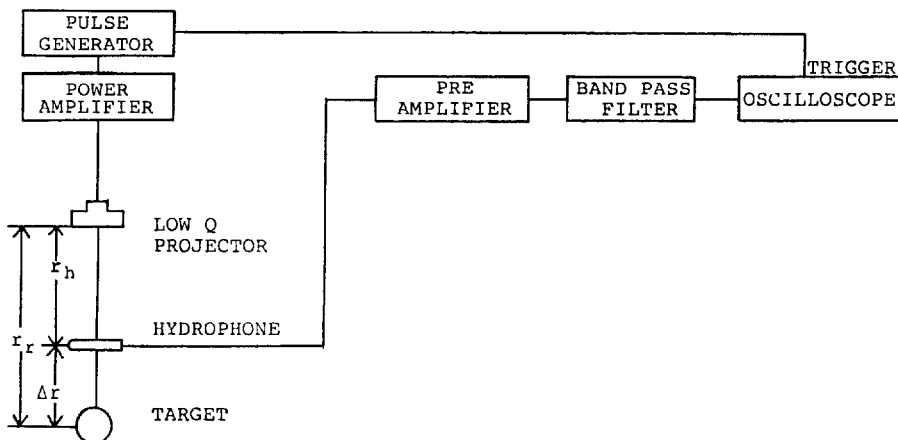


図 3 同時較正法の原理

Principle of simultaneous calibration method in target strength measurement

r_h を小さくして、反射波レベルを大きくする必要がある。しかし、これをあまり小さくしすぎると、レベルの大きな直接波の裾との干渉によって、反射波のレベルに誤差が生じる。そこでこの点について以下検討を加える。

一般に共振系のステップ応答のエンベロップは立ち上りからの時間を t_1 、共振周波数を f 、尖鋭度を Q で表すと以下ようになる。

$$1 - \exp\left(-\frac{\pi}{Q} f t_1\right)$$

また立ち下りからの時間を t_2 で表すと次式となる。

$$\exp\left(-\frac{\pi}{Q} f t_2\right) \dots\dots\dots (5)$$

直接波のレベルは、 τ をパルス幅とすると、送信時から $t_d + \tau$ 経過した時最大となり、その後(5)式に従って低下する。よって送信時から t_r 経過した時の直接波レベルは送受信係数を省略すれば以下のようなになる。

$$\frac{1}{r_h} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{Q} f \tau\right) \right\} \exp\left\{-\frac{\pi}{Q} f (t_r - t_d - \tau)\right\} \dots\dots\dots (6)$$

ところで、パルス幅を十分大きくとれば(6)式で $1 - \exp(-\pi f \tau / Q) \approx 1$ である。故に送信時から t_r 経過した時の直接波のレベルと反射波のレベル $\gamma / r_r \cdot (r_r - r_h)$ との比 η は次のようになる。

$$\eta = \frac{1}{\gamma} \frac{r_r (r_r - r_h)}{r_h} \exp\left\{-\frac{\pi f}{Q} \left\{ \frac{2(r_r - r_h)}{c} - \tau \right\}\right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここで τ を波形が最大値の α に達するパルス幅とすると、(7)式は以下のようなになる。

$$\eta \approx \frac{1}{\gamma} \frac{1}{1 - \alpha} \frac{r_r (r_r - r_h)}{r_h} \exp\left\{-\frac{2\pi f (r_r - r_h)}{c Q}\right\} \dots\dots\dots (8)$$

(8)式を具体化したのが図5である。例えば、周波数50kHzで、 η を1%とすると、 Q が30の場合には hidroホンと反射体との距離を2m以上離さなければならないが、 Q を3とすれば0.2mも離せば十分であり、SN比を

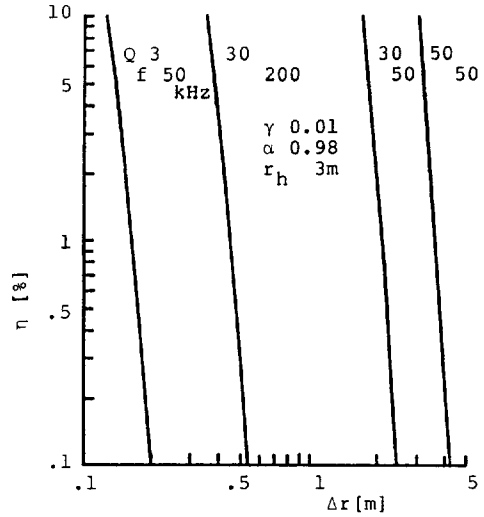


図5 直接波の裾のレベルと反射波のレベルとの比
Amplitude of direct wave trail normalized by amplitude of reflected wave

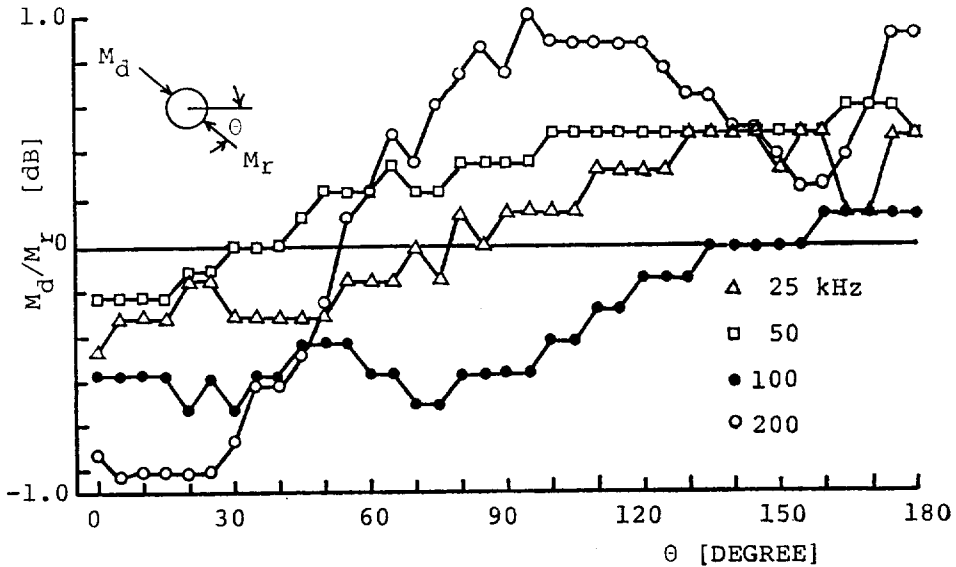


図4 使用 hidroホンの180°異なる方向の感度比 (M_d/M_r)
Ratio of sensitivities of a hydrophone when measured in opposite directions

向上させることができる。したがって周波数が低い場合には低 Q にする必要があることがわかる。低 Q にする場合には送波器を反射傘型にすれば良い。

4.3 送受信系統

送受信系で問題となるのは雑音, 入出力特性の直線性, レベルの読み取り等であり, 以下検討する。

受波器の無指向性に基く雑音は, 既に述べたように $r_r - r_h$ を小さくし, 静穏で雑音となる散乱体のないような環境を選ぶことにより, かなり改善できる。しかし低 Q にする必要があるため, その他の原因による雑音についても十分留意する必要がある。具体的には送波レベルを極力大きくして SN 比を上げ, 4.2 で述べた干渉による制限の許す限り帯域幅を狭め, さらに前置増幅器は低雑音のものを選べば良い。

直接波のレベルと反射波のレベルとはかなり大きく異なる。よって, この両者を同一受信系で増幅する場合, その増幅器の直線性を良くしなければならない。この際, 極力前段で両者のレベルを大体そろえておき, それ以後は同一系統で増幅すれば, 増幅度の変化や非直線性の影響を受けにくくなり, 同時法の長所を生かすことができる。

直接波, 反射波のレベルの読み取りをオシロスコープを用いて目測するのは, 非常に労力を要する上, 誤差が大きく, 又同時性を害う。したがって検波後のパルス波高の自動読み取りをするのが良い。

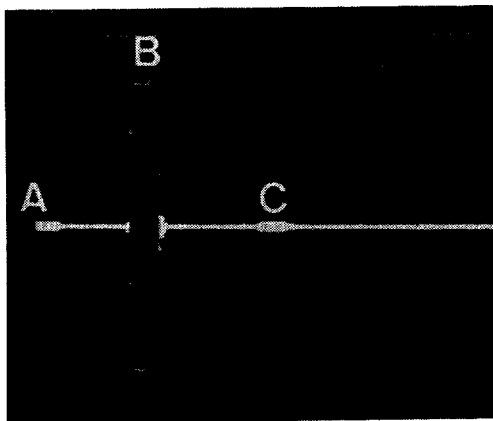


図 6 受信波形の例

An example of the direct wave (B) and reflected one (C) from a 150mm ϕ solid sphere. Vertical scale is 50mV/div. and horizontal scale is 0.5msec/div.

5. 検証実験

標準反射体として150mm ϕ アルミ剛球を用いて検証実験を行った。測定装置は図3の構成とし, ハイドロホン は図4の特性のもの, 周波数は50kHz, 送波器は低 Q にするため反射傘型のものを用いた。

この実験は鹿児島県, 長島で昭和55年11月に行った。図6は r_h を2.15m, r_r を3.10mとした時の受信波形の例である。図中, 縦軸1目盛は50mV, 横軸1目盛は0.5msecであり, Aは送信開始時点, Bは直接波, Cは反射波を示している。

この図を見ると, 低 Q であるために直接波の立ち上り, 立ち下り時間がきわめて短くなっていて, その裾の反射波に対する干渉はきわめて小さいことがわかる。

表 1 アルミ鋼球に対する測定結果
Measured target strength γ of a 150mm ϕ solid sphere

No.	E_d [mV _p]	E_r [mV _p]	γ	γ/γ_c [%]
1	115	3.25	.0387	103
2	118	3.75	.0437	117
3	108	3.50	.0446	119
4	103	3.00	.0401	107
5	104	3.20	.0421	112
6	104	3.25	.0428	114
7	105	3.40	.0444	118
mean			.0423	113

$$r_h = 2.15\text{m}, \Delta r = .95\text{m}, \gamma_c = .15/4 = .0375$$

表1に結果を示したが γ の各測定値 ((4)式参照), 及びそれと反射率の理論値 $\gamma_c = \text{直径}/4$ との比 γ/γ_c の各値, そしてその平均値を見ると, 今回の測定値はかなり理論値に合致していると言える。しかし, 測定値はすべて理論値より大きく, しかも同一の実験系を用いているにもかかわらず多数回行うと測定値が変動する傾向が認められた。これは主として目視誤差や雑音によると考えられる。

6. おわりに

同時較正法による反射率測定が有効であることは判明したが, 装置及び環境要因の変動に基くと思われる測定値の変動や経時変化については問題が残った。また, SN 比を向上させるためにハイドロホンと反射体とを近づけた場合に問題となる反射波の近距離音場についても検討する必要がある。

目下, 反射波を増幅した後, 直接波と同時に自動的に読み取り印字する装置を試作しており, これが完成すれ

ば測定も容易かつ正確に行えるものと思われる。

また、多周波について同様の測定を行えるようにし、それら一連の測定及び処理を計算機の制御の元で行えるシステムを開発中である。

さらに環境要因については、環境情報同時測定機能を上記システムに取り入れ、経過時間、DO、水温等が測定値にいかなる影響を及ぼすか検討していく予定である。

本研究の目的は魚体反射率の測定であり、今回はその測定法について検討を加えたが、今後はサンマ、サバ、イワシ等種々の有用魚種について、本法を用いて反射率を測定し、魚種、体長、体重等と反射率との関係についても考察していく予定である。

参考文献

- 1) 古沢昌彦：超音波利用による漁業資源調査, *Ocean Age*, Vol.13, No.1, pp.27~39, 1981.
- 2) 古沢昌彦・石井憲・間庭愛信：超音波漁量計の開発, *電子通信学会技報*, Vol.80, No.114, pp.1~8, 1980.
- 3) LOVE, R. H.: Dorsal-Aspect Target Strength of an Individual Fish, *Jor. Acoust. Soc. America*, Vol. 49, No.3, pp.816~823, 1971.
- 4) 間庭愛信：mm波超音波を応用した水中測器の開発に関する研究, *水産庁漁船研究室 研究報告第4号*, pp.1~137, 1962.

Simultaneous Calibration Method in Measurements of Target Strength of Fish

By

Yoichi MIYANOHANA, Ken ISHII, and Masahiko FURUSAWA

Summary

In order to estimate the fish biomass density or the size of the fish by acoustic means, the target strength of the fish must be measured beforehand. In this measurement transmitting and receiving devices should be calibrated. But calibrated values may vary with components in water (e. g. air bubbles), as time passes. So the calibration must be done as simultaneously as possible with the target strength measurement. Usual calibration methods, however, are so timeconsuming that the measurement is not simultaneous with the calibration.

Therefore the authors developed a simultaneous calibration method in target strength measurement. In this method a hydrophone is put between a projector and a target, and it receives both the direct wave and the reflected one. The target strength can be computed from the amplitude ratio of thus obtained two waves.

The merits of this method are as follows.

(1) As the calibration is simultaneous with the measurement, it does not require time and labor.

(2) Calibration errors are very slight.

(3) If a projector, a hydrophone, and a target are on a straight line, the directivity pattern of the projector need not to be considered.

(4) Every projected sound level can be always monitored.

On the other hand, restrictions of this method are as follows.

(5) It needs a small omnidirectional hydrophone.

(6) The distance from a projector to a hydrophone or to a target must be carefully determined, considering Q factor of the projector, the near field of the target, and the amplitude ratio of the direct wave and the reflected one.

These method were examined experimentally and some measurements were performed on a standard reflector.