



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	光ヘテロダイン検波における0型進行波光電管の方向特性
Author(s)	桜庭, 一郎; Sakuraba, Ichiro; 千田, 博之 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 44, 59-66
Issue Date	1967-09-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40841
Type	departmental bulletin paper
File Information	44_59-66.pdf



光ヘテロダイン検波におけるO型 進行波光電管の方向特性

桜庭 一郎*

千田 博之*

(昭和42年5月8日受理)

Directivity of Linear-Photoelectron-Beam Systems in Optical Heterodyne Detection Processes

Ichiro SAKURABA

Hiroyuki CHIDA

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering,
Hokkaido University, Sapporo, Japan.

(Received May 8, 1967)

Abstract

This paper deals with the directivity characteristics of linear-photoelectron-beam systems in an optical heterodyne process.

The equivalent resistance of systems with directivity included was given by

$$R'_{\text{eq}} = D^2(\theta_1, \theta_2) R_{\text{eq}},$$

where $D(\theta_1, \theta_2)$ is the directivity factor and R_{eq} is the equivalent resistance. When two incident light waves are plane waves with wave vectors which form angles θ_1 and θ_2 with the photosurface, the directivity factor is given by

$$D^2(\theta_1, \theta_2) = (\sin \Delta k \cdot d / \Delta k \cdot d)^2,$$

where $\Delta k = (1/2)(k_1 \sin \theta_1 - k_2 \sin \theta_2)$ and the photosurface is a strip with a width d .

In the case of non-parallel light beams, the required condition for negligible reduction, $D^2(\theta_1, \theta_2) \geq 0.5$, is

$$\delta\theta \leq \lambda_1/2d.$$

Because the photosurface dimension is generally much larger than an optical wavelength λ_1 , this is a very severe angle limitation.

In exactly parallel beams, the angle at which they are incident upon the photosurface is not important.

目 次

Abstract	59
1. 緒 言	60

* 電子工学科電子管工学講座

2. 一般的考察	60
3. O型進行波光電管の等価抵抗と方向係数	63
4. 結 言	64
附 録	64
参 考 文 献	66

1. 緒 言

レーザの発明以来、光混合現象の研究が盛んであり、その応用例の一つとして光ヘテロダイン検波方式が注目されている。とくに雑音指数を理想的光増幅器のそれに近づけ得ることから、理論的および実験的な検討がなされている^{1),2),3)}。この受信方式の素子としては、信号周波数成分の広帯域増幅可能さらに現在ほぼ完成されている進行波管の技術が利用出来るなどの点から、O型進行波光電管が実用されつつある^{4),5),6)}。

さてこの光ヘテロダイン検波方式を実用化するにあたって方向特性が問題であると Siegman らによって指摘されているが、定量的な結果は与えられていない⁷⁾。ついで方向性に関する一般的な議論が Corcoran によってなされたが、検波素子との関係については議論されていない⁸⁾。著者はこれらとは全く独立に光ヘテロダイン検波における光電陰極の方向特性が、O型進行波光電管の検波能力にいかなる影響を及ぼすかを検討していたが⁹⁾、最も簡単な場合について解析し有用な結果を得たのでここに報告する。

2. 一般的考察

二つの入射平面波が $x-z$ 平面に直角におかれた平らな光電面 A に入射角がそれぞれ θ_1, θ_2 をもった場合について考察する。いま光電面が x 方向に幅 d をもち、 y 方向に一様と考え、両波が同じ極性をもつとすれば、任意の点 (x, y) における電界は (Fig. 1 参照)

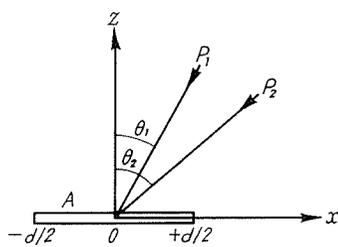


Fig. 1. Geometry for evaluating the directivity properties.

$$\bar{E}_1 = E_1 \cos(2\pi\nu_1 t - k_1 z \cos \theta_1 - k_1 x \sin \theta_1 + \phi_1), \quad (1)$$

$$\bar{E}_2 = E_2 \cos(2\pi\nu_2 t - k_2 z \cos \theta_2 - k_2 x \sin \theta_2 + \phi_2). \quad (2)$$

ここで k_1 と k_2 は各波の位相定数であり

$$k_1 = \frac{2\pi\nu_1}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_1}, \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{2\pi\nu_2}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_2}. \quad (4)$$

また ν_1, ν_2 は各波の周波数、 λ_1, λ_2 は各波の波長、 c は光速である。さらに ϕ_1, ϕ_2 は光電面の中央における位相である。いま図に示したように、光電面を $z=0$ 面上におきその中心を $x=0$ とすれば、式 (1) と (2) は、

$$\bar{E}_1 = E_1 \cos(2\pi\nu_1 t - k_1 x \sin \theta_1 + \phi_1), \quad (5)$$

$$\bar{E}_2 = E_2 \cos(2\pi\nu_2 t - k_2 x \sin \theta_2 + \phi_2). \quad (6)$$

となる。

光電面の出力電流は、各点における合成電界の平方に比例し、全面積について積分したものを微小時間にわたって平均したものであるから、光電子流 $i(t)$ は

$$i(t) \propto \frac{1}{A} \int \langle E^2(t) \rangle dA, \quad (7)$$

となる。ここで A は光電面の面積であり、括弧 $\langle \rangle$ はある時間 τ にわたる時間平均値を示す。 τ は

$$\tau \gg \nu_1^{-1}, \quad \nu_2^{-1}, \quad (8)$$

$$\tau \ll (\nu_2 - \nu_1)^{-1} = f^{-1} = 2\pi/\omega. \quad (9)$$

を満すを要する。式 (5), (6) および (7) から

$$\begin{aligned} \frac{1}{A} \int \langle E^2 \rangle dA &= \frac{1}{2} E_1^2 + \frac{1}{2} E_2^2 \\ &+ E_1 E_2 \cos(\omega t + \phi_2 - \phi_1) \frac{1}{A} \int \cos(k_1 \sin \theta_1 - k_2 \sin \theta_2) x dA \\ &- E_1 E_2 \sin(\omega t + \phi_2 - \phi_1) \frac{1}{A} \int \sin(k_1 \sin \theta_1 - k_2 \sin \theta_2) x dA \\ &+ \frac{1}{A} \int \left\langle \frac{1}{2} E_1^2 \cos 2(2\pi \nu_1 t - k_1 x \sin \theta_1 + \phi_1) \right\rangle dA \\ &+ \frac{1}{A} \int \left\langle \frac{1}{2} E_2^2 \cos 2(2\pi \nu_2 t - k_2 x \sin \theta_2 + \phi_2) \right\rangle dA \\ &+ \frac{1}{A} \int \langle E_1 E_2 \cos [2\pi(\nu_1 + \nu_2)t - (k_1 \sin \theta_1 + k_2 \sin \theta_2)x + \phi_1 + \phi_2] \rangle dA. \quad (10) \end{aligned}$$

上式の第一と第二項は直流分であり、第三項は $\tau \ll f^{-1}$ と仮定して差の周波数つまり光混合の項である。第四項は原点を陰極の中央にとれば消滅する項であり、第五、第六および第七項は光の周波数をもつ成分である。(おわりの三つの項は、マイクロ波電子管の現在の技術上検出出来ない)

光波による入力 $P(t)$ は $E^2/2$ に比例するから、

$$P(t) = P_{01} + P_{02} + D(\theta_1, \theta_2) 2\sqrt{P_{01}P_{02}} \cos(\omega t + \phi_2 - \phi_1). \quad (11)$$

$$\text{ここで} \quad \omega = 2\pi(\nu_2 - \nu_1), \quad (12)$$

$$D(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{A} \int \cos(k_1 \sin \theta_1 - k_2 \sin \theta_2) x dA, \quad (13)$$

であり $D(\theta_1, \theta_2)$ は θ_1 と θ_2 とに関係する方向係数である。光電面の responsivity ρ は

$$\rho = \frac{\eta e}{h\nu}. \quad (14)$$

与えられる。ここで η は量子効率、 $h\nu$ は一光子のもつエネルギー、 e は光電子の電荷である ($e > 0$)。それ故光電子流 $i(t)$ は

$$\begin{aligned}
 i(t) &= \rho(P_{01} + P_{02}) + D(\theta_1, \theta_2) 2\rho\sqrt{P_{01}P_{02}} \cos(\omega t + \phi_2 - \phi_1) \\
 &= I_{01} + I_{02} + D(\theta_1, \theta_2) 2\sqrt{I_{01}I_{02}} \cos(\omega t + \phi_2 - \phi_1),
 \end{aligned} \tag{15}$$

ここで

$$I_{01} = \rho P_{01}, \quad I_{02} = \rho P_{02}. \tag{16}$$

さて Fig. 1 に示したように光電面が x 方向に幅 d をもち、 y 方向に一様であるようなストリップ状であるとすれば、方向係数 $D(\theta_1, \theta_2)$ は

$$\begin{aligned}
 D(\theta_1, \theta_2) &= \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{+d/2} \cos(k_1 \sin \theta_1 - k_2 \sin \theta_2) x dx \\
 &= \sin \Delta k \cdot d / \Delta k \cdot d,
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\text{ここで } \Delta k = \frac{1}{2}(k_1 \sin \theta_1 - k_2 \sin \theta_2). \tag{18}$$

出力半値幅を考えると $D(\theta_1, \theta_2) \geq (1/\sqrt{2})$ であるから $\Delta k \cdot d \leq \pi/2$ となる。いま簡単な例をいくつか考察しよう。

二つの光波が完全に平行であり、かつ光電面に対して入射角 θ で入射する場合、つまり $\theta_1 = \theta_2 = \theta \neq 0$ のとき

$$\Delta k \cdot d \approx \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta, \tag{19}$$

ここで λ は差周波数の波長である。故に出力半値幅に対しては

$$\lambda \geq 2d \sin \theta, \tag{20}$$

の条件が得られる。それ故マイクロ波帯では常に満足され実用上問題とならない。すなわち二つの平面波が完全に平行であるなら、それらの光電面に対する入射角は方向性の点で問題とならない。

つぎに二つの光波がほぼ平行に θ 方向より到来するとすれば、 $\theta_1 = \theta + \delta\theta$ 、 $\theta_2 = \theta$ とおいて

$$\Delta k \cdot d \approx \frac{\pi d \cos \theta}{\lambda_1} \delta\theta, \tag{21}$$

出力半値幅について

$$\delta\theta \leq \frac{\lambda_1}{2d \cos \theta}. \tag{22}$$

となる。いま両波が光電面に直角であるが、完全に平行でないとき、つまり $\theta = 0$ のときは

$$\Delta k \cdot d \approx \frac{\pi d}{\lambda_1} \delta\theta. \tag{23}$$

となり出力半値幅に対して

$$\delta\theta \leq \frac{\lambda_1}{2d}. \tag{24}$$

λ_1 が光波の波長であることに留意すれば、この条件はかなり severe なものとなる。すなわち光電面の寸法は光波長よりかなり大きいのが普通だから。たとえば $\lambda_1 = 6000 \text{ \AA}$ で $d = 3 \text{ mm}$ なら、二つの光平面波は $\delta\theta = 10^{-4}$ radian 以内に平行でなければならない。これより大きな角度差を生ずると光電子流は $D(\theta_1, \theta_2)$ に従って変化する。

一般に光ヘテロダイン検波において局発用レーザからの光波は光電面に直角に入射し得るから、方向性による出力の大幅な減少をなくするには入射信号光波を $\delta\theta = \pm\lambda_1/2d$ 以内におさえる必要がある。つまり光電面は非常に狭い主輻射指向性をもつ一つの空中線と考えられる。またこれらの議論は、Fraunhofer diffraction pattern における表示式と同じであることは大変興味深い。(附録参照)

3. O型進行波光電管の等価抵抗と方向係数

O型進行波光電管の振幅変調光波に対する検波出力 $P(l)$ は、(Fig. 2 参照)

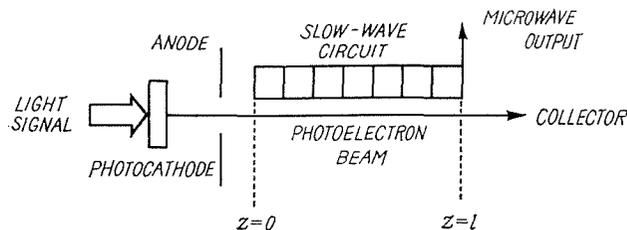


Fig. 2. Schematic of a traveling-wave microwave phototube.

$$P(l) = \frac{1}{2} |i(0)|^2 R_{eq}, \quad (25)$$

で表わされる^{4),5),6)}。ここで検波出力 $P(l)$ は、相互作用域の集電極端 $z=l$ における二つの光波の差周波数の出力であり、 $i(0)$ は相互作用域の入口 $z=0$ における光電子流の高周波成分である。 R_{eq} は等価抵抗であり PIN 光ダイオードやバルク半導体さらに進行波光電管などの検波装置の検波能力を示す量である⁹⁾。

O型進行波光電管の場合一般に

$$R_{eq} = \frac{K_0}{4C^2} \left| \frac{\phi}{\kappa} + j \frac{x}{\kappa\sigma} \right|^2. \quad (26)$$

で与えられる。ここに K_0 は結合インピーダンス、 C は利得係数、 σ は光電子流の変調係数である。また係数 ϕ 、 κ および x は光電子流や遅波回路の動作条件で決定する。(詳細は文献 5, 6 参照)

いま光ヘテロダイン検波に使用される場合、簡単な動作条件つまり振幅変調光に対応して光電面から密度変調光電子流のみ発生し、かつ電子銃域では partial conversion がないとすれば、式 (15) より

$$i(0) = 2D(\theta_1, \theta_2) \sqrt{I_{01} I_{02}}. \quad (27)$$

となり、等価抵抗は

$$R_{eq} = \frac{K_0}{4C^2} \left| \frac{\phi}{\kappa} \right|^2. \quad (28)$$

となる⁶⁾。したがって式 (23) と (25) より

$$\begin{aligned} P(l) &= \frac{1}{2} |2\sqrt{I_{01} I_{02}}|^2 D^2(\theta_1, \theta_2) R_{eq} \\ &= 2I_{01} I_{02} R'_{eq}, \end{aligned} \quad (29)$$

$$R'_{eq} = D^2(\theta_1, \theta_2) R_{eq}. \quad (30)$$

となり、 $\Delta k \cdot d$ に対する $D^2(\theta_1, \theta_2)$ の計算値を Fig. 3 に示す。

4. 結 言

光ヘテロダイン検波に使用される O 型進行波光電管の方向特性について考察した。方向特性による検波出力の低下を防ぐには、入射信号波と局発レーザよりの入射光とが出来る限り平行となるようにし、光電面を照射する必要がある。光電面の大きさと方向係数との関係、さらに光電子流の面積密度分布と検波出力の関係を求めることが今後の課題である。

おわりに研究の機会を与えて下さった電子工学科の方々、また資料の整備校正に協力された小柳幸次郎技官に感謝する。

附 録

光波に対する二乗検波器の出力電流は、光電面の各点における合成電界の二乗に比例し、全面積について積分し、かつ微小時間について平均したものである⁸⁾。したがってある点 P で時間 t に比例した量を $V^r(p, t)$ とし、その複素関数を $V(p, t)$ とすれば、その検波器の出力電流 $i(t)$ は

$$i(t) = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \int_A [V^r(p, t')]^2 dA \cdot dt'. \quad (A-1)$$

$V(p, t)$ を用い、定数は本質的でないので省略して

$$i(t) = \frac{1}{2} \left[\int_A \langle V(p, t') V^*(p, t') \rangle dA + \frac{1}{2} \int \langle V^2 + V^{*2} \rangle dA \right]. \quad (A-2)$$

ここで $\langle \rangle$ は τ 間の時間平均を示す。検波面上の電界は、各単一波を重畳したものであるから、

$$V(p, t) = \sum_n E_n(p) \cdot e^{-j2\pi\nu_n t}. \quad (A-3)$$

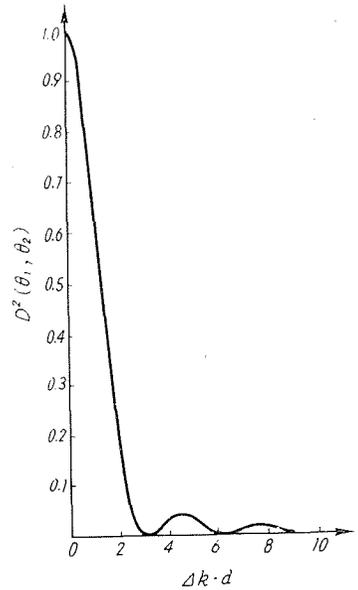


Fig. 3. $D^2(\theta_1, \theta_2)$ as a function of $\Delta k \cdot d$.

したがって出力電流は、平均値を省略して

$$i(t) = \frac{1}{2} \sum_{\substack{n,m \\ n \neq m}} e^{-j2\pi(\nu_n - \nu_m)t} \int E_n E_m^* dA. \quad (\text{A-4})$$

となる。 n と m はすべての値をとり得るので式 (A-4) はつぎのように書き得る。

$$i(t) = \text{Re} \sum_{\substack{n,m \\ m > n}} e^{-j2\pi(\nu_n - \nu_m)t} \int E_n E_m^* dA. \quad (\text{A-5})$$

いま二つの光波のみ考えれば、

$$i(t) = \text{Re} e^{-j2\pi(\nu_1 - \nu_2)t} \int E_1 E_2^* dA. \quad (\text{A-6})$$

さらにこれらの二波がそれぞれ P_{01} 点 (x_{01}, z_{01})、および P_{02} 点 (x_{02}, z_{02}) から出発して検波面を照射するとしよう。(Fig. 4 参照)

各波は球面波であると仮定し、検波面上任意の点と各光源までの距離 r_1, r_2 は $1/r$ の変化量が無視出来るとする。それ故検波面上の点 $P(x, 0)$ の電界は

$$V(p, t) = E_1 e^{-j2\pi\nu_1 t} + E_2 e^{-j2\pi\nu_2 t}, \quad (\text{A-7})$$

ここで

$$E_1 = A_1 e^{jk_1 r_1}, \quad E_2 = A_2 e^{jk_2 r_2}. \quad (\text{A-8})$$

また光源 $P_{0n} (x_{0n}, z_{0n})$ より $P(x, 0)$ までの距離は

$$\begin{aligned} r_n &= [(x - x_{0n})^2 + z_{0n}^2]^{1/2} \\ &= [r_n'^2 - 2x x_{0n} + x^2]^{1/2}. \end{aligned} \quad (\text{A-9})$$

$$r_n'^2 = x_{0n}^2 + z_{0n}^2. \quad (\text{A-10})$$

一般に検波器の幅が r_n' に比べて非常に小さいから、式 (A-9) は

$$r_n \approx r_n' - x \sin \theta_n + \frac{x^2}{2r_n'} \cos^2 \theta_n + \dots \quad (\text{A-11})$$

ここで

$$\theta_n = \tan^{-1} \frac{x_{0n}}{z_{0n}}. \quad (\text{A-12})$$

式 (A-8) と (A-11) を用いると式 (A-6) は

$$i(t) = \text{Re} e^{-j2\pi(\nu_1 - \nu_2)t} e^{j(k_1 r_1' - k_2 r_2')} \int_{-d/2}^{d/2} e^{jf(x)} dx. \quad (\text{A-13})$$

ここで

$$f(x) = (-k_1 \sin \theta_1 + k_2 \sin \theta_2) x + \left(\frac{k_1 \cos^2 \theta_1}{2r_1'} - \frac{k_2 \cos^2 \theta_2}{2r_2'} \right) x^2 + \dots \quad (\text{A-14})$$

上式で二次以上の項を省略すると両波は平面波となり

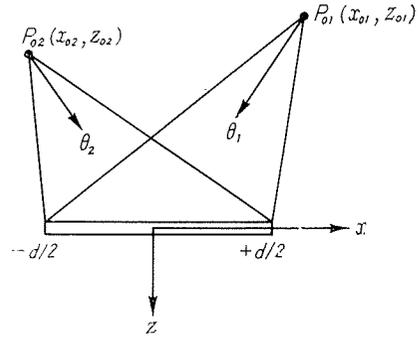


Fig. 4. Geometry for evaluating detection process with unfocused light.

$$i(t) = \cos [2\pi (\nu_1 - \nu_2) t + \phi] \cdot \frac{\sin \Delta k \cdot d}{\Delta k \cdot d}. \quad (\text{A-15})$$

$$\Delta k \cdot d = \frac{1}{2} (k_1 \sin \theta_1 - k_2 \sin \theta_2). \quad (18)$$

$$\phi = k_1 r'_1 - k_2 r'_2. \quad (\text{A-16})$$

けっきよく光波の二乗検波の問題は Fraunhofer diffraction pattern の問題と同様となることを知る。

参 考 文 献

- 1) Forrester, A. T.: "Photoelectric Mixing as a Spectroscopic Tool", J. Opt. Soc. Am., vol. 51, pp. 253-259 (1961-3).
- 2) Forrester, A. T.: "Photodetection and photomixing of Laser Output", Advances in Quantum Electronics, Columbia University Press, New York, pp. 233-238 (1961).
- 3) Siegman, A. E. and McMurtry, B. J.: "Microwave Phototubes", Conference on Electron Device Research, Troy, New York (1961-6) (Unpublished Work).
- 4) McMurtry, B. J.: "Microwave Phototube Design Considerations", IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-10, pp. 219-226 (1963-7).
- 5) 桜庭一郎: "O型光電子ビーム復調器によるLASER光の検波", 北海道大学工学部研究報告, 第32号, pp. 175-186 (1963-10).
- 6) Sakuraba, I. and Rowe, J. E.: "Partial Conversion of Current Modulation in Linear-Photoelectron-Beam Systems" IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-12, pp. 388-389 (1965-6).
- 7) Siegman, A. E., Harris, S. E. and McMurtry, B. J.: "Optical Heterodyning Optical Demodulation at Microwave Frequencies", Proc. Symp. on Optical Maser, Polytechnic Institute of Brooklyn, New York, pp. 511-527 (1963-4).
- 8) Corcoran, V. J.: "Directional Characteristics in Optical Heterodyne Detection Processes", J. Appl. Phys., vol. 36, pp. 1819-1825 (1965-6).
- 9) 桜庭一郎: "Photomixing と光電子ビーム復調器", 北海道大学工学部研究報告, 第41号, pp. 95-120 (1966-8).