

광통신에 이용되는 배열 수신기의 측정과 통계적 해석
(Statistical analysis and measurements of array receivers for use in
optical communication.)

정 평 식(pyung_shik, sung)¹⁾

요 약

본 논문은 공간적으로 변화하지 않는 신호장 $s_j(t)$ 의 합과 부가적이고 동차이고 공간적으로 등방성(x축 평면배열)이고, 분리할 수 있는 Covariance이며, Zero-mean Gaussian random 잡음장 $n(t, x)$ 를 처리하기 위해 n개의 동일 검파로 구성되는 검파 시스템을 고찰할 수 있도록 최적 산란 대기공간 광통신용 배열 수신기와 공분산회로를 구성하여 최대 이득의 직접 광검파를 통계적으로 해석한 이론값과 실험을 통해 얻은 측정값과 비교 해석한다. 또한 측정값이 joint Gaussian 이론곡선과 일치함을 확인한다.^{1,2,3)}

Abstract

In the paper, considers the design of a detection system, consisting of n identical detectors, to process the sum of spatially invariant signal fields $s_j(t)$, an additive, homogeneous, spatially isotropic (in the array plane x). covariance_separable, and zero_mean Gaussian random noise field $n(t,x)$. consisting of arrey receivers for use in optical communication through optimum turbulence atmosphers and covriance_circuit, staistical analysis through detection the maximum gain are compared with analysis theoretical analysis theoretical value and get through experimental measured value, as well the measured valus are confirmed to agreement joint Gaussian theoretical curves .

논문접수 : 2007. 1. 19.

심사완료 : 2007. 2. 19.

1) 정희원 : 재능대학 컴퓨터정보과 정교수

I. 서론

레이저 광을 이용하여 대기 교란을 통한 광통신의 직접 광검파 수신기에 관한 연구가 보고되고 있다.^{6,7)}

본 논문은 공간적으로 변화하지 않은 신호장 $s_j(t)$ 의 합과 잡음장 $n(t, x)$ 을 처리하기 위해 n 개의 동일한 특성을 갖는 검파기를 배열하여 구성하고 이 시스템을 고찰하기 위하여 최적 검파기 배열과 코바리언스 회로를 구성하여 고찰하므로 최대 이득의 직접 광검파 출력을 통계적으로 해석한 이론값과 실험을 통해 얻은 측정값과 비교 해석한다. 또한 측정값이 joint Gaussian 이론 곡선과 일치함을 확인한다.^{3,4,5,6,7,8)}

II. 수신기의 이론

수신기 시스템은 공간적으로 동일하게 위치한 n 개의 검파기로 구성하고 수신 입력 $v(t, x)$ 는 x 에 무관한 신호장 $s_j(t)$ 과 Zero_mean Gaussian random 신호장 $n(t, x)$ 의 합이다.^{10,12,13,)}

$$v(t, x) = s_j(t) + n(t, x) \quad (1)$$

잡음장은 동차이고 공간적으로 동일 방향 이므로 잡음 Covariance는 다음식과 같다.

$$E = [n(t_2, x_2)n(t_2, x_2)] = C_n(t_2 - t_1, |x_2 - x_1|) \\ = \sigma_n^2 C_t(t_2 - t_1)C_x(|x_2 - x_1|) \quad (2)$$

잡음장이 시간 간격에 대해서 적당한 time-stationary가 되고 배열 축상의 범위가 같은 차수라면 결과적으로 생기는 잡음장은 같다. 잡음장은 배열 축에서 방향성을 가지고 있지 않다

면 공간적으로 동일한 방향이다. 이상에서 생기는 문제점인 noise-covariance, 또는 joint-spectrum에 관한 식은 다음과 같다.

$$C_n(f, \eta) = 2\pi \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty C_n(\tau, r) \cdot \exp(-i2\pi f \tau) J_0(2\pi \eta r) r dr d_r \quad (3)$$

스펙트럼이 분석적이고 모든 신호 에너지가 주파수 협대역 ($f_0 - \delta/2, f_0 + \delta/2$)에 집중되어 있다면 joint-spectrum은 모든 η 에서 주파수를 분리할 수 있게 된다. 그러므로 잡음의 joint-spectrum Covariance는 모든 주파수를 분리할 수 있다고 가정할 수 있다. 특히 신호와 잡음 모델에 대한 잡음의 공간적 Covariance 함수는 다음식과 같다.

$$C_x(|\Delta x|) = (1 + \rho^2)^{-1} [\rho^2 \delta_{|\Delta x|} + \int_{\pi/2}^{\pi/2} P(\phi) J_0(2\pi \eta_0 |\Delta x| \cos \phi) d_\phi] \quad (4)$$

만약 $|f - f_0| < \delta/2$ 라면 검파기 출력은 시간으로 표본화할 수 있으며 j 번째 검파기 출력은 열(column) 벡터, $v(x_j)$ 로 표현할 수 있다. k 번째 성분은 다음식과 같다.

$$[v(x_j)]_R = v[t_k, x_j] \quad (5)$$

모든 검파기 출력 열(column) 벡터는 다음식과 같다.

$$v = \begin{bmatrix} v(x_1) \\ \vdots \\ v(x_n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Kronecker산출의 축위성과 분배성의 간단한 확장을 사용하면 다음식과 같다.

$$\frac{I_j(Y)}{g_n^2} = \left[\sum_{k=1}^n a_k Y(X_j) \right]^* \sigma_n^{-2} C_t^{-2} S_j - \frac{1}{2} S_j^* C_t^{-2} S_j - \frac{1}{2} g_n^{-2} I_n \pi_j \quad (7)$$

여기서 자승 배열 이득은 $g_n^2 = \psi_0^* C_x^{-1} \psi_0$ 이고 a_k 는 n 차수 Weight Vector의 k번째 성분이다. 공간적 결합기(Combiner)에 대한 n 개의 검파기 출력은 다음식과 같다.

$$\hat{y}(t) = \sum_{k=1}^n a_k y(t, X_k) \quad (8)$$

또 배열 이득은 다음식과 같다.

$$g_n = | \psi_0^* C_x^{-1} \psi_0 | \quad (9)$$

따라서 신호 검파기로 구성된 검파 시스템에 있어서 j 번째와 k 번째 과정 사이의 거리와 적으로 분리할 수 있음을 알았다. 그러므로 j 와 k 에 무관한 배열 이득을 최대화함과 동시에 n개 처리 사이의 확률 오차를 최소화하여 잡음장의 공간적 Covariance함수 검파기의 수와 검파기 위치의 배열을 최대화할 수가 있다.

III 광파에 대한 이론

광원, 표적, 수신단에 대한 구성도를 그림 1에 나타냈다. r, ρ, P는 각각 광원, 표적, 수신단에서의 좌표이다.

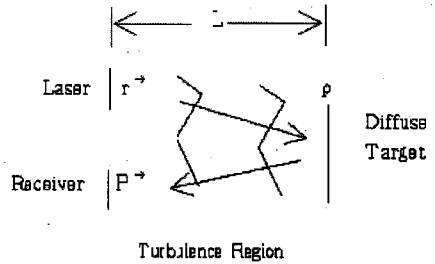


그림1 광원과 수신단 구성.
Fig. 1 Laser source target and receiver configuration.

광원에서의 진폭 분포식은 다음과 같다.

$$u_0(r) = u_0 \exp(-r^2/2\alpha_0^2 - ik r^2/2F) \quad (10)$$

α_0 : 빔의 반경

F: 초점거리

이때 목표점에서 산란되기 직전의 field 분포는 extended Huygens-Fresnel principle에 의하여 다음 식과 같다.^{14,15)}

$$u_p(\rho) = (k/2\pi_i L) \exp[ik(L + \frac{\rho^2}{2L})] \times \int U_0(r) \exp[ik(r^2 - 2r \cdot \rho)/2L + \Psi_1(\rho, r)] dr \quad (11)$$

Ψ_1 : 광원과 표적사이의 구면파에서의 랜덤 물질에 의한 효과.

표적에서의 field에 extended Huygens-Fresnel principle 원리를 다시 적용 시키면 수신단에서의 field가 얻어지며 그 결과 식은 다음과 같다.

$$u(p) = (k/2\pi_i L) \exp[ik(L + \frac{p^2}{2L})]$$

$$\times \int U(\rho) \exp[(ik/2L)(\rho^2 - 2\rho \cdot p) + \Psi_2(p, \rho)] d\rho \quad (12)$$

Ψ_2 : 표적과 수신단 사이의 구면파에서의 랜덤 물질에 의한 효과.
 $u(p)$: 산란된 직후의 표적에서의 field
 이상의 결과 식들은 focused ($L = F$) 또는 Collimated ($F \rightarrow \infty$) 빔인 경우에도 적용된다.

IV 바리언스(Variance)와 코바리언스(Covariance)

바리언스 랜덤 베리어블(variable) x 의 분산(variance)을 말하며 δ_x^2 (이산분산)로 표시할 수 있다.

$$V_{ax}(x) = \sigma_x^2 = \sum_{x_1}^n \cdots \sum_{x_n}^n x_p(x_p - u_p)f(x_1 \cdots x_n) \quad (13)$$

여기서

$$u_p = \sum_{x_1}^n \cdots \sum_{x_n}^n x_p + (x_1 \cdots x_n) \quad (14)$$

로 정의된다. 13식에서 σ_x (표준편차)를 구하면 15식이 된다.

$$\sigma_x = \sqrt{V_{ax}(x)} \quad (15)$$

코바리언스(covariance)는 랜덤 베리어블(variable) x 와 y 의 평균값에서 각각의 랜덤 베리어블 x 와 y 를 빼서 곱한 값의 기댓값 이다.

$$C_{ov}(x_p, x_q) = u_{pq} - u_p u_q \quad (16)$$

여기서

$$u_{pq} = \sum_{x_1}^n \cdots \sum_{x_n}^n x_p x_q f(x_1 \cdots x_n) \quad (17)$$

수신단에서 광(Laser) 코바리언스에 관한 연구는 매우 중요한 통계적인 특성을 띠고 있으며 수신단에서의 코바리언스는,

$$\sigma_{xy}(p_x p_y) = p(xy) - p(x)p(y) \quad (18)$$

로 주어지며 수신점 p_1 과 p_2 의 이득 상관(correlation) 함수식은 다음과 같다.

$$R_{p_1 p_2} = p[p_1(x)p_2(y)] = p[u_r(p_1)u_r^*(p_1)u_r(s_2)u_r^*(s_2)] \quad (19)$$

(19) 식에 extended Huygens-Fresnel principle 원리를 적용하여 확산시킨 상관함수(correlation function)는,

$$R_{p_1 p_2} = \left(\frac{k}{2\pi L}\right)^2 \iint dr_1 dr_2 p[u_r(r_1)u_r^*(r_2)] \cdot \exp[ik(|p_1 - r_1| - |p_1 - r_2| + |p_2 - r_1| - |p_2 - r_2|)] \quad (20)$$

이 된다. (19) 식은,

$$p[p_1(x)p_2(y)] = \frac{U_0^2 \alpha_0^2}{L^2} \cdot \frac{U_0^2 \alpha_0^2}{L^2} = \left(\frac{U_0 \alpha_0}{L}\right)^4 \quad (21)$$

이다. p_1 와 p_2 의 코바리언스는,

$$p[|u_r(r)|^2] = \left(\frac{k}{2\pi L}\right)^2 u_0^2 \iint dr_1 dr_2 \cdot \exp\left[\frac{r_1^2 + r_2^2}{2\alpha_0^2} - \frac{ik}{L} p(r_1 + r_2)\right]$$

을 이용하여

$$\sigma_{xy}(p_1 p_2) = \left(\frac{k}{2\pi L}\right)^2 \iint dr_1 dr_2 p[u_r(r_1)u_r^*(r_2)] \cdot \exp[ik(|p_1 - r_1| - |p_1 - r_2| + |p_2 - r_1| - |p_2 - r_2|)] -$$

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{U_0\alpha_0}{L}\right)^4 &= \left(\frac{k}{2\pi L}\right)^2 \left(\frac{k}{2\pi L}\right)^2 u_0^2 \int \int \int \int d \\
 &r_1 dr_2 dr_3 dr_4 \cdot \exp[ik(|p_1-r_1|-|p_1-r_2|+|p_2-r_1|-|p_2-r_2| \\
 &- \frac{r_3^2+r_4^2}{2\alpha_0^2} - \frac{ik}{L} p(r_1-r_2))] - \left(\frac{U_0\alpha_0}{L}\right)^4 = \frac{U_0^2}{L^4} \\
 &\left(\frac{k}{2\pi}\right)^4 \int \int \int \int dr_1 dr_2 dr_3 dr_4 \cdot \exp[ik(|p_1 \\
 &-r_1|-|p_1-r_2|+|p_2-r_1|-|p_2-r_2| - \frac{r_3^2+r_4^2}{2\alpha_0^2} - \frac{ik}{L} p(r_3 \\
 &-r_4))] - u_0^2 \alpha_0^4 \quad (22)
 \end{aligned}$$

(22) 식이 된다.

V 상관 (Correlation) 계수

상관계수는, 정규화된 covariance인데 식으로 표현하면

$$\rho = \frac{C_{ov}}{\sqrt{Var_1 \cdot Var_2}} \quad (23)$$

로 나타나며 계수의 절대값은 항상 1 보다 작으며

$$|\rho| \leq 1 \quad (24)$$

그림은 correlation 계수의 값에 따른 분산 정도를 나타내는데 이것은 두 신호가 들어 왔을 때, 두 신호의 선형성을 나타내는 것으로 1 이거나 -1 일때 두 신호는 선형성 즉 상호의존성이 좋은 것이고 0 일때 두 신호는 독립적이며 직교성이 있다고 한다

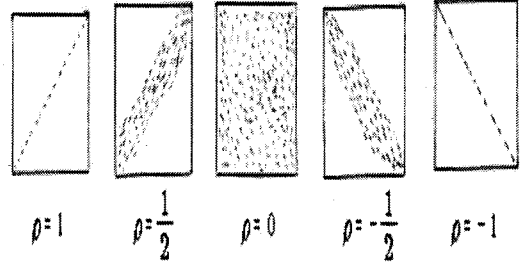


그림 2 상 관 계 수
Fig. 2 Correlation coefficients

VI 실험

본 실험에서 분산(variance)과 공분산(covariance)의 측정을 위한 시스템은 그림 3 과 같다.

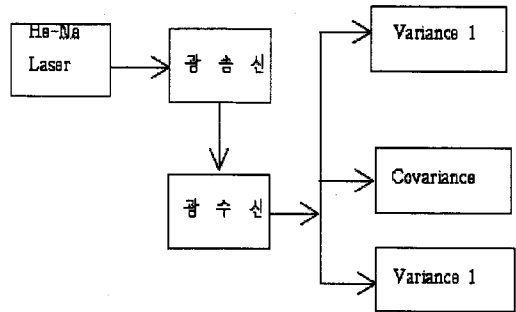


그림 3 실험 블록 다이어그램
Fig. 3 The Block Diagram of Experimental System

He - Ne 레이저 ($\lambda = 6328\text{\AA}$) 빔은 여러 종류의 filter(오목렌즈)에 의하여 분산된다. 분산된 레이저빔은 검파기에 수신된다. 검파기에 수신된 신호를 covariance 회로에서 분산된 수신기 회로의 입력단에 검파기를 직렬로 접속했을때의 레이저 빔의 분산된 강도를 거리마다 X - Y Recorder로 측정하여 통계학적으로 분석 하였다.

VII 실험 결과 및 고찰

실험에 covariance의 설계는 100kHz 이상의 주파수에서도 정상동작이 가능하도록 설계 하였으나 제작 실험한 결과 변조주파수는 그림4에서 보는 바와 같이 50kHz 까지 정상동작을 하고 그 이상의 주파수에서는 전류의 갑작스런 증감으로 인하여 정상동작을 못하고 있음을 알수 있었다. 그림5은 그림4의 correlation 계수를 구한 것이고 그림6에서는 (L = 1cm일때) 변조파의 진폭 0.4 V_{pp} 이상되면 계기의 측정이 불가능했다.

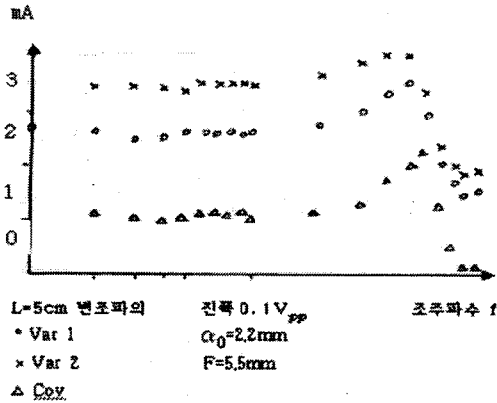


그림 4 변조 주파수대 Variance 1, Variance 2, Covariance
 Fig. 4 Modulation frequencies V_p, Var 1, Var 2, Cov

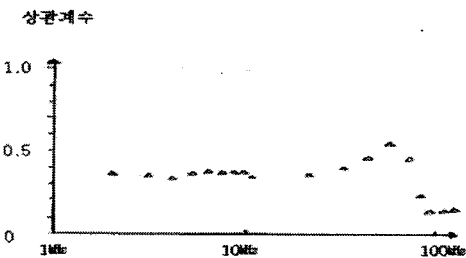


그림 5. 그림 4의 상 관계수
 Fig. 5. The Correlation Coefficients of Fig 4.

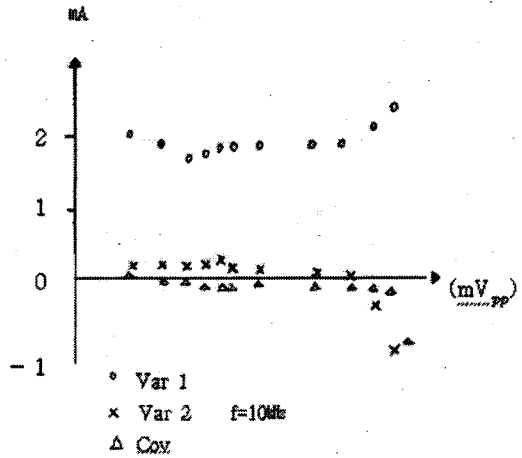


그림 6 변조 진폭대 Var 1, Var 2, Cov
 Fig. 6 Modulation Amplitude V_p, Var 1, Var 2, Cov

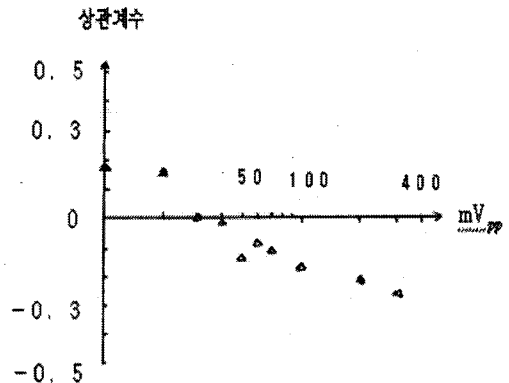


그림 7 그림 6의 상 관계수
 Fig. 7 The Correlation Coefficient of Fig.6

그림8은 거리 L에 따른 변화를 나타내었다. 이론값은 식(13)에 α₀ = 2.4cm, F = 5.5mm, L = 1cm ~ 100 cm를 대입 컴퓨터로 계산하여 실험값과 일치함을 확인하였고 그림 9f에서 거리 L에 따른 covariance의 측정값은 참고 문헌 14의 joint Gaussian theory 곡선과 일치함을 확인 하였다.

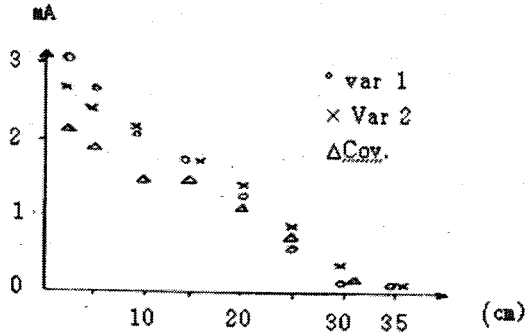


그림 8 거리 L에 따른 Var 1, Var 2, Cov
Fig. 8 Var 1, Var 2, Cov with Variable L

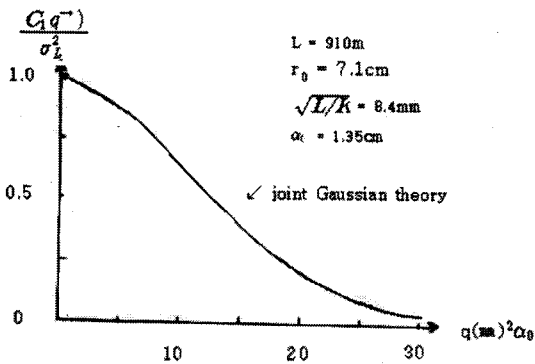


그림9 joint Gaussian Theory 곡선
Fig. 9 Joint Gaussian Theory Curve

Ⅶ 결론

제작 시험한 covariance Meter는 그림5,6,7,8,9에서 보듯이 정상동작을 하고 있음을 확인하였고 입력광의 variance와 covariance를 측정하여 이론값과 비교 하였다.

또한 correlation coefficient를 계산하여 독립적인 신호 즉 광도파관을 이용하여 빛을 받았을 때 covariance 측정기는 "0"을 나타내서 상관 계수 0 이 되어 두 신호가 각기 독립임을 확인하였고 광도파관(광텐넬)을 사용하지 않고 L = 10cm로 놓고 r₁과 r₂

의 거리는 5cm, p₁과 p₂의 거리도 5cm로 놓아 때 correlation coefficient는 0.25정도를 가리켜 서로 영향을 미치고 있음을 확인 하였다. 본 논문에서는 제작한 covariance Meter를 사용하여 광통신에서 대기를 매체로 하는 공간 통신의 독립성 여부를 측정하여 효율을 개선 하는데 많은 도움을 주리라 생각되며 아직 본 측정기의 성능이 제한되어 있고 원거리 실험을 못한 결점이 있으나 앞으로 이 결점이 보완되면 covariance Meter는 광통신에서 커다란 역할을 하리라 생각한다.

참고문헌

- [1] . H.Lee, J.Fred Holmes,and J.R.Kerr, "statistics of speckle propagation through the turbulent atmosphere" J.opt. Soc. Am, 6 6, 1164-1172(1976)
- [2] . V.I. Tatarski," wave propagation in a Turbulent Medium"; McGraw, Hill (1981)
- [3] . 성평식. "교란대기를 통한 스펙클 전파" 한국정보과학회 논문지 1997.6. vel 5, NO1, J une.
- [4] . A.M. prokhorov, K.S. Bunkin, "Laser I rradiance propagation in tubulent Media", pro c. IEEE63, 790-811(1975)
- [5] . A. Ishinaru, "wave propagation and scattering in Random Media (vol.L,2)" Academic press (1988)
- [6] . H.I.Yura, "Mutual coherence Function of a Finite corss section optical Beam propagating in a Turbulent Medium", Appl.A pt.II, 1399-1406(1983)
- [7] . P.A.Pincus, M.A. Fossey, "speckle pro

pagation through tubulence experimental", J. opt. soc.Am, 68, 760-762(1988)

[8] . N.George and A. Jain, " space and wavelenght dependence of speckle intensity", Appl.phy, 4,201(1984)

[9] . w.K. pratt, "Laser communication system", wiley, Newyork, 1989 chap.9.

[10] . H.C. Martel and M.V. Mathews, "Further results on the detectability of known signals in Gaussian noise," Bell sys. Tech.J., 40 pp 423~451, March 1991.

[11] . D Middleton and D.Van Meter, "on optimum multiple-alternative detection of signals in noise,"IRE Trans,on Information Theory, vol IT,pp 1 - 9, September 1995.

[12] . R Bellman, "Introduction to matrix analysis. "New York : Mc Graw-Hill, pp 223 - 239 1990.

[13] . "Two-position, two-Frequency mutual-coherence function in turbulence. "Ronald Fante.J. opt. SDC. Am/vol71.no.12s December 1981.

[14] . Kim, yung-kwon "Direct detection,photon counting receivers for use in optical communication through Turbulent Atmosphere."kon-kuk university. journal of academic affairs natural sciences, vol. 8, pp 151-167 1983.

[15] . Kim yung-kwon, "Analysis of crossed laser beams in turbulent media for optical communication. "journal of academic affairs. natural sciences. vol.xxvi.no. 2. kon-kuk university,1982.

성평식



1975.2 건국대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사)

1979.2 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사)

1988.2 건국대학교 대학원 전자공학과 박사학위취득(공학

박사)

2007. 3. 현재 재능대학 컴퓨터 정보과 교수