

# LED 可視光通信のための単純な Schmitt Trigger 回路型 確率共鳴受信機の定量的性能解析

## Quantitative Performance Analysis of Simple Stochastic Resonance Receiver Using Schmitt Trigger Circuit for LED Visible Light Communication

荒井 伸太郎<sup>†</sup>

山里 敬也<sup>‡</sup>

田所 幸浩<sup>††</sup>

<sup>†</sup>香川高等専門学校

<sup>‡</sup>名古屋大学

<sup>††</sup>株式会社豊田中央研究所

Shintaro ARAI<sup>†</sup>

Takaya YAMAZATO<sup>‡</sup>

Yukihiro TADOKORO<sup>††</sup>

<sup>†</sup>National Institute of Technology, Kagawa College

<sup>‡</sup>Nagoya University

<sup>††</sup>TOYOTA Central R&D Labs., Inc.

### 1 はじめに

LED 照明や LED ディスプレイ等, LED の利用拡大に伴い, LED を用いた通信システム“可視光通信”が注目を集めている [1–5]. 可視光通信とは人間の目に見える光を利用してデータを送信する無線通信技術のことであり, 従来の無線通信や赤外線通信に比べ, 高い信号対雑音電力比 (SNR) を得る可能性があると期待されている. また, LED は半導体素子であるため, 高速に光の点滅を制御可能である. この特徴を利用することで, 例えば既存の LED 照明等を送信機として用いる場合, 人間の目では認識できないほど高速に点滅させることで, 照明本来が持つ役割を果たすと同時にデータ通信が可能となる.

可視光通信の受信機に用いられる受光素子として代表的なものの 1 つがフォトダイオード [4, 5] である. その中でも良く用いられるものに PIN フォトダイオード (PIN PD) とアバランシェフォトダイオード (APD) があり, 本研究では, APD より安価で入手が容易な PIN PD に着目する. PIN PD は P 層と N 層の間に I 層を挿入することにより高速応答性を実現している. しかしながら, その出力電流は非常に小さく, PIN PD が受光する全ての光を 1 つの信号として受信するため, 屋外で用いる場合, 太陽光などの外乱の影響により信号がひずみ, 通信が困難

となる問題点がある.

本研究では, この問題を解決する手法として, 雑音を利用することにより信号を検出する確率共鳴現象に注目する [6–12]. 確率共鳴 (Stochastic Resonance: SR) とは, 系が応答できないような微弱な信号に対して適切な雑音を加えた場合にその応答が高まる非線形現象である. これまでの研究で我々は, PIN PD を用いて構成した可視光通信受信機に代表的な確率共鳴系回路の 1 つである Schmitt trigger 回路を用いた簡易なシステムを作製し, 実装実験により LED 光の光検出特性を調べた [13]. その結果, Schmitt trigger 回路の回路パラメータを調整することで, PIN PD で受信した強雑音为重畳した信号から, 送信機側の信号を復元することに成功した. しかしながら, [13] では定性的に確率共鳴現象の効果を確認しただけに留まっており, 確率共鳴現象の可視光通信受信機への適用可能性を検討するためには, 十分な定量的解析を行う必要がある. そこで本稿では, Schmitt trigger 回路型確率共鳴受信機の入出力特性, 及び, 印加雑音に対する出力電力スペクトル密度 (PSD) を解析し, 光信号検出特性を定量的に評価する.

### 2 システムモデル

図 1 に本研究で想定している LED 可視光通信システムの回路構成を示す. 以下に各部の動作について

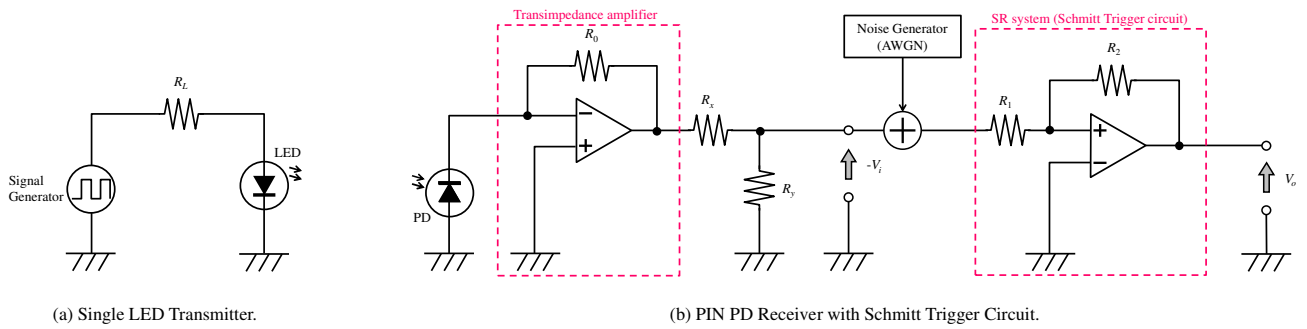


図 1: 回路構成.

表 1: LED の仕様.

メーカー名	Linkman
型番	LA504W3CA2C02
発光色	白
ボディ色	クリア
輝度	18,000mcd
半値角	15°

表 2: Si PIN PD の仕様.

メーカー名	浜松ホトニクス
型番	S6775
受光面サイズ	5.5mm × 4.8mm
感度波長範囲	320 ~ 1,100nm

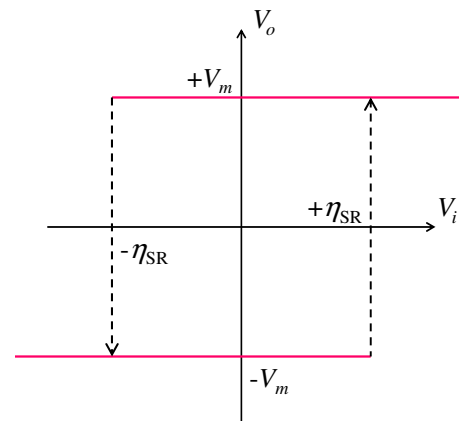


図 2: Schmitt trigger 回路の入出力特性.

て説明する.

図 1(a) に示す送信機は、信号発生器と LED で構成された簡易なシステムである。信号発生器により、周波数 600Hz, Duty 比 50% の矩形波を発生させ、その波形に応じて LED を点滅させる。送信機の LED は単光源とし、本研究では表 1 に示す高輝度白色 LED を用いる。

図 1(b) に示す受信機は、PIN PD, インピーダンス変換器, 雑音生成器及び確率共鳴系回路で構成される。PIN PD には、表 2 に示す汎用シリコン PIN PD (Si PIN PD) を用いる。LED 送信機から発せられた光信号を PIN PD により電気信号として取り込むが、通常、太陽光などの外乱光により背景光雑音が発生し、本電圧から直接送信信号を読み取ることができない。そこで、背景光雑音を模擬するために、インピーダンス調整後の PD 出力電圧に対して雑音生成器から雑音  $n_{SR}(t)$  を直接印加する。その後

の信号  $V_i$  において送信信号波形を獲得できれば、受信側で送信情報が獲得できたといえる。本研究では雑音  $n_{SR}(t)$  として、平均 0 の加法性白色ガウス雑音 (AWGN) を用いる。背景光雑音としては通常ショット雑音が想定されるが、雑音電力が大きい場合には AWGN として近似できる場合があることが知られている [14]。

本研究で用いる確率共鳴系回路には、代表的な確率共鳴系回路の 1 つである Schmitt trigger 回路を採用する [10, 11, 13]。確率共鳴現象を実現する回路としては他にコンパレータ回路が挙げられるが、2 つの回路を用いた時の確率共鳴現象の効果を出力端での SNR で比較した場合、Schmitt trigger 回路の方が高い出力 SNR が得られることが実験的に示されている [10]。このことから、本研究では Schmitt trigger 回路を確率共鳴系として採用する。図 1(b) の右側部分が Schmitt trigger 回路構成を示している。ご覧のとおり、オペアンプと 2 つの抵抗で構成されるシンプルな回路である。Schmitt trigger は図 2 に示すようなヒステリシスをもつコンパレータであり、2 値の

表 3: 実験諸元.

送信信号 (矩形波) 周波数	600Hz
送信信号 Duty 比	50%
オペアンプ	LM7171
内部雑音 $n_{SR}(t)$	AWGN
通信距離 $D$	3 cm

出力  $\pm V_m$  と 2 つのしきい値  $\pm \eta_{SR}$  をもつ. 図 1(b) の回路において,  $\pm \eta_{SR}$  は以下の式で求められる.

$$\eta_{SR} = \frac{R_1}{R_2} V_m. \quad (1)$$

理想的な Schmitt trigger の場合, 受信信号  $r(t)$  と内部雑音  $n_{SR}(t)$  を Schmitt trigger 回路に入力した場合の出力  $r_s(t)$  は

$$\begin{aligned} r_s(t) &= V_m \operatorname{sgn}(V_i - \eta_{SR}), \\ &= V_m \operatorname{sgn}(r(t) + n_{SR}(t) - \eta_{SR}), \end{aligned} \quad (2)$$

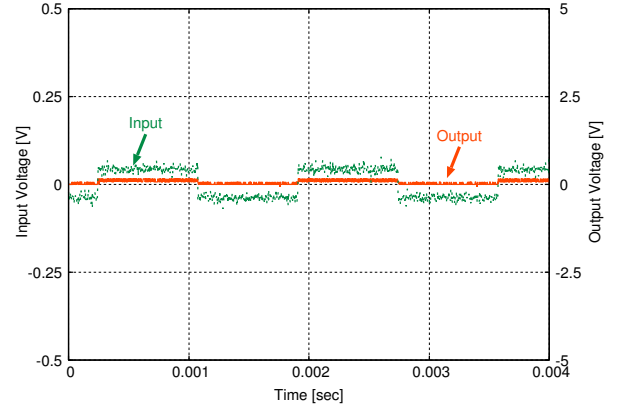
のように表される. ここで,  $\operatorname{sgn}(x)$  は変数  $x$  の符号を取る操作を表している.

### 3 実験

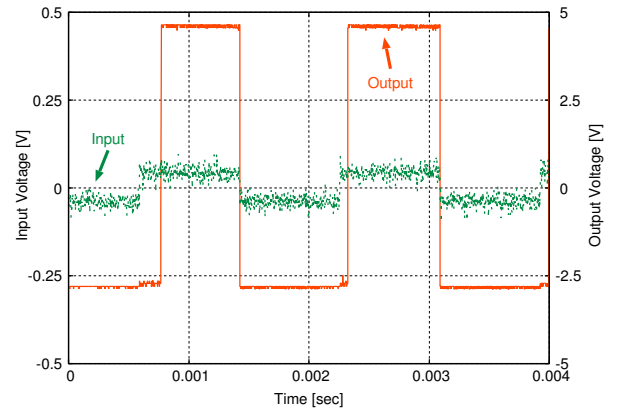
2 章で述べた LED 送信機及び Schmitt trigger 回路型確率共鳴受信機を用いて, 入出力特性, 及び, 印加雑音に対する出力 PSD を解析し, 光信号検出特性を定量的に評価する. 実験諸元を表 3 に示す. また, 図 1 に示す各抵抗の値は

$R_L = 1\text{k}\Omega$ ,  $R_0 = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_x = 64\text{k}\Omega$ ,  $R_y = 2.2\text{k}\Omega$ ,  $R_1 = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 10\text{M}\Omega$  とした. これらは, 確率共鳴現象の効果を得られるよう, 内部雑音  $n_{SR}(t)$  を加えない状態での入力信号のみでは Schmitt trigger 回路のしきい値  $\pm \eta_{SR}$  を越えないように設計された値である. 加えて, 同図のインピーダンス変換器及び Schmitt trigger 回路に用いるオペアンプには高速オペアンプ (Texas Instruments LM7171) を使用した. 送信機と受信機を一直線上に互いに向き合う形で配置させ, LED と PIN PD 間の距離 (通信距離:  $D$ ) を 3cm 一定として実験を行った.

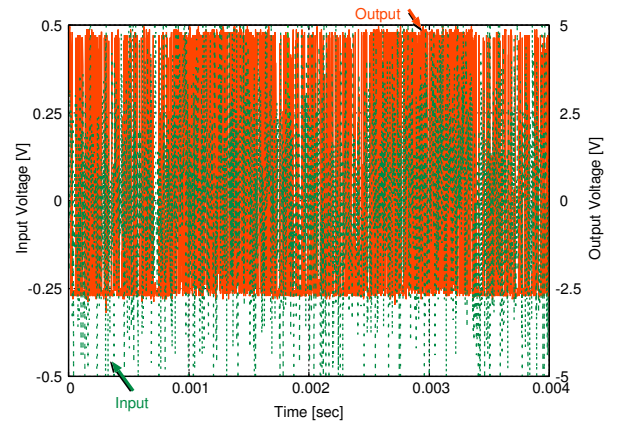
図 3 に異なる内部雑音強度 (雑音 PSD:  $n_{PSD}$ ) に対する Schmitt trigger 回路型受信機の入出力特性 ( $D = 3\text{cm}$ ) を示す. ご覧の通り, 図 3(a) から (c) にかけて  $n_{PSD}$  が強くなっており, 各雑音強度で異なる出力波形を確認できる. 図 3(a) では, 雑音強度が非常に小さく, 出力波形をはっきりと観測することはできない. これは印可される内部雑音の振幅が



(a)  $n_{PSD} = 1.27 \times 10^{-4} \text{ V}^2/\text{Hz}$ .



(b)  $n_{PSD} = 4.71 \times 10^{-4} \text{ V}^2/\text{Hz}$ .



(c)  $n_{PSD} = 1.10 \times 10^{-1} \text{ V}^2/\text{Hz}$ .

図 3: Schmitt trigger 回路型確率共鳴受信機の入出力波形 ( $D = 3\text{cm}$ ).

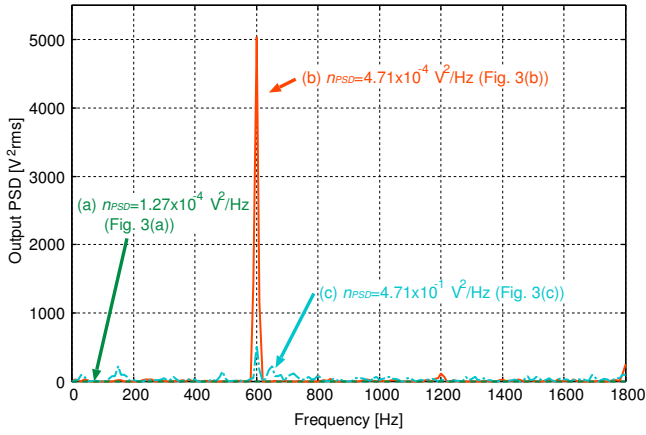


図 4: Schmitt trigger 回路型確率共鳴受信機の出力 PSD 特性 ( $D = 3\text{cm}$ ).

非常に小さいため、Schmitt trigger 回路のしきい値を超えないためである。この状態から雑音強度を次第に大きくしていくと、雑音の影響を受けた入力波形が、そのしきい値を越え、図 3(b) のような矩形波が出力される。この矩形波の周波数は 600Hz であり、送信機側で発生させた矩形波の周波数と同じである。つまり、受信機側で送信信号波形を復元できたとと言える。本実験では、 $n_{PSD} = 4.71 \times 10^{-4} \text{ V}^2/\text{Hz}$  の時、最もきれいな矩形波を観測できた。しかしながら、雑音強度をさらに大きくすると、雑音の影響が支配的となり、雑音に応じてしきい値を越えてしまうため、図 3(c) に示すように、再び送信信号波形を得られなくなってしまう。

次に、図 3(a) から (c) で印可した異なる内部雑音に対する Schmitt trigger 回路型確率共鳴受信機の出力 PSD 特性を図 4 に示す。この図から分かるように、図 3(b) の雑音強度 ( $n_{PSD} = 4.71 \times 10^{-4} \text{ V}^2/\text{Hz}$ ) の時、600Hz 地点で鋭い PSD ピークを観測できる。一方で、図 3(a) の雑音強度 ( $n_{PSD} = 1.27 \times 10^{-4} \text{ V}^2/\text{Hz}$ ) では、PSD ピークは観測できず、図 3(c) の雑音強度 ( $n_{PSD} = 1.10 \times 10^{-1} \text{ V}^2/\text{Hz}$ ) では、600Hz 地点でわずかに PSD ピークが観測できるが、その大きさは図 3(b) よりはるかに小さい。先に述べた通り、本実験では送信機側で発生させた矩形波の周波数は 600Hz である。本解析結果から、図 3(b) で印可した雑音のように最適な強度に調整することによって、Schmitt trigger 回路型確率共鳴受信機は送信信号成分を抽出可能であることが定量的に確認できた。

## 4 まとめ

本研究では、代表的な確率共鳴系回路である Schmitt trigger 回路を用いた LED 可視光通信受信機を作製し、その入出力特性、及び、印加雑音に対する出力 PSD 特性を解析した。解析結果より、最適な雑音強度に調整することによって、出力 PSD ピークが送信信号と同じ周波数の地点で観測できたことから、Schmitt trigger 回路型確率共鳴受信機は送信信号成分を抽出可能であることが定量的に確認できた。今後の課題として、送信信号周波数を拡大させた時の、Schmitt trigger 回路型確率共鳴受信機の信号復元限界の調査や、周期的な波形でなく変調された信号を用いた可視光通信実験等が挙げられる。

## 参考文献

- [1] H. B. C. Wook, S. Haruyama and M. Nakagawa, "Visible light communication with LED traffic lights using 2-dimensional image sensor," *IEICE Trans. on Fundamentals*, vol.E89-A, no.3, pp.654-659, Mar. 2006.
- [2] D. C. O'Brien, L. Le-Minh, G. Faulkner, J. W. Walewski and S. Randel, "Visible light communication: challenges and possibilities," *Proc. PIMRC'08*, Sept. 2008.
- [3] T. Yamazato, I. Takai, H. Okada, T. Fujii, T. Yendo, S. Arai, M. Andoh, T. Harada, K. Yasutomi, K. Kagawa and S. Kawahito, "Image Sensor based Visible Light Communication for Automotive Applications," *IEEE Commun. Mag.*, vol.52, no.7, pp.88-97, Jul. 2014.
- [4] M. Akanegawa, Y. Tanaka and M. Nakagawa, "Basic study on traffic information system using LED traffic lights," *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, vol.2, no.4, pp.197-203, Dec. 2001.
- [5] K. Cui, G. Chen, Z. Xu and R. D. Roberts, "Line-of-sight visible light communication system design and demonstration," *Proc. CSNDS'10*, pp.621-625, Jul. 2010.
- [6] R. Benzi, A. Sutera, and A. Vulpiani, "The mechanism of stochastic resonance," *J. Phys. A: Math. Gen.*, vol.14, no.11, pp.L453-L457, Apr. 1981.

- [7] S. Fauve and F. Heslot, “Stochastic resonance in a bistable system,” *Phys. Lett. A*, vol.97, no.1,2, pp.5-7, Aug. 1983.
- [8] L. Gammaitoni, P. Hanggi, P. Jung, and F. Marchesoni, “Stochastic resonance,” *Rev. Mod. Phys.*, vol.70, no.1, pp.223-287, Jan. 1998.
- [9] N. G. Stocks, “Suprathreshold stochastic resonance in multilevel threshold systems,” *Phys. Rev. Lett.*, vol.84, no.11, pp.2310-2323, Mar. 2000.
- [10] G. P. Harmer and B. R. Davis, “A review of stochastic resonance: circuits and measurement,” *IEEE Trans. Instrumentation and measurement*, vol.51, no.2, pp.299-309, Apr. 2002.
- [11] K. Chiga, H. Tanaka, T. Yamazato, Y. Tadokoro and S. Arai, “Implementation of bi-polar pulse SR receiver using Schmitt trigger and evaluation of its performance,” *Proc. NOLTA '13*, pp.269-271, Sept. 2013.
- [12] H. Tanaka, K. Chiga, T. Yamazato, Y. Tadokoro and S. Arai, “Noise-Enhanced sub-threshold signal reception by a stochastic resonance receiver using a non-dynamical device,” *NOLTA, IEICE*, vol.6, no.2, pp.303-312, Apr. 2015.
- [13] 荒井伸太郎, 山里敬也, 田所幸浩, “LED 可視光通信のための Schmitt Trigger 回路を利用した確率共鳴受信機による光信号検出,” 第 27 回回路とシステムワークショップ論文集, pp.116-120, 2014 年 8 月.
- [14] J. M. Kahn and J. R. Barry, “Wireless infrared communications,” *Proc. IEEE*, vol.85, pp.265-298, Feb. 1997.