

## FM復調PLL回路におけるノイズ共鳴現象と非線形力学

平井, 大博

九州大学大学院システム情報科学研究科電子デバイス工学専攻 : 修士課程

松野, 哲也

九州大学大学院システム情報科学研究科電子デバイス工学専攻

都甲, 潔

九州大学大学院システム情報科学研究科電子デバイス工学専攻

山藤, 馨

九州大学大学院システム情報科学研究科電子デバイス工学専攻

<https://doi.org/10.15017/1495092>

---

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 2 (1), pp.145-149, 1997-03-26. 九州大学大学院システム情報科学研究所

バージョン :

権利関係 :

## FM復調PLL回路におけるノイズ共鳴現象と非線形力学

平井大博\*・松野哲也\*\*・都甲 潔\*\*・山藤 馨\*\*

### Noise-Induced FM Demodulation and Nonlinear Dynamics in a PLL Circuit

Takehiro HIRAI, Tetsuya MATSUNO, Kiyoshi TOKO and Kaoru YAMAFUJI

(Received December 24, 1996)

**Abstract:** Nonlinear dynamics and the effect of noise on the dynamics in the FM (Frequency Modulation) demodulator were investigated. The FM demodulator concerned here is composed of the phase-locked loop. Various nonlinear responses including chaos were observed. It was also found that an adequately demodulated output was recovered from a turbulent state by applying noise to the FM input. The obtained correlation curve exhibited a peak around a certain value of the power of the applied noise. This phenomenon was apparently similar to what is called the stochastic resonance observed in various kinds of nonlinear systems.

**Keywords:** PLL, FM demodulation, Stochastic resonance, Noise-induced transition, Chaos

#### 1. はじめに

位相同期ループ (Phase-Locked Loop: PLL) を用いると周波数変調 (FM) 波復調回路を容易に組むことができる。この回路を記述する方程式は、周期的外力下にある振り子や Josephson 素子を記述するものと同じ形であり、この形の方程式はカオスをはじめとする様々な非線形ダイナミクスを生じることがわかっている<sup>1),2),3)</sup>。

ここでは、PLL素子を用いて実際に電子回路 (FM復調回路) を組み、正弦波を変調した信号を加えた際の応答を調べた上で、更にノイズの影響を調べた。非線形ダイナミクスに対するノイズの影響は古くから関心が持たれているものであるが、比較的最近ノイズ共鳴 (Stochastic Resonance: SR)<sup>4),5),6)</sup> と呼ばれる現象が注目されている。本研究においても SR 現象と類似の現象が観測されたので、これに関して報告する。ここで観測された SR に類似した現象は、ノイズ印加による FM 復調波の回復現象である。

#### 2. FM復調PLL回路におけるカオス

Fig. 1に位相同期ループの基本構成を示す。主な構成要素は、位相比較器 (Phase Detector: PD)、ループフィルタ (Loop Filter: LF)、および電圧制御発振器 (Voltage Controlled Oscillator: VCO) の3つである。

位相比較器では入力信号の位相とVCO出力の位相との差が検出される。ループフィルタは、位相比較器出力に含まれている不要な高調波成分や雑音を取り除き、同時

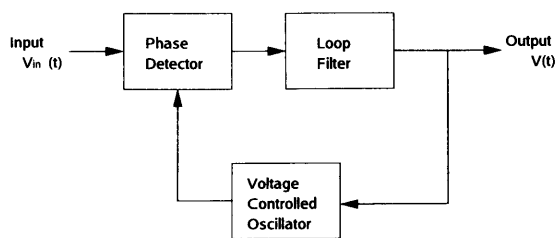


Fig.1 A standard PLL configuration.

にPLLの応答特性、同期特性を決定する役割を果たす。VCOはループフィルタの出力の制御信号電圧によって、発振周波数が決定される発振器である。位相比較器で検出された位相差をもとに、VCO出力が進んでいけば周波数を下げて位相を遅らせ、遅れていけば周波数を上げて位相を進めるように制御される<sup>7),8)</sup>。

本研究ではPLL-IC (LM565CN) を使い、Fig. 2のようなFM復調回路<sup>9)</sup>を製作し実験を行った。Fig. 2のICの8番、9番に接続した抵抗とコンデンサにより、VCOの中心周波数は90kHzに設定している。

まず変調波を正弦波とし、変調周波数 $f_m$ と変調の深さ $\Delta f$ をパラメータとした場合の出力特性について調べた。FM変調された入力信号 $V_{in}(t)$ は、振幅をA、搬送波の周波数を $f_c$ として次式で表される。

$$V_{in}(t) = A \sin[2\pi f_c t + \frac{\Delta f}{f_m} \cos(2\pi f_m t)] \quad (1)$$

この実験から得られた状態図をFig. 3に示し、さらに各々の状態におけるPLL回路の出力波形をFig. 4に示す。これらの図から分かるように、変調周波数 $f_m$ と変調の深

平成8年12月24日受付

\* 電子デバイス工学専攻修士課程

\*\* 電子デバイス工学専攻

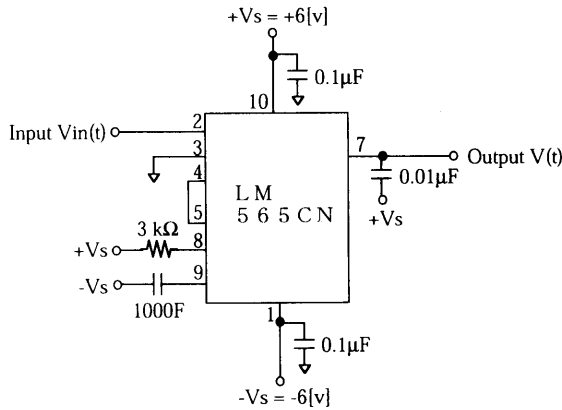


Fig.2 PLL circuit as an FM demodulator.

さ $\Delta f$ の値により, 出力波形は復調に成功した状態 (I), 引き込み状態ではあるが完全な復調ができていない状態 (II~VI), および引き込み状態から外れたカオス的な振動状態 (VII) に分類できる.

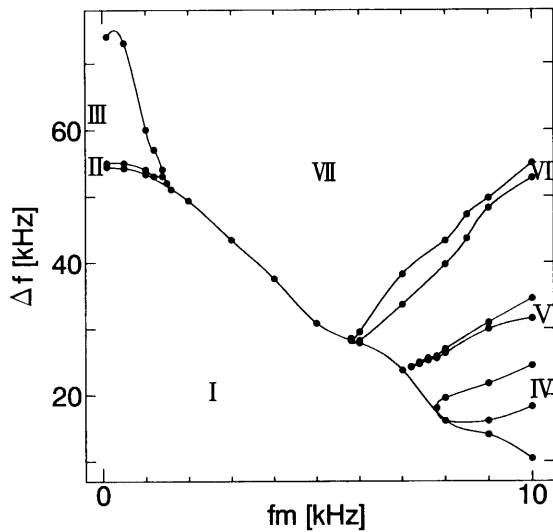


Fig.3 State diagram ( $f_c = 100\text{kHz}$ ,  $A = 200\text{mV}$ ).  
I~VI: synchronized oscillation, VII: chaotic oscillation.

このカオス的な振動状態について, さらに詳しく検討する. Fig. 5のように入力変調波を基準として, 1周期毎に $V_n, V_{n+1}, \dots$ とする. 縦軸に $\Delta V_n (= V_{n+1} - V_n)$ , 横軸に $V_n$ をとり, ポアンカレマップを描いたのがFig. 6である. これらの図からカオスの特徴である折り畳み, 引き延ばしの様子が見られる<sup>10)</sup>. ただしリアプノフ指数, 相関次元等の算出は今後の課題である.

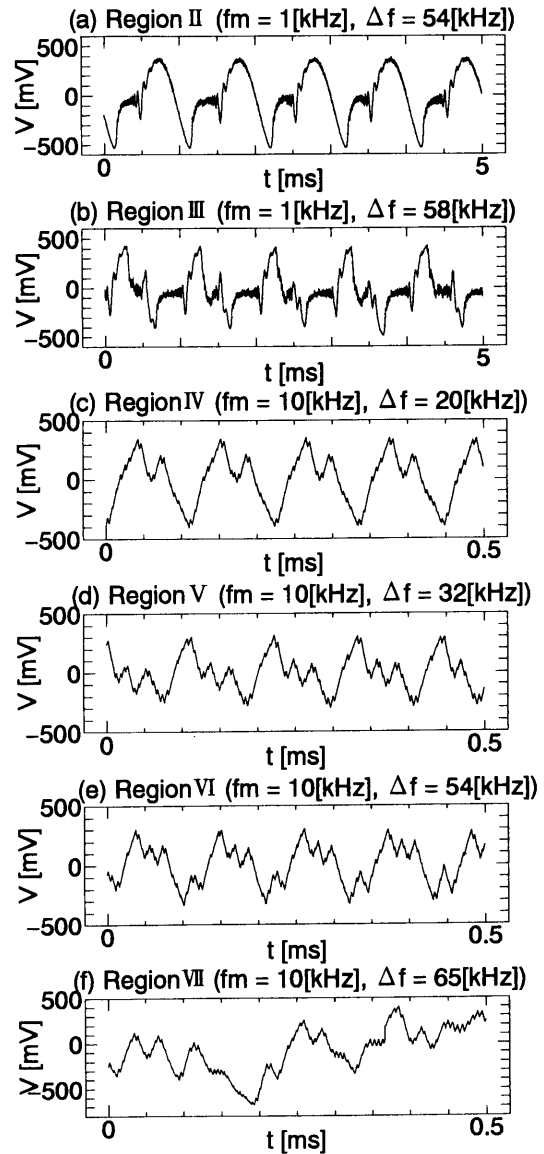


Fig.4 Output wave form ( $f_c = 100\text{kHz}$ ,  $A = 200\text{mV}$ ).

### 3. ノイズ印加による復調回復現象

理想的な位相比較器は位相差のみを検出する回路であり, 入力信号の振幅の影響は受けない. しかし実際の回路において入力振幅を下げていくと, ついに復調波が得られなくなってしまう. Fig. 7は, 変調周波数 $f_m$ と変調の深さ $\Delta f$ に関する状態図である. 曲線は様々な入力信号の振幅 $A$ における, 復調限界を表す境界線である. 曲線より上側が復調不可能領域, 下側が復調可能領域である. この図から分かるように振幅が小さくなる, 即ち入力信号が弱くなるにつれて, 完全な復調に成功する領域は狭くなる. この復調波形の得られない領域で, ノイズを加えた場合の出力特性について実験を行った.

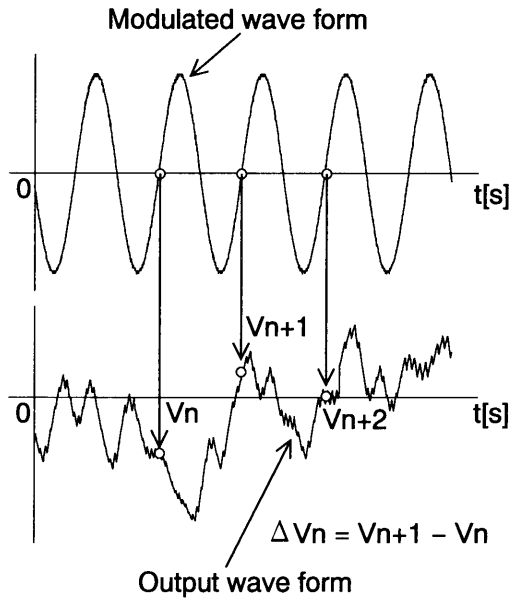


Fig.5 Modulated and output wave form.

Fig. 8にノイズを変調信号に重畳するための回路を示す。FM復調回路部分は、Fig. 2と同一のものである。

まず、この回路におけるロックレンジと、キャプチャレンジを調べた。ロックレンジとは入力信号が正弦波である場合、入力信号とVCOの発振が同期している状態において、入力信号の周波数とVCOの自走発振周波数が大きくなって行くとき、PLLがどれだけの周波数差まで同期を保持できるかを示すもので、同期保持範囲とも呼ばれる。一方キャプチャレンジは、非同期状態からの周波数引き込み可能範囲のことである。

Fig. 9の点線と1点破線は、それぞれロックレンジとキャプチャレンジを表している。また実線は変調の深さ  $\Delta f$  を固定し、式(1)で表される変調波を入力した際に、完全な復調ができる境界である。曲線の上側が復調可能領域、下側が不可能領域である。ここでは2通りの変調周波数について調べた。変調周波数が小さくなると、境界線が点線のロックレンジに近づいていくことが分かる。

次にこのFig. 9のa~eの5点において、ノイズを印加した場合の出力特性を調べた。Fig. 8の加算回路を用いることにより、PLL-ICに入力される入力信号は、ノイズ信号を  $\eta(t)$  とすると次式で記述される。

$$V_{in}(t) = A \sin[2\pi f_c t + \frac{\Delta f}{f_m} \cos(2\pi f_m t)] + \eta(t) \quad (2)$$

実験では、ファンクションジェネレータ (HP33120A) を白色ノイズ源として用いた。ただし加算回路 (LF356N) の特性上5MHzに帯域制限されているため、入力信号に重畳されたノイズは、理想的な白色ノイズではない。

変調周波数  $f_m$  を1kHz、変調の深さ  $\Delta f$  を15kHzとした場合の実験結果をFig. 10に示す。横軸はノイズパワーの平方根  $P$  で、縦軸には相関係数  $R$  (変調波と復調波の同時

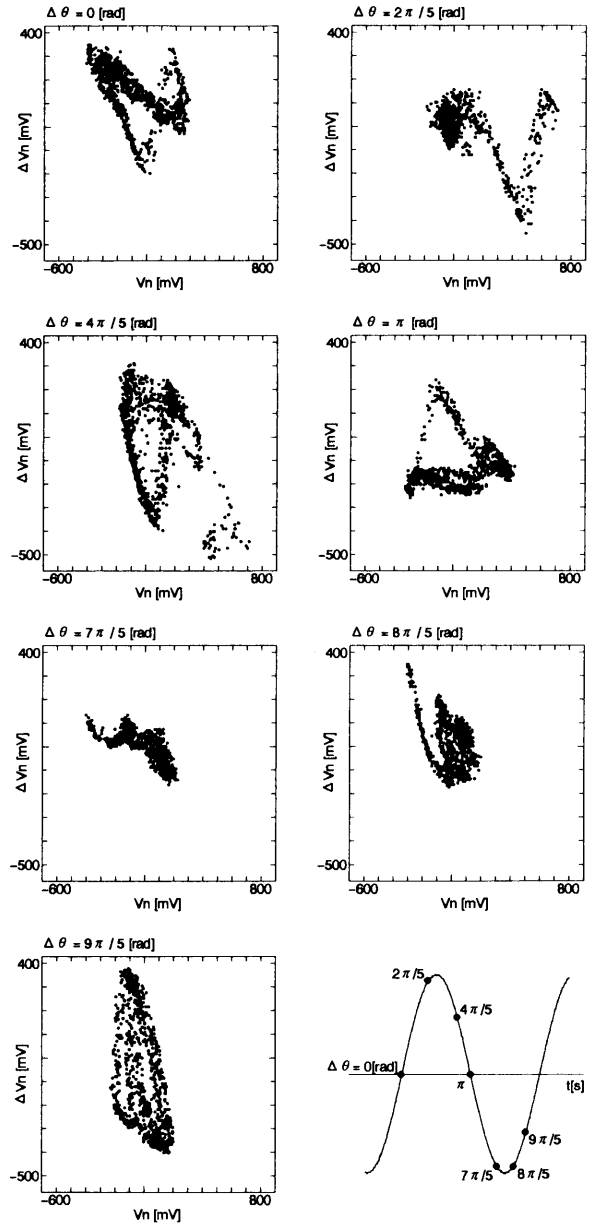


Fig.6 Poincaré maps with different cutting positions ( $f_m = 5\text{kHz}$ ,  $\Delta f = 50\text{kHz}$ ).

刻相関係数)をとっている。なお、 $P$ ,  $R$ はそれぞれ次式で表される。

$$P = \sqrt{\langle \eta(t)^2 \rangle} \quad (3)$$

$$R = \langle x(t)y(t) \rangle \quad (4)$$

ここで  $x(t)$  は規格化正弦波 (入力変調波)、 $y(t)$  は出力復調波であり、 $\langle \rangle$  は平均を表す。実際には、 $x(t)$ ,  $y(t)$  とともに  $2.0 \times 10^{-6}$  s 間隔で2,000点サンプリングしたデータを解析した。

Fig. 10の結果から (a) ではノイズを加えることにより、完全な復調波形が得られなくなっている。(b) と (c)

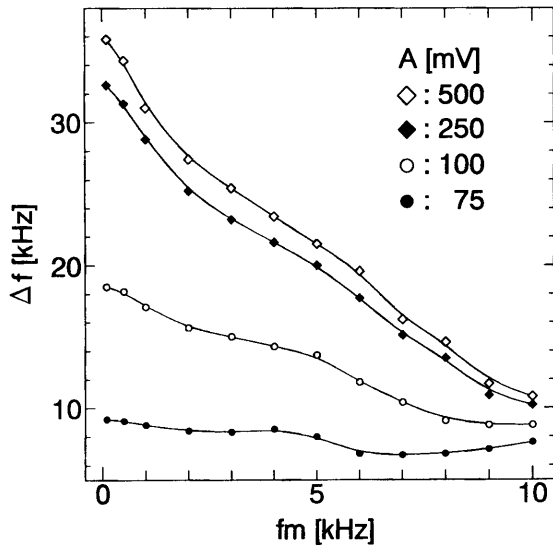


Fig. 7 State diagram ( $f_c = 85\text{kHz}$ ).

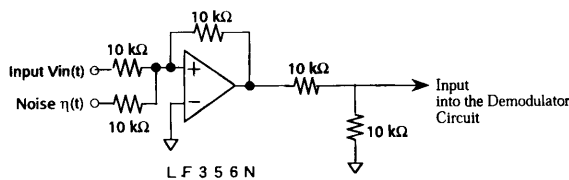


Fig. 8 Summation circuit.

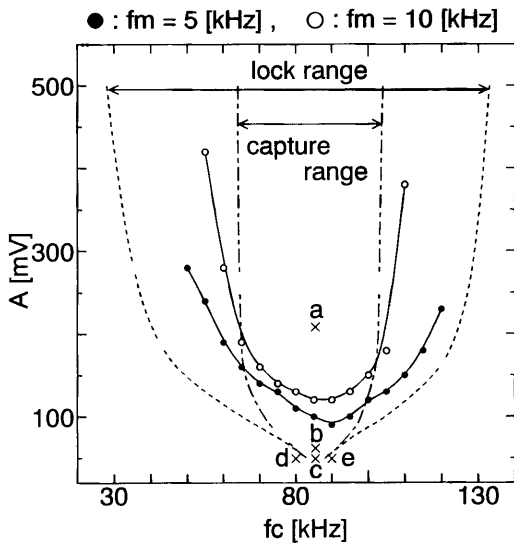


Fig. 9 Lock range and capture range ( $\Delta f = 15\text{kHz}$ ).

を比べると、境界に近い(b)の方が復調に成功している。また(c), (d), (e)の比較から、中心周波数に近い(d)が最も相関係数の曲線がシャープで、中心周波数から外れるにつれて、曲線はなだらかに、そして頂点の位置も低くなっていくのが分かる。さらに全体的な特徴として、

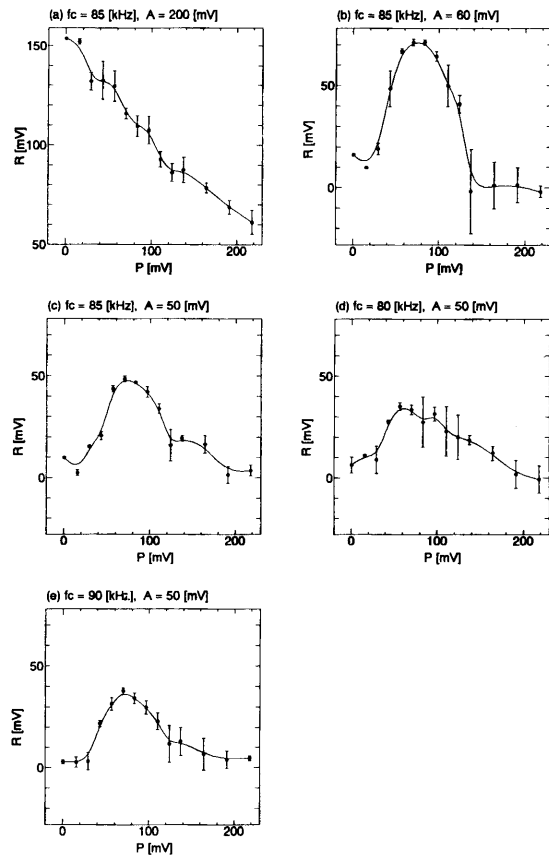


Fig. 10 Correlation coefficient vs. an amplitude of the input noise ( $f_m = 1\text{kHz}$ ,  $\Delta f = 15\text{kHz}$ ).

ノイズパワーを増加させていくとピークを過ぎた後に、確率的に同期が外れる傾向が見られる。誤差棒が大きくなっているのは、そのためである。

#### 4. ま と め

Fig. 11は、ノイズ印加時の復調波形の例である。この様にFM復調PLL回路において、ノイズ印加により復調出力特性が向上し、Fig. 10のような典型的なSR曲線に類似した結果が得られることが分かった。

SR現象は双安定なポテンシャルを有する非線形システムに見られる現象で、ノイズによる揺さぶりをかけることにより、システムの状態が他の安定点へ確率的に移動するために起きる現象である。今回用いたFM復調PLL回路において、SRに類似な現象が現れるメカニズムについては現在検討中である。また実験結果が従来のSR現象と同一のメカニズムで発生しているとは限らず、ノイズの印加により、系の非線形構造が変化している可能性も考えられる。たとえばノイズの相乗性<sup>11)</sup>による、分岐点(復調-非復調境界線)の移動等が生じているのかもしれない。このような可能性も含め、今回の実験結果の解析には、シミュレーションによる実験結果の再現、および理論解析が必要であり、これらは今後の課題である。

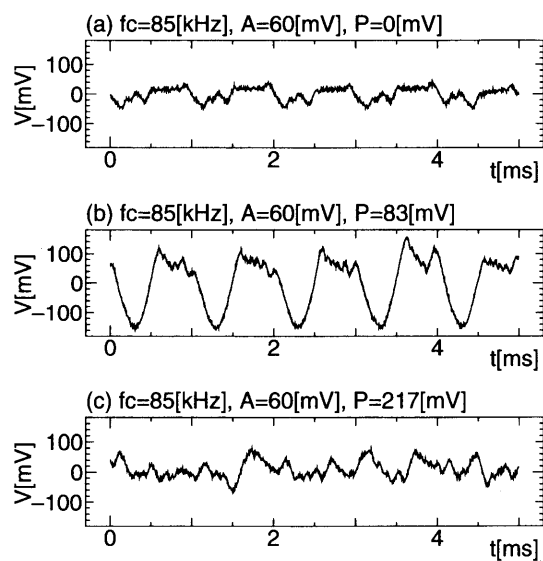


Fig.11 Demodulated wave forms in the presence of noise ( $f_m = 1\text{kHz}$ ,  $\Delta f = 15\text{kHz}$ ).

#### 参考文献

- 1) D. D'Humieres, M. R. Beasley, B. A. Huberman and A. Libchaber: "Chaotic State and Routes to Chaos in the Forced Pendulum" *Phys. Rev. A* **26** (1982) 3483.
- 2) M. Odyniec and L. O. Chua: "Josephson-Junction Circuit Analysis Via Integral Manifolds" *IEEE Trans. Circuits Syst.* **30** (1983) 308.
- 3) T. Endo, and L. O. Chua: "Chaos from Phase-Locked Loop" *IEEE Trans. Circuits Syst.* **35** (1988) 987.
- 4) A. D. Hibbs and A. L. Singaas: "Stochastic Resonance in a Superconducting Loop with a Josephson Junction" *J. Appl. Phys.* **77** (1995) 2582.
- 5) J. J. Collins, C. C. Chow, and T. T. Imhoff: "Stochastic Resonance without Tuning" *Nature* **376** (1995) 236.
- 6) J. F. Lindner, B. K. Meadows, and W. L. Ditto: "Array Enhanced Stochastic Resonance and Spatiotemporal Synchronization" *Phys. Rev. Lett.* **75** (1995) 3.
- 7) 畑 雅恭, 古川 計介: "PLL-IC の使い方" 秋葉出版 (1991).
- 8) 萩原 将文, 鈴木 裕一他: "実用 PLL 周波数シンセサイザ" 総合電子出版社 (1995).
- 9) "トランジスタ技術 SPECIAL No. 46" CQ 出版社 (1994).
- 10) H. G. Schuster: "Deterministic Chaos" VHC Publishers (1989).
- 11) W. Horsthemke, R. Lefever ed.: "Noise-Induced Transitions" Springer-Verlag (1984).

1) D. D'Humieres, M. R. Beasley, B. A. Huberman and A.

