

КОГЕРЕНТНО-УПРАВЛЯЕМАЯ НЕЛОКАЛЬНАЯ СВЯЗЬ
В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОСЦИЛЛЯТОРНЫХ СИСТЕМАХ
Coherence-Gated Nonlocal Coupling
in Multicomponent Oscillatory Systems
Автор: Кузнецов Григорий Михайлович
Author: Grigory M. Kuznetsov

Дата: 19.08.2026
Date: August 19, 2026

АННОТАЦИЯ

В работе предложена модель многокомпонентной фазовой синхронизации, в которой нелокальная связь между подсистемами описывается оператором когерентности

C
 γ
 C
 γ

, зависящим от глобального параметра порядка

R

R . Показано, что при достижении порога когерентности

γ
 $\geq$
7

$\gamma \geq 7$ эффективное взаимодействие перестаёт зависеть от пространственного расстояния

r
 i
 j
 r
 ij

. Модель допускает прямую численную проверку и может быть использована для описания синхронизации в распределённых физических и химических системах.

ABSTRACT

We propose a model of multicomponent phase synchronization in which nonlocal coupling between subsystems is described by a coherence operator

C
 γ
 C
 γ

depending on the global order parameter

R

R . It is shown that above the coherence threshold

γ
 $\geq$
7

$\gamma \geq 7$, the effective interaction becomes independent of spatial distance

r
 i
 j
 r

ij

. The model allows direct numerical verification and can be applied to synchronization in distributed physical and chemical systems.

1. ВВЕДЕНИЕ

Классические модели синхронизации, как правило, предполагают, что сила взаимодействия между осцилляторами убывает с расстоянием. Однако в ряде физических, химических и биологических систем наблюдается высокая степень согласованности, не объяснимая локальными связями.

В данной работе рассматривается гипотеза о существовании порога фазовой когерентности, выше которого эффективное взаимодействие перестаёт зависеть от расстояния.

1. INTRODUCTION

Classical synchronization models usually assume that interaction strength decreases with distance. However, several physical, chemical, and biological systems exhibit a high degree of coordination that cannot be explained by local coupling alone.

We consider the hypothesis of a phase-coherence threshold above which the effective interaction becomes independent of distance.

2. МОДЕЛЬ

Рассматривается система из

N

N осцилляторов, объединённых в

M

M подсистем. Состояние каждой подсистемы характеризуется фазой

θ

k

θ

k

.

Глобальный параметр порядка:

R

$=$

$|$

1

N

$\sum$

k

$=$

1

N

e

i

θ

k

$|$

R=

N
1

k=1
 $\sum$
N

e
 $i\theta$
k

Оператор когерентности:

C
 γ
=
R
 γ
C
 γ

=R
 γ

или в логистической форме:

C
 γ
=
1
1
+
e
-
 γ
(
R
-
R
 θ
)
C
 γ

=
1+e

$$-\gamma(R-R_0)$$

)

1

где

R_0

$\approx$

≈ 0.7

R_0

≈ 0.7

≈ 0.7

≈ 0.7 – критическое значение параметра порядка.

2. MODEL

We consider a system of

N

N oscillators grouped into

M

M subsystems. Each subsystem is characterized by phase

θ_k

θ_k

θ_k

θ_k

.

The global order parameter is:

R

$=$

$|$

1

N

$\sum$

k

$=$

1

N

e

i

θ_k

k

$|$

$R=$

N

1

$$\sum_{k=1}^N$$

$$e^{i\theta_k}$$

The coherence operator is:

$$C_Y = R_Y C_Y$$

$$= R_Y$$

or in logistic form:

$$C_Y = \frac{1}{1 + e^{-\gamma(R_Y - R_0)}}$$

$$= \frac{1}{1 + e^{-\gamma(R - R_0)}}$$

$$)$$

$$1$$

where

R

θ

$\approx$

$\theta.7$

R

θ

≈ 0.7 is the critical order parameter.

3. НЕЛОКАЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Эффективное взаимодействие между подсистемами:

G

$\sim$

K

$\cdot$

γ

$\cdot$

Σ

i

$<$

j

$\langle$

ψ

i

$|$

ψ

j

$\rangle$

r

i

j

α

$($

γ

$)$

$G \sim K \cdot \gamma \cdot$

$i < j$

Σ

r

$i j$

$\alpha(\gamma)$

$\langle \psi$

i

$|\psi$

j

)

При

γ

$\geq$

7

$\gamma \geq 7$:

α

(

γ

)

$\rightarrow$

0

$\alpha(\gamma) \rightarrow 0$

следовательно:

G

~

K

.

γ

.

Σ

i

<

j

<

ψ

i

|

ψ

j

)

$G \sim K \cdot \gamma$

$i < j$

Σ

$\langle \psi$

i

$|\psi$

j

)

Расстояние перестаёт входить в выражение.

3. NONLOCAL INTERACTION

The effective interaction between subsystems is:

G

~

$$\kappa \cdot \sum_{i < j} \langle \psi_i | \psi_j \rangle r_{ij} \alpha(\gamma)$$

$$G \sim \kappa \cdot \gamma \cdot \sum_{i < j} \langle \psi_i | \psi_j \rangle r_{ij} \alpha(\gamma)$$

$$r_{ij} \alpha(\gamma)$$

$$\langle \psi_i | \psi_j \rangle$$

$$r_{ij}$$

$$\text{For } \gamma \geq 7: \gamma \geq 7:$$

$$\alpha(\gamma) \rightarrow 0$$

therefore:

$$\begin{aligned} & G \\ & \sim \\ & K \\ & \cdot \\ & \gamma \\ & \cdot \\ & \sum \\ & i \\ & < \\ & j \\ & \langle \\ & \psi \\ & i \\ & | \\ & \psi \\ & j \\ & \rangle \\ & G \sim K \cdot \gamma \cdot \\ & i < j \\ & \sum \end{aligned}$$

$$\langle \psi_i$$

$$|\psi_j$$

$$\rangle$$

Distance no longer appears in the expression.

4. ЧИСЛЕННАЯ ПРОВЕРКА

Предлагается следующий численный эксперимент:

Задать

M

=

16

M=16 подсистем.

Инициализировать случайные фазы.

Рассчитать

R

R.

Рассчитать

C

Y

C

Y

для

γ
=
3
,
5
,
7
,
9
 $\gamma=3,5,7,9$.

Оценить корреляции между подсистемами в зависимости от расстояния.

Ожидаемый результат:

при
 γ
<
7
 $\gamma < 7$ корреляции убывают с расстоянием;

при
 γ
 $\geq$
7
 $\gamma \geq 7$ корреляции сохраняются.

4. NUMERICAL VERIFICATION

The following numerical experiment is proposed:

Set
M
=
16
M=16 subsystems.

Initialize random phases.

Compute
R
R.

Compute
C
 γ
C
 γ

for
 γ
=
3
,
5

,
7
,
9
 $\gamma=3,5,7,9$.

Estimate correlations between subsystems as a function of distance.

Expected result:

for
 γ
<
7
 $\gamma < 7$, correlations decay with distance;

for
 γ
≥
7
 $\gamma \geq 7$, correlations are preserved.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель показывает, что нелокальная фазовая связь может быть описана через оператор когерентности и порог

γ
≥
7
 $\gamma \geq 7$.

Модель является фальсифицируемой и допускает прямую численную проверку.

5. CONCLUSION

The proposed model demonstrates that nonlocal phase coupling can be described through a coherence operator and the threshold

γ
≥
7
 $\gamma \geq 7$.

The model is falsifiable and allows direct numerical verification.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА / KEYWORDS

фазовая когерентность, нелокальная связь, синхронизация, параметр порядка, порог когерентности, многокомпонентные системы

phase coherence, nonlocal coupling, synchronization, order parameter, coherence threshold, multicomponent systems

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Kuramoto Y. Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence. – Springer, 1984.

Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J. Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences. – Cambridge University Press, 2001.

Acebrón J.A. et al. The Kuramoto model: A simple paradigm for synchronization

phenomena. Rev. Mod. Phys. 77, 137 (2005).

Strogatz S.H. From Kuramoto to Crawford: exploring the onset of synchronization in populations of coupled oscillators. Physica D 143, 1 (2000).

Schrödinger E. What is Life? – Cambridge University Press, 1944.

Fröhlich H. Long-range coherence and energy storage in biological systems. Int. J. Quantum Chem. 2, 641 (1968).

Kuznetsov G.M., Kuznetsov Y.G. A Scale-Invariant Unified Field Formalism. Preprint, 2026.

Kuznetsov G.M., Kuznetsov Y.G. Life as Inevitability. Preprint, 2026.