

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

**Динамика мультиплексной сети бистабильных отображений и эффекты
синхронизации кластерных структур при шумовой накачке параметра
межслойной связи**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента(ки) 4 курса 4032 группы

направления 03.03.03 Радиофизика

Института физики

Стальмахович Артема Васильевича

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н., профессор _____ Т.Е. Вадивасова

Зав. кафедрой радиофизики

и нелинейной динамики,

д.ф.-м.н., доцент _____ Г.И. Стрелкова

Саратов 2021 г.

Оглавление

Введение	3
Целью выпускной квалификационной работы является	6
Исследуемая модель и методы численного эксперимента	6
Уравнения системы	6
Статистические характеристики источников цветного дискретного шума	8
Методы численного исследования	10
Результаты исследований	10
Исследование синхронизации в идентичных слоях	11
Исследование синхронизации в двух слоях с различными значениями коэффициентов внутрислойной связи	19

Введение

Синхронизация – фундаментальное нелинейное явление, характерное не только для взаимодействующих автогенераторов, но также для взаимодействующих

распределенных систем, для которых явление синхронизации колебаний во времени дополняется синхронизацией пространственных структур . В последние годы, в связи с развитием представлений о сложных сетях, встал вопрос о синхронизации слоев многослойных сетей, а также различных взаимодействующих между собой сетей . Важность исследования многослойных сетей связана с их широким использованием при моделировании многих реальных многокомпонентных систем, встречающихся в природе и технических приложениях .

Отдельные слои многослойных сетей могут представлять собой большие ансамбли нелинейных осцилляторов со сложной индивидуальной динамикой, соединенных нелокальными внутрислойными связями. В отсутствие межслойного взаимодействия в отдельных слоях могут устанавливаться сложные режимы с такими нерегулярными пространственными структурами как химерные состояния.

Химерные состояния представляют собой особый вид частичной синхронизации, для которого характерно сосуществование кластеров с почти синхронным поведением (когерентные кластеры) и с полностью несогласованными колебаниями (некогерентные кластеры). Впервые установленные в химерные состояния, оказались широко распространены в ансамблях нелокально связанных нелинейных осцилляторов, как с регулярной, так и с хаотической индивидуальной динамикой[1]. Химерные состояния наблюдались экспериментально в системах различной природы и могут играть существенную роль в динамике реальных систем. Так, с формированием химерных состояний связывают определенные режимы функционирования головного мозга.

Формирование химерных состояний в многослойных сетях и эффекты синхронизации слоев, демонстрирующих подобные режимы были исследованы в последние годы в ряде работ. В определенном смысле, классическое понятие синхронизации было обобщено на случай сложных кластерных структур во

взаимодействующих ансамблях и слоях многослойной сети.

Актуальной задачей на сегодняшний день является управление синхронизацией сложных кластерных структур, включая химерные состояния, в многослойных сетях. Эта задача еще сравнительно мало изучена. Можно отметить работы, в которых используются адаптивные связи и элементы связи с запаздыванием. Управление синхронизацией режимов в слоях сети возможно также с использованием случайных факторов, например, при соответствующем выборе статистики случайных переключений связей внутри слоев, а в случае невзаимодействующих слоев, с помощью некоррелированных шумовых внешних воздействий. Одним из способов влияния на межслойную связь, и, соответственно, управления эффектом синхронизации пространственно-временной динамики слоев, может быть модуляция параметра связи. Известно, что высокочастотное периодическое параметрическое воздействие на элемент связи может привести к стабилизации колебаний в инвариантном подпространстве, соответствующем полной синхронизации взаимодействующих систем. Аналогичные эффекты наблюдались также в ансамбле осцилляторов. В то же время, при определенных условиях, периодическая модуляция связи в ансамбле осцилляторов может привести к десинхронизации. Применительно к взаимодействующим ансамблям и слоям сети, насколько удалось установить, влияние параметрического воздействия на связь между ними не рассматривалось.

Кроме периодической модуляции параметра связи существенную роль может играть случайная модуляция. Источники шума присутствуют в элементах связи любой реальной системы. Например, существенную роль источники шума могут играть при взаимодействии различных групп нейронов. В работе [2] была исследована шумовая модуляция межслойной связи в сети хаотических логистических отображений. Установлены эффекты частичной и полной синхронизации химерных структур в случае идентичных слоев, а также установлена частичная синхронизация в случае неидентичных слоев. Показана

зависимость эффектов синхронизации от параметра, управляющего временем корреляции и шириной спектра шумового сигнала. Показана возможность управления режимом синхронизации сложных структур в сети логистических отображений с помощью параметров шумовой модуляции связи. Однако влияние параметрического шума на взаимодействие ансамблей и слоев многослойных сетей еще недостаточно исследовано. Рассмотрен только один тип химерных структур – фазовые химеры в сети хаотических отображений. Не исследован вопрос, о том, будут ли наблюдаться подобные эффекты синхронизации при случайной модуляции связи в сети, составленной из элементов с иным типом динамики, например, из бистабильных элементов. Известно, что в ансамблях и сетях бистабильных осцилляторов реализуется другой тип химерных состояний, названный двухъямными химерами и описанный в [1]. Исследование эффекта синхронизации двухъямных химерных структур в сети кубических отображений посредством шумовой модуляции силы межслойного взаимодействия, анализ влияния спектрально-корреляционных свойств шума и возможности управления эффектами синхронизации при вариации параметров шума представляет интересную и важную задачу в области нелинейной теории колебаний и теории флуктуаций в нелинейных системах.

В выпускной квалификационной работе рассматривается влияние цветного шума в элементах межслойной связи на эффект синхронизации слоев мультиплексной сети. В качестве модели сети взята простейшая двухслойная мультиплексная сеть кубических отображений. В мультиплексной сети слои состоят из одинакового числа узлов, а взаимодействие между слоями осуществляется посредством локальной попарной связи узлов из двух слоев. Коэффициент межслойной связи модулируется шумовым сигналом, создаваемым цветным дискретным источником гауссова шума.

Целью выпускной квалификационной работы является

- Исследование синхронизации сложных кластерных структур в двух слоях сети хаотических бистабильных отображений при случайном характере межслойных связей, интенсивность которых задается независимыми источниками цветного шума.
- Исследование влияния спектральных характеристик шума на эффекты синхронизации структур.
- Анализ возможностей управления синхронизацией сложной пространственно-временной динамики распределенных систем с помощью вариации параметров шумовой компоненты связи.

1. Исследуемая модель и методы численного эксперимента

1.1. Уравнения системы

Рассматривается мультиплексная двухслойная сеть, составленная из двух слоев (колец) идентичных кубических отображений с диссипативной нелокальной связью элементов в слое и случайной связью между элементами двух слоев. Уравнения системы имеют вид:

$$\begin{aligned}x_{j1}(n+1) &= f(x_{j1}(n)) + \frac{\sigma_1}{2P} \sum_{k=j-P}^{j+P} [f(x_{k1}(n)) - f(x_{j1}(n))] + k(y_j) [f(x_{j2}(n)) - f(x_{j2}(n))], \\x_{j2}(n+1) &= f(x_{j2}(n)) + \frac{\sigma_2}{2P} \sum_{k=j-P}^{j+P} [f(x_{k2}(n)) - f(x_{j2}(n))] + k(y_j) [f(x_{j1}(n)) - f(x_{j2}(n))], \\y_j(n+1) &= (1-\gamma)y_j(n) + \sqrt{2\gamma}\xi_j(n), \quad j = 0, 2, \dots, N-1, \\f(x) &= (\alpha - x^2)x \exp\left(-\frac{x^2}{10}\right), \quad k(y) = k_0 + D\sqrt{1-\frac{\gamma}{2}}y,\end{aligned}\tag{1}$$

Граничные условия: $x_{j\pm N,i}(n) = x_{j,i}(n)$, $i = 1, 2$.

Здесь j — номер элемента в слое (пространственная координата), n —

дискретное время, x_{ji} - динамическая переменная, задающая состояние элемента с номером j в слое с номером $i = 1, 2$ в каждый момент времени n , $f(..)$ — функция, описывающая динамику элемента (кубическое отображение), α - параметр отображений, σ_i — коэффициент внутрислойной связи элементов в i -м слое, P — число соседей элемента в одном слое с каждой стороны, k_0 — постоянная составляющая коэффициента межслойной связи элементов 1-го и 2-го слоев. Для двух слоев коэффициенты внутрислойной связи могут быть разными. Все остальные параметры слоев предполагаются одинаковыми.

Для каждой j -ой пары элементов двух слоев коэффициент межслойной связи k_j имеет случайную составляющую, задаваемую величиной

$$\eta_j = D\sqrt{1-\gamma/2}y_j, \quad (2)$$

где y_j — источник нормированного цветного дискретного шума, D — параметр, регулирующий интенсивность шума. Все цветные источники задаются идентичными уравнениями, содержащими независимые источники дискретного белого шума ξ_j со стандартным гауссовым распределением (среднее значение распределения равно нулю, а дисперсия единице), параметру управляет шириной спектра и временем корреляции источников цветного шума.

Фиксированные параметры

- Размер слоев ансамбля: $N = 1000$
- Параметр элементов: $\alpha = 2,4$ (что соответствует бистабильности с двумя предельными циклами периода 4 для отдельно взятого отображения)
- Параметры внутрислойной связи: $\sigma_1 = 0.42$ (коэффициент связи в первом слое); $\sigma_2 = 0.42$ или $\sigma_2 = 0.2$ (коэффициент связи во втором слое);
- $P = 100$ (число соседей элемента с каждой стороны внутри слоя)
- Параметр межслойной связи: $k_0 = 0.0$ (постоянная компонента коэффициента межслойной связи).

Управляющие параметры

Интенсивность случайной связи между кольцами D и параметр цветного шума будут рассматриваться как управляющие и меняться в ходе исследований.

1.2. Статистические характеристики источников цветного дискретного шума

Для дискретного источника шума $y(n)$, задаваемого линейным отображением

$$y(n+1) = (1-\gamma)y(n) + \sqrt{2\gamma}\xi(n), \quad (3)$$

где $\xi(n)$ — дискретный белый шум со стандартным гауссовым распределением, в стационарном режиме легко получить следующие статистические характеристики: среднее значение $\langle y(n) \rangle$ равно нулю, дисперсия шума определяется выражением

$$\text{var}_y = \frac{2}{2-\gamma}, \quad (4)$$

а корреляционная функция описывается экспонентой

$$\Psi_y(m) = \text{var}_y \exp(-\beta |m|), \quad \beta = -\ln(1-\gamma). \quad (5)$$

Таким образом, время корреляции m_{corr} , определяемое как величина обратная декременту экспоненты (5) ($m_{corr} = 1/\gamma$), и, соответственно, спектральные свойства шума управляются параметром γ . При $\gamma = 1$ шум $y(n)$ становится белым: время корреляции обращается в ноль, а ширина спектра — в бесконечность. Как следует из выражения (4), дисперсия var_y в этом случае равна двум. При малых значениях γ приближенно получаем $\text{var}_y \approx 1$. Примеры реализаций дискретного цветного шума во времени $y(n)$ и нормированных спектров мощности шума, рассчитанных численно для трех значений параметра

γ , приведены на рис.1

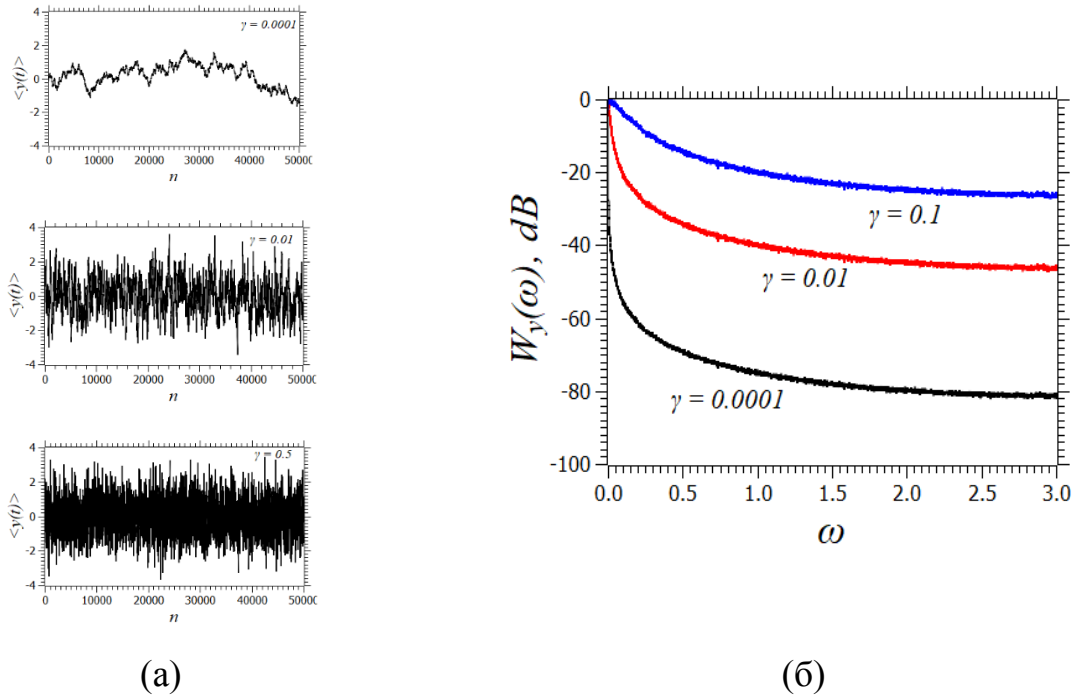


Рисунок.1. Характеристики дискретного цветного шума: реализации шума (а) и нормированные спектры мощности для трех значений параметра γ (б)

При выбранных характеристиках источника шума $y(n)$ дисперсия случайной составляющей коэффициента связи, задаваемой выражением (2), равна величине D^2 .

1.3. Методы численного исследования

В работе планируется исследовать эффект частичной синхронизации режимов в двух идентичных слоях. Для количественной оценки степени синхронизации слоев рассчитывалась средняя по элементам слоев и по времени погрешность синхронизации δ , определяемая по формуле:

$$\delta = \frac{1}{n_{it}} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n_c} \sum_{j=0}^N (x_{j2}^{(n)} - x_{j1}^{(n)})^2, \quad (6)$$

где n_{it} — число итераций, для которых проводилось усреднение.

В установившемся режиме величина δ характеризует отклонение пространственно-временных колебаний взаимодействующих слоев сети от полной синхронизации,

2. Результаты исследований

Было проведено численное моделирование динамики сети (1) при выбранных значениях параметров с помощью специально написанной программы на языке Си. При этом связь между слоями полагалась чисто случайной ($k_0 = 0$). В этом случае сила связи элементов с номерами j в двух слоях определяется последовательностью случайных величин

$$k[y_j(n)] = D\sqrt{1 - \frac{\gamma}{2}} y_j(n)$$

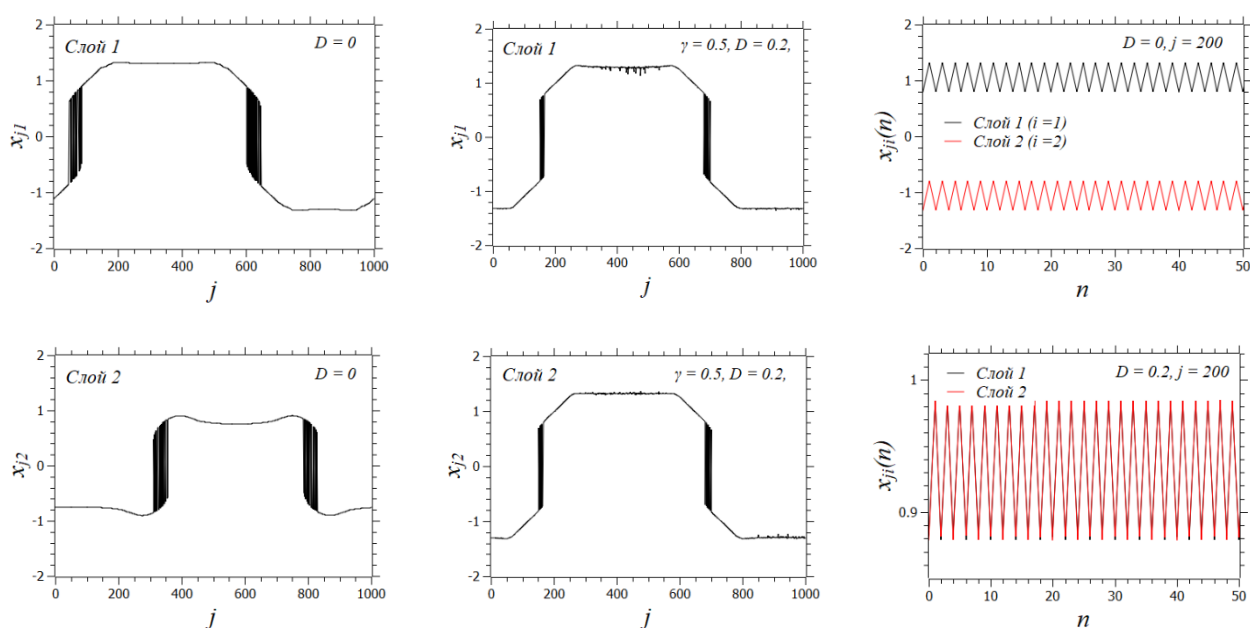
с нулевым средним значением и дисперсией D . Величину D будем называть интенсивностью шумовой модуляции связи или просто интенсивностью шума. Время корреляции и ширина спектра случайных коэффициентов связи управляется параметром γ . Для задания источников шума $\xi_j(n)$ использовался стандартная программа генерации случайных чисел `gasdev.h`, создающая последовательность некоррелированных величин со стандартным гауссовым распределением.

2.1. Исследование синхронизации в идентичных слоях

Был исследован случай двух идентичных слоев сети (1) при указанных выше параметрах и выбраны начальные условия, при которых в слоях в отсутствии взаимодействия ($D = 0$) устанавливаются химерные состояния с различающимися структурами когерентных и некогерентных кластеров. Эти химерные состояния соответствуют двухъямным химерам, описанным в [28]. Элементы слоя, принадлежащие некогерентным кластерам, совершают колебания в окрестности различных точек равновесия (в разных

«потенциальных ямках»). Распределение соседних элементов между двумя областями является нерегулярным. Колебания во времени в выбранном режиме были периодическими с периодом 2.

Химерные состояния во невзаимодействующих слоях проиллюстрированы на Рис.2. На фрагменте (а) приведены мгновенные пространственные профили в двух слоях, на фрагменте (в) в верхнем ряду приведены реализации колебаний во времени для элементов двух слоев с номерами $j = 200$. При включении случайной межслойной связи можно наблюдать частичную синхронизацию пространственно-временной динамики слоев, что отражено на Рис.2 (б) и на нижнем фрагменте Рис.2 (в).



(а)

(б)

(в)

Рисунок 2. Мгновенные пространственные профили в двух идентичных слоях сети (1) в отсутствии связи между слоями ($k_0 = 0$, $D = 0$) (а) и при случайной связи с параметрами $k_0 = 0$, $D = 0.2$ (б). Колебания элементов двух слоев с номером $j = 200$ приведены на фрагментах (в) в отсутствии связи (вверху) и при случайной связи с параметрами $k_0 = 0$, $D = 0.2$ (внизу). Другие параметры системы (1): $N = 1000$, $\alpha = 2.4$, $\sigma_2 = \sigma_1 = 0.42$, $P = 100$, $\gamma = 0.01$. Время установления режимов без связи $i_{00} = 20000$. Время установления после введения межслойной связи в случае (б) есть $i_0 = 20000$

Была исследована эволюция режимов в двух слоях при увеличении интенсивности случайной связи D . Примеры изменения формы пространственных профилей во взаимодействующих слоях с ростом D для различных значений параметра γ приведены на Рис.3 - Рис.7.

При малом значении $\gamma = 0.0001$ (Рис.3) можно видеть следующее: при слабой случайной связи ($D = 0.1$) расположение однотипных кластеров в двух слоях становится ближе. При этом некогерентные кластеры сохраняются.

С ростом D происходит следующее: кластеры исчезают, а структура выстраивается одинаково в обоих слоях, но на фоне кластера возникают отдельные выбросы- уединенные состояния.

Далее возрастает число уединенных состояний, которые остаются различными в двух структурах. При малом γ достаточно хорошая синхронизация не наблюдается, таким образом, ошибка синхронизации велика.

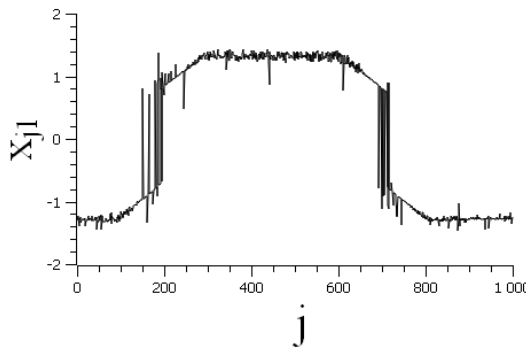
При $\gamma = 0.001$ (Рис.4) наблюдается примерно та же эволюция, только при $D = 0.1$ кластеры структуры становятся ближе друг к другу, при этом исчезают некогерентные кластеры.

Дальше с ростом интенсивности шума наблюдается тот же процесс возникновения уединенных состояний. Как видно на рисунках, при $D = 0.1$

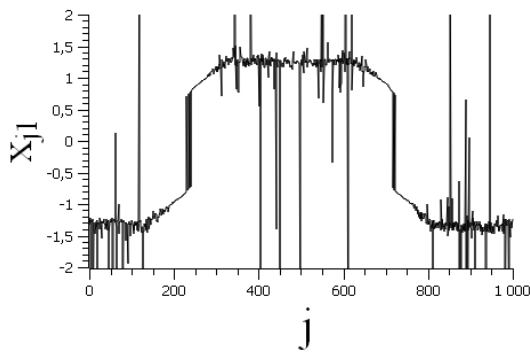
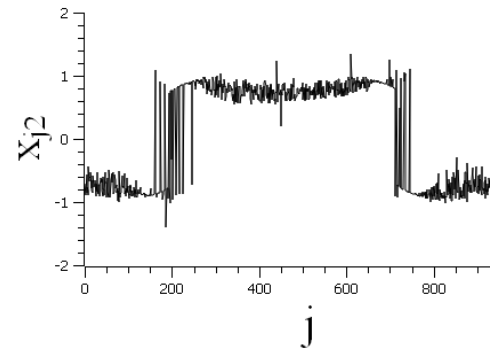
уединенных состояний всего одно, а с ростом D их становится очень много. И опять мы не наблюдаем синхронизацию с достаточно малой ошибкой, из-за того, что уединенные состояния не синхронизированы.

Слой 1

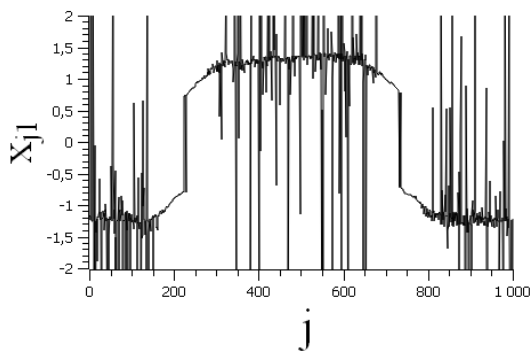
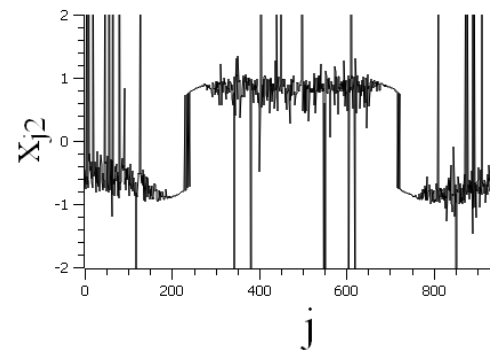
Слой 2



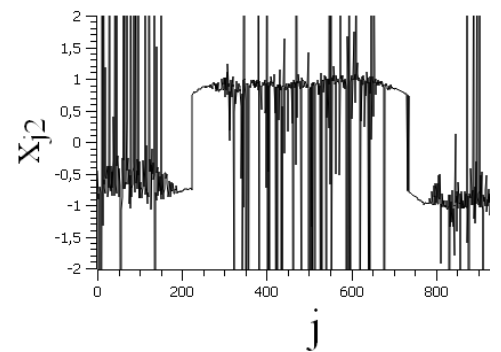
$D = 0.1$



$D = 0.2$



$D = 0.3$



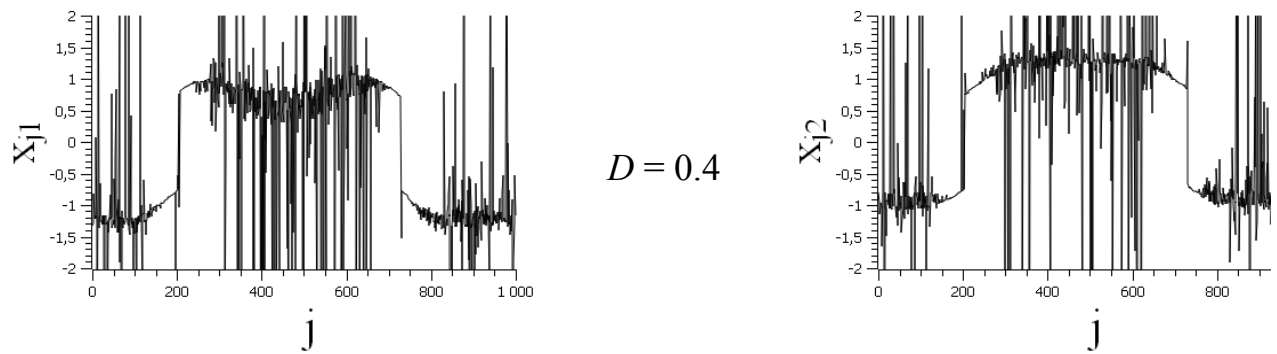


Рисунок 3. Мгновенные пространственные профили в двух идентичных слоях сети при случайной связи с параметрами $\gamma = 0.0001$, $k_0 = 0$ и различными значениями D .

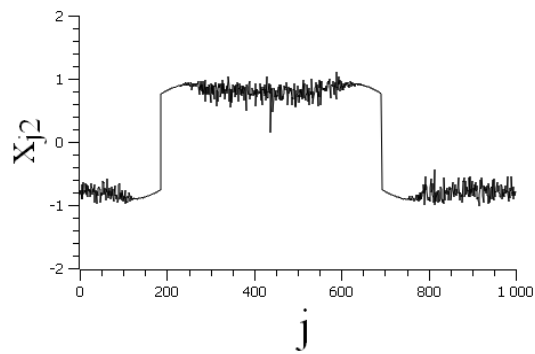
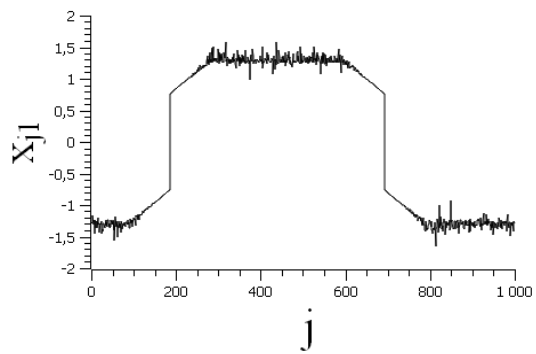
При $\gamma = 0.001$ и $\gamma = 0.01$ эволюция носит тот же характер, что и при $\gamma = 0.1$ (Рис.5), только исчезают кластеры и возникают уединенные состояния. С ростом γ их становится несколько меньше, синхронизация с малой ошибкой не достигается, за счёт того что они не синхронны.

При $\gamma = 0.1$ и при $D = 0.1$ (Рис.6) мы наблюдаем сближение кластеров, практически исчезают некогерентные кластеры. Эти структуры при $d = 0.2$ почти одинаковые включая уединённые состояния. При возрастании параметра D сохраняется небольшой кластер некогерентности, и продолжается рост числа уединенных состояний, которые несинхронизованны.

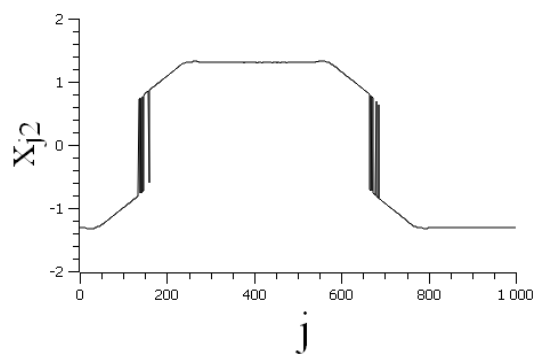
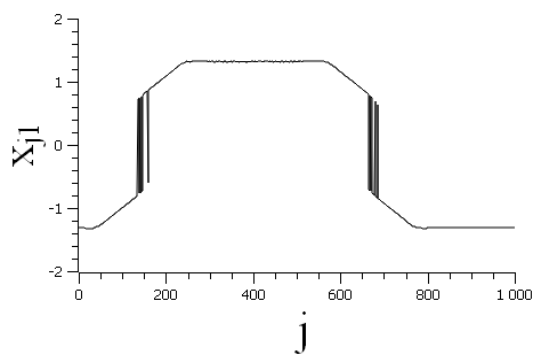
В случае белого шума $\gamma = 1$ (Рис.7), мы видим следующую эволюцию при малой интенсивности $d = 0.1$. Кластеры сближаются, а некогерентные кластеры исчезают, затем они снова возникают и в двух слоях образуются совершенно идентичные структуры. В данном случае имеет место полная синхронизация. При белом шуме мы тоже видим пару уединенных состояний, но они синхронизированы, что видно на Рис.7 при $D = 0.3$.

Слой 1

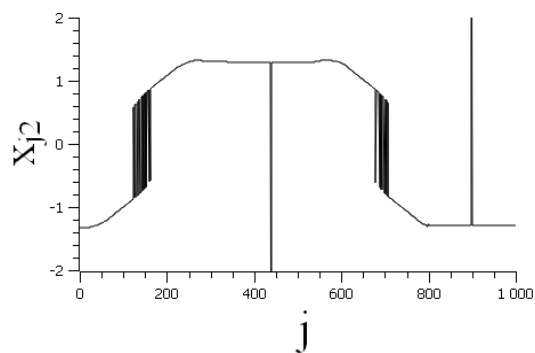
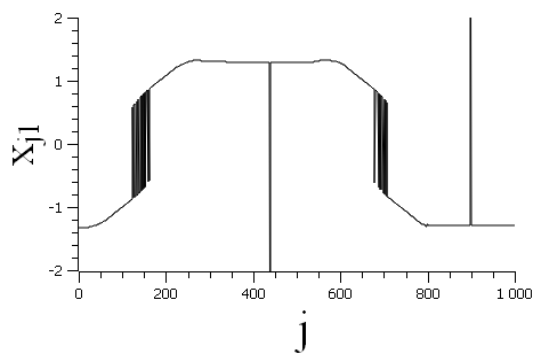
Слой 2



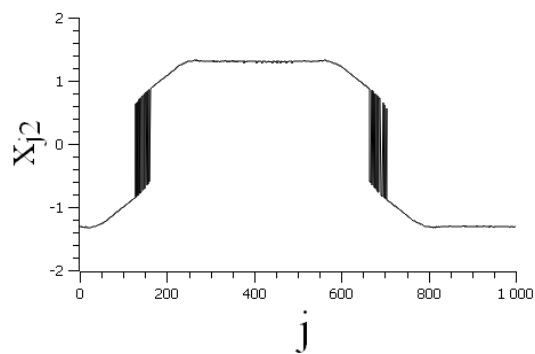
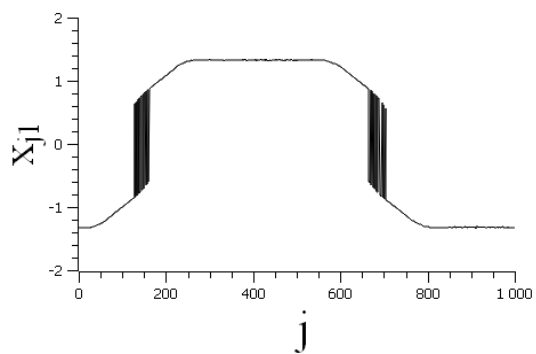
$D = 0.1$



$D = 0.2$



$D = 0.3$

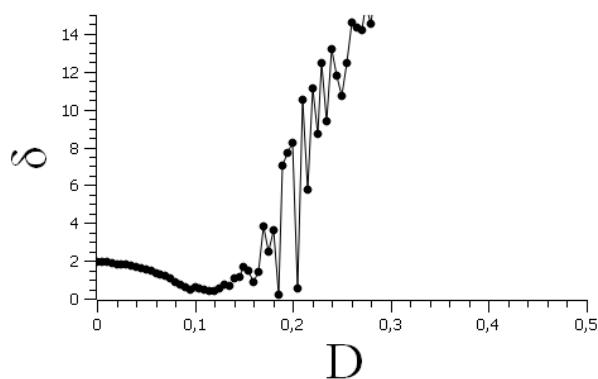


$D = 0.4$

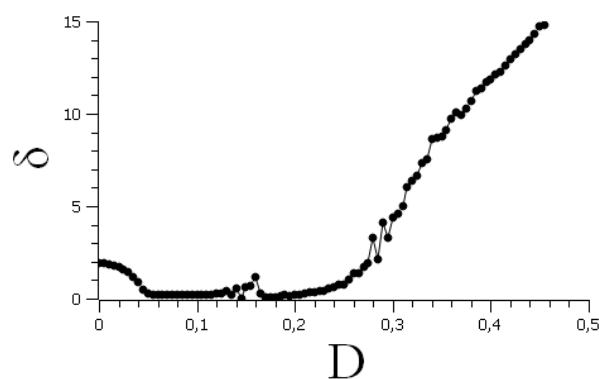
Рисунок 7. Мгновенные пространственные профили в двух идентичных слоях сети при случайной связи с параметрами $\gamma = 1.0$, $k_0 = 0$ и различными значениями D

Следующим шагом были построены зависимости ошибки синхронизации от интенсивности шума при различном γ , результаты приведены на Рис. 8. Они соответствуют представленным выше профилям. Видно, что имеется область наибольшей синхронизации-оптимальной синхронизации при некотором промежуточном значении интенсивности шума. Эта область расширяется с увеличением параметра γ .

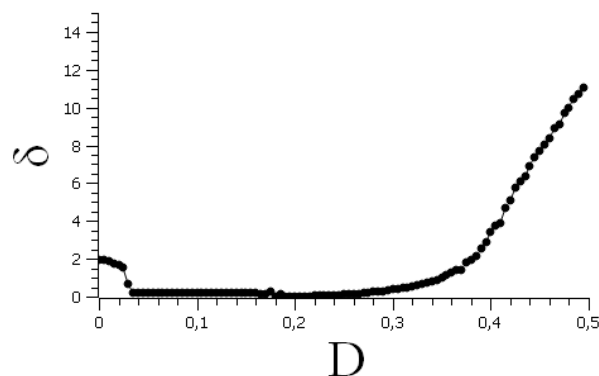
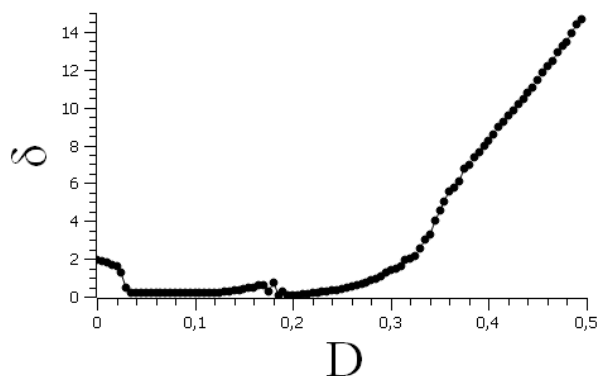
Ошибка синхронизации уменьшается и возникает область полной синхронизации, при больших γ , где δ равняется практически нулю (10^{-5}). При белом шуме эта область становится максимальной и в пределах интенсивности D мы не видим, чтобы синхронизация была нарушена.



$\gamma = 0.0001$



$\gamma = 0.001$



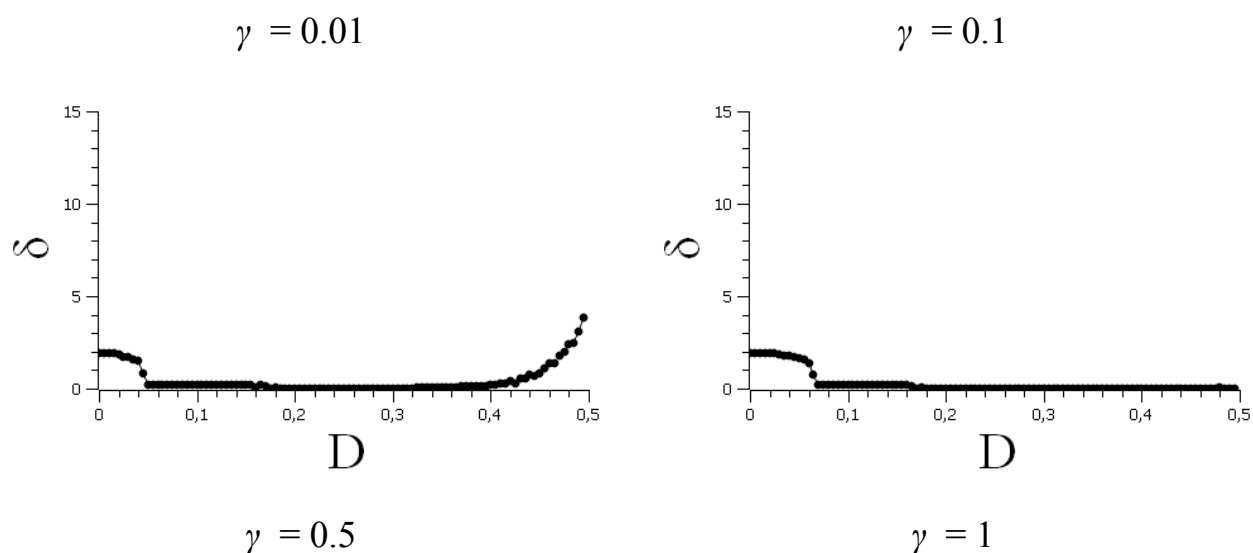


Рисунок 8. Зависимости погрешности синхронизации δ от интенсивности случайной связи D для различных значений параметра γ

Далее была построена область частичной синхронизации, по параметрам таблицы 1, с точностью $\delta < 0.1$, которая представлена на Рис. 9. Но нужно отметить, что при больших значениях γ близких к белому шуму, имеется область и полной синхронизации, но здесь она не представлена, так как её структура (границы) имеют сложный характер.

Таблица 1

γ	k_{ep1}	k_{ep2}
0.0004	0.17	0.17
0.0005	0.17	0.175
0.001	0.17	0.185
0.0032	0.165	0.19
0.01	0.19	0.195
0.032	0.21	0.215
0.1	0.19	0.24
0.2	0.17	0.285
0.32	0.17	0.325

0.5	0.17	0.37
0.8	0.165	0.45
1	0.17	1

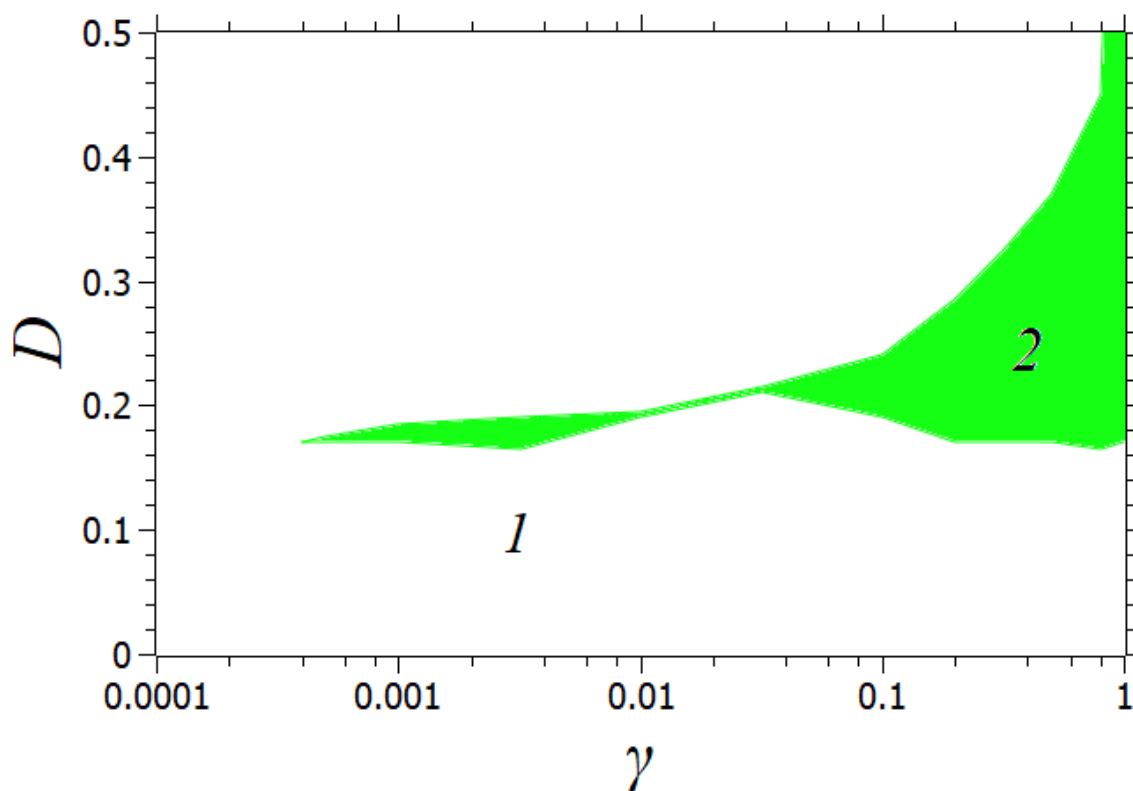


Рисунок 9. Области несинхронных и синхронных состояний (соответственно 1 и 2) в однородной сети (1) на плоскости параметров γ - D . Область 2 соответствует частичной синхронизации, определяемой условием $\delta \leq 0.1$. Параметры сети (1): $N = 1000$, $\omega = 2.4$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.42$, $P = 100$, $\gamma = 0.01$. Время установления после введения межслойной связи -- $i_0 = 20000$, время расчета величины i_l^{TM} -- $i_l = 10000$

2.2. Исследование синхронизации в двух слоях с различными значениями коэффициентов внутрислойной связи

Был исследован случай двух не идентичных слоев. Подбирались начальные условия в отсутствии взаимодействия слоев которые соответствуют режимам в первом слое химеры как и в идентичных слоях(как и в пункте 2.1). а

во втором слое реализовывалась совершенно другая структура.

Она представляет собой совершенно другой режим. Это режим неподвижных состояний, то есть режим без колебаний, с нерегулярным распределением между двумя областями или по другому, между двумя устойчивыми неподвижными состояниями. Структура представлена на Рис. 10а, колебания представлены на Рис. 10в (верхний фрагмент)

При введении связи режимы изменяются, и наблюдаются сложные структуры с частичной синхронизацией, которые представлены на Рис. 10б и колебания соответствующие элементу с номером $j = 200$ представлены на Рис 10в (нижний фрагмент).

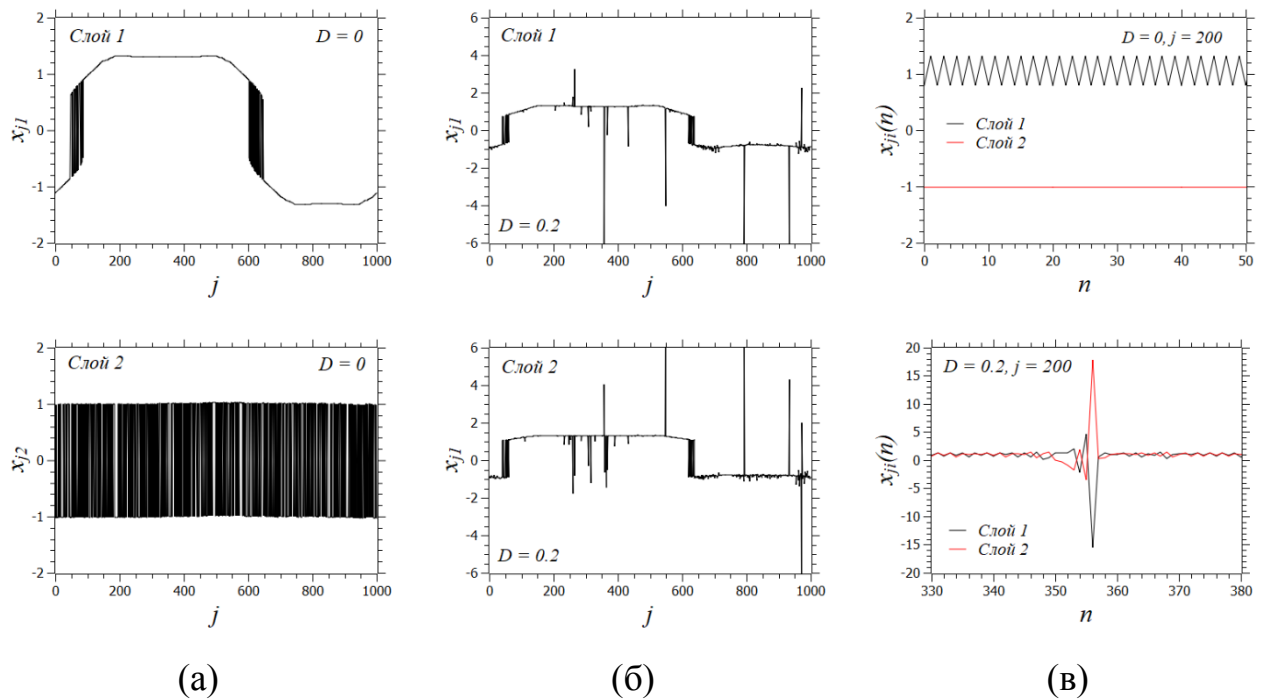


Рисунок 10. Мгновенные пространственные профили в двух неидентичных слоях сети (1) в отсутствии связи между слоями ($k_0 = 0$, $D = 0$) (а) и при случайной связи с параметрами $k_0 = 0$, $D = 0.2$ (б). Поведение во времени элементов двух слоев с номером $j = 200$ приведены на фрагментах (в) в отсутствии связи (вверху) и при случайной связи с параметрами $k_0 = 0$, $D = 0.2$ (внизу). Другие параметры сети (1): $N = 1000$, $\sigma_1 = 2.4$, $\sigma_2 = 0.42$, $P = 100$,

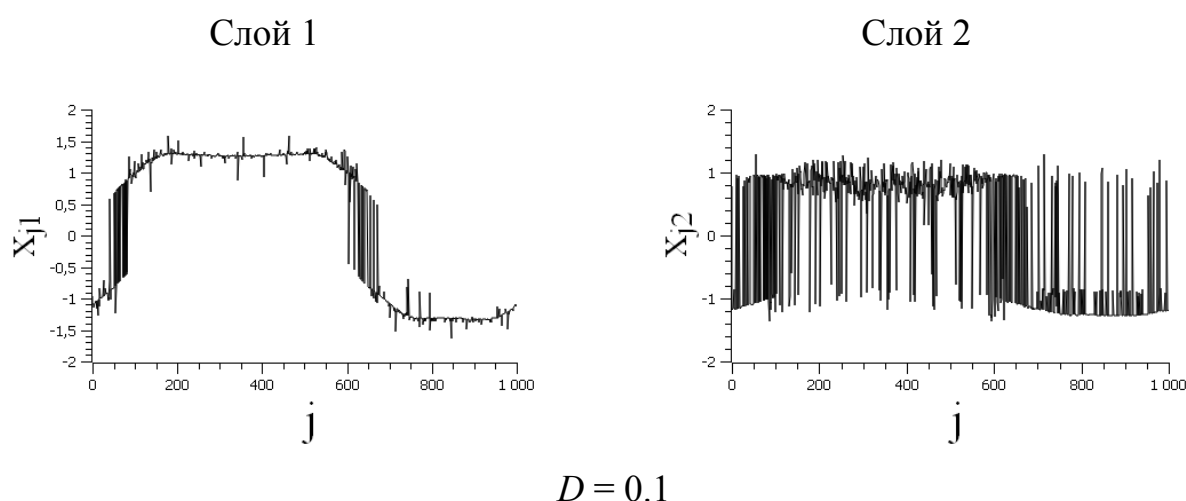
$\gamma = 0.01$. Время установления режимов без связи $i_{00} = 20000$. Время установления после введения межслойной связи в случае (б) есть $i_0 = 20000$

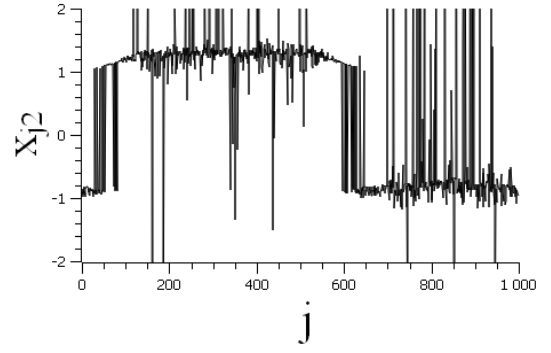
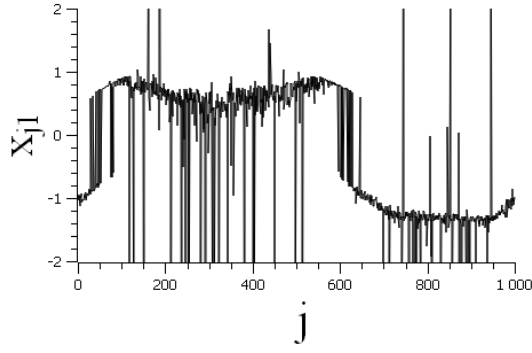
Далее была рассмотрена эволюция профилей, с ростом интенсивности шума при различном значении γ . При разных значениях γ , мы видим как начинает изменяться профиль во втором слое на фоне исходной структуры, прорисовывается кластерная структура характерная для первого слоя.

Дальнейшая эволюция аналогична случаю однородных идентичных слоев.

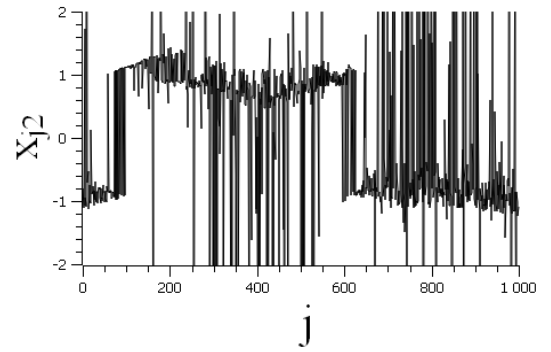
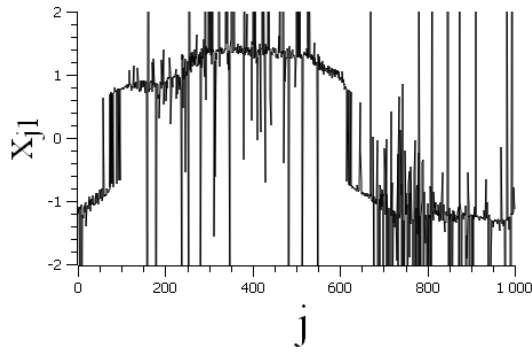
Для малого γ (Рис. 11), множество уединенных состояний наблюдается если они синхронизированы, с ростом γ (Рис. 12-14) число уединенных состояний уменьшается.

Число уединенных состояний больше при малой γ и больших D . Если γ увеличиваем их число уменьшается, но всё равно растёт с ростом D , но не так быстро.

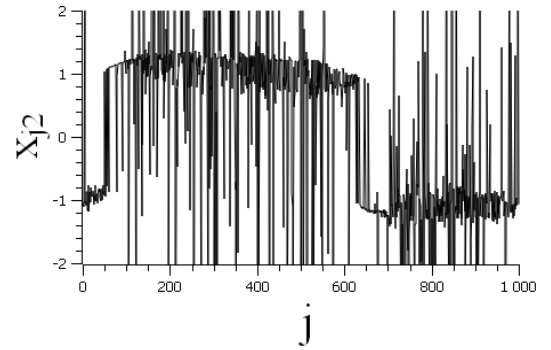
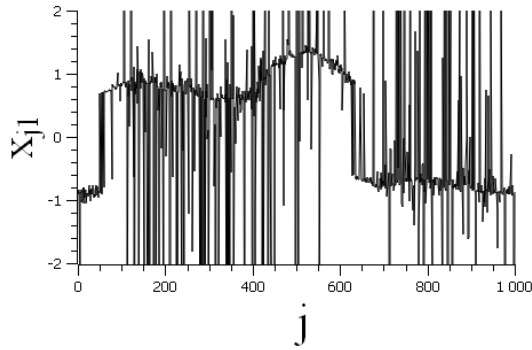




$D = 0.2$



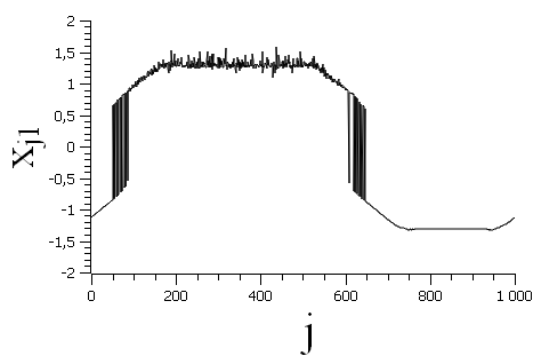
$D = 0.3$



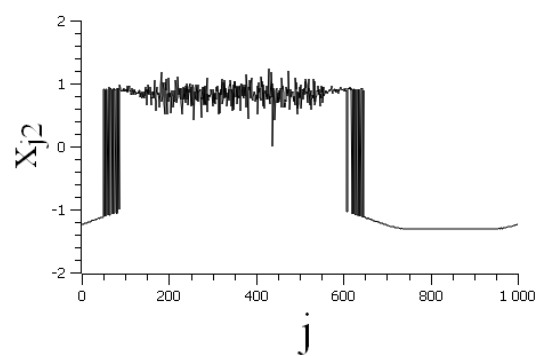
$D = 0.4$

Рисунок 11. Мгновенные пространственные профили в двух неидентичных слоях сети при случайной связи с параметрами $\gamma = 0.0001$, $k_0 = 0$ и различными значениями D

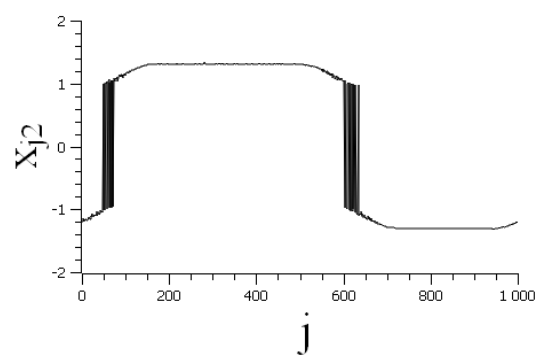
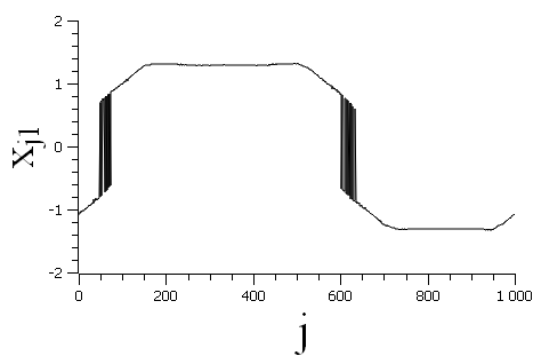
Слой 1



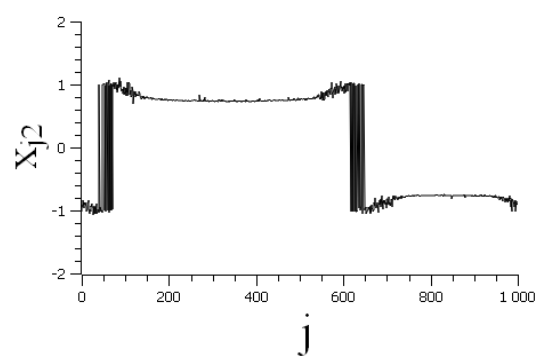
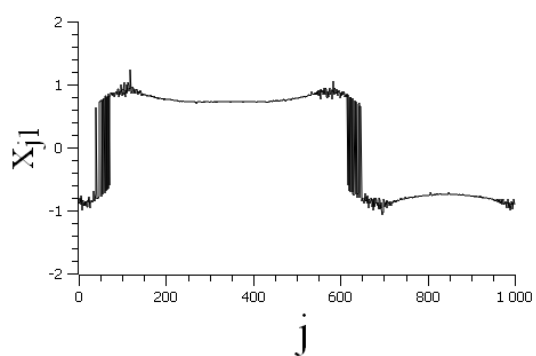
Слой 2



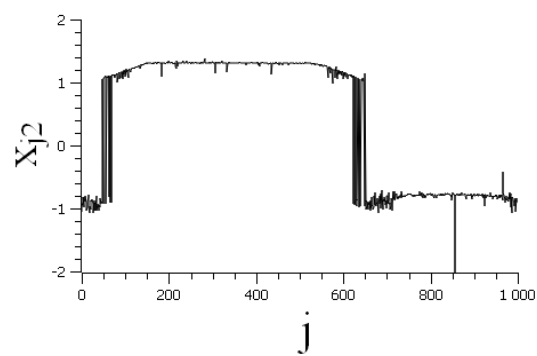
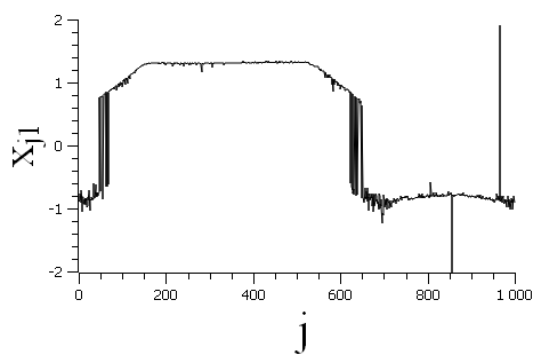
$D = 0.1$



$D = 0.2$



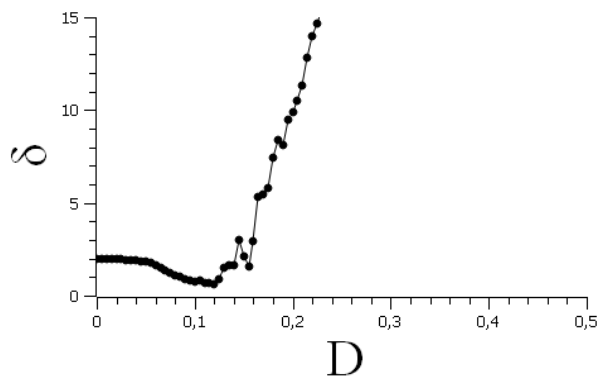
$D = 0.3$



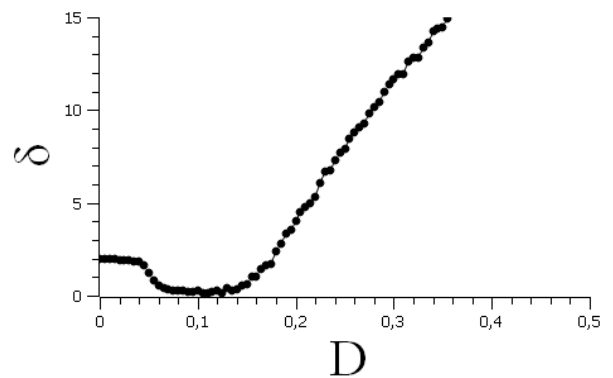
$$D = 0.4$$

Рисунок 15. Мгновенные пространственные профили в двух неидентичных слоях сети при случайной связи с параметрами $\gamma = 1.0$, $k_0 = 0$ и различными значениями D .

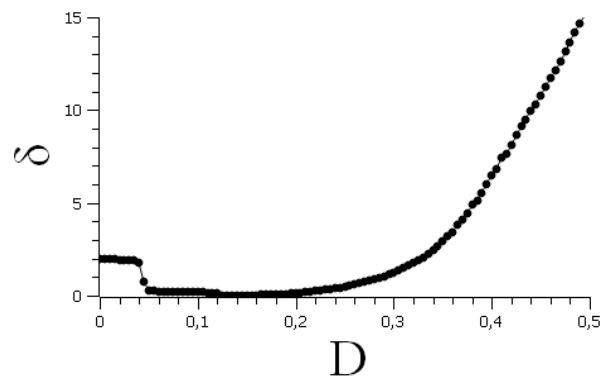
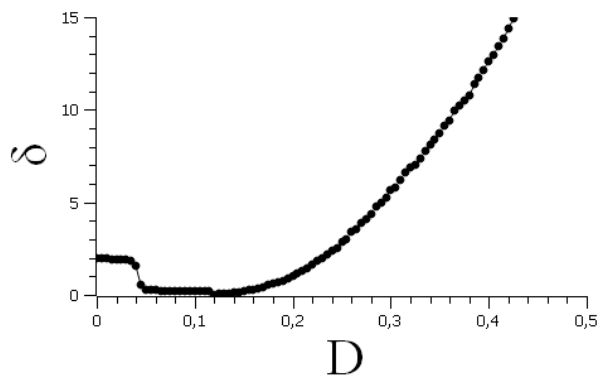
Так же как и для идентичных слоев, были построены зависимости ошибки синхронизации от интенсивности шума при различном γ , результаты приведены на Рис. 16. Видна та же тенденция, есть область где минимальна погрешность синхронизации, Эта область растёт с ростом γ и при белом шуме она становится максимальной, причём существуют значения γ близкой к единице, где достигается почти полная синхронизация.



$$\gamma = 0.0001$$



$$\gamma = 0.001$$



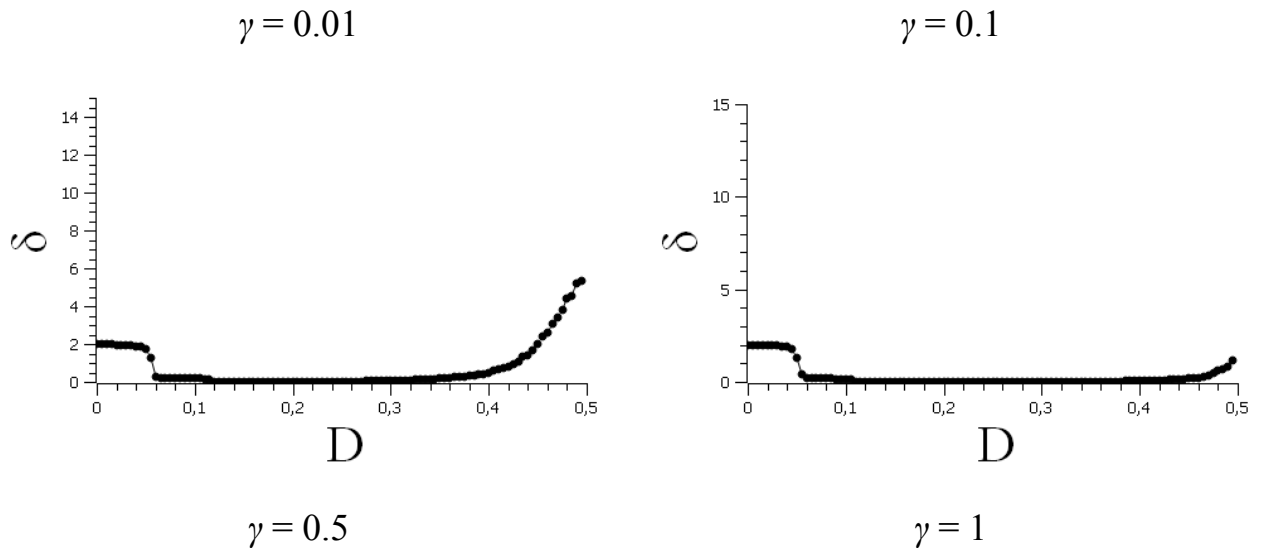


Рисунок 16. Зависимости погрешности синхронизации δ от интенсивности случайной связи D для различных значений параметра γ . Параметры сети (1): $N = 1000$, $\omega = 2.4$, $\sigma_1 = 0.42$, $\sigma_2 = 0.2$, $P = 100$, $\gamma = 0.01$.

Далее была построена область (по Таблице 2), где выполняется условие $\delta < 0.1$ (Рис. 17). Эта область не такая большая, как для идентичных слоев. Она наблюдается при несколько больших γ , и даже в случае белого шума она ограничена сверху. Можно отметить, что есть такие точки на плоскости параметров, где полная синхронизация наблюдается.

Таблица 2

γ	k_{ep1}	k_{ep2}
0.007	0.13	0.13
0.01	0.12	0.135
0.032	0.12	0.15
0.1	0.12	0.195
0.32	0.12	0.27
0.5	0.12	0.32
1.0	0.11	0.425

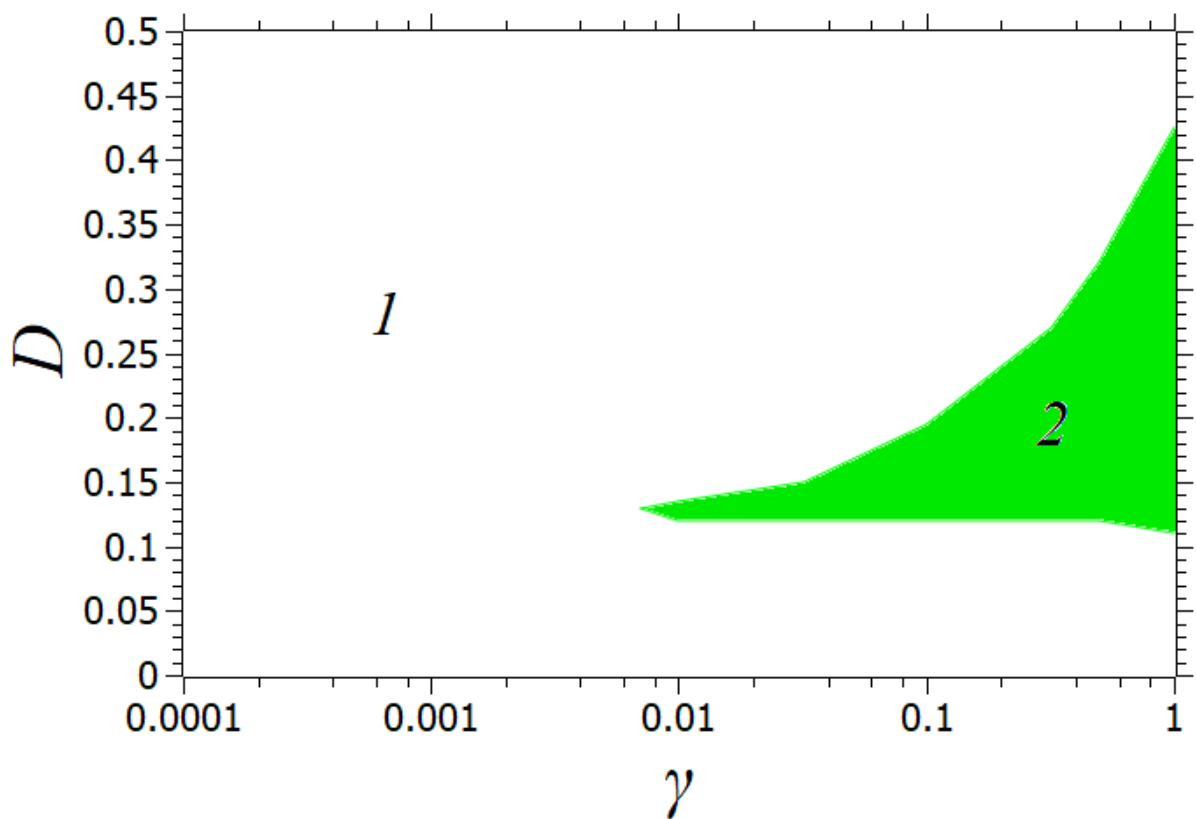


Рисунок 17. Области несинхронных и синхронных состояний (соответственно 1 и 2) в неоднородной сети (1) на плоскости параметров γ - D . Область 2 соответствует частичной синхронизации, определяемой условием $\delta \leq 0.1$. Параметры сети (1): $N = 1000$, $\mu = 2.4$, $\sigma_1 = 0.42$, $\sigma_2 = 0.2$, $P = 100$, $\gamma = 0.01$. Время установления после введения межслойной связи -- $i_0 = 20000$, время расчета величины δ -- $i_l = 10000$

Заключение

Было исследовано и рассмотрено влияние интенсивности спектрального состава, был установлен эффект синхронизации строгой и частичной. Частичная синхронизация рассматривалась с $\delta < 0.1$, была построена область синхронизации, помимо этого еще возможна строгая синхронизация которая

определялась критерием $\delta < 10^{-5}$.

Было установлено, что спектр шума оказывает существенное влияние на эффект синхронизации, в частности наиболее благоприятен для этого белый шум, что отлично от результата полученного в статье под номером 61.

-
- 1) I. A. Shepelev, A. V. Bukh · G. I. Strelkova, · T. E. Vadivasova · V. S. Anishchenko, Chimera states in ensembles of bistable elements with regular and chaotic dynamics // Nonlinear Dyn. 2017. Vol. 90(4). P.2317–2330.
 - 2) T. E. Vadivasova, A. V. Slepnev, A. Zakharova, Control of inter-layer synchronization by multiplexing noise //Chaos. 2020. Vol.30, 091101.