

Приложение П1

Открытие синхронизации Христиааном Гюйгенсом

В этом приложении мы приводим перевод оригинальных текстов Христиаана Гюйгенса [Huygens 1967a,b], где он описывает открытие синхронизации.

П1.1 Письмо Христиаана Гюйгенса его отцу, Константину Гюйгенсу¹

26 Февраля 1665.

Мой Отец,

...

В то время, как я был вынужден оставаться в постели в течение нескольких дней и наблюдал за двумя часами в моей мастерской, я заметил удивительный эффект, о котором ранее никто даже и не думал. Двое часов, висящих на стене друг рядом с другом на расстоянии одного или двух футов, поддерживали согласованность хода с такой высокой точностью, что их маятники всегда качались вместе, без отклонений. Наблюдая это с восхищением в течение некоторого времени, я, наконец, пришел к выводу, что это происходит вследствие некоторой симпатии: когда я придавал маятникам разный ход, то я обнаружил, что через полчаса они всегда возвращаются

¹ Перевод с французского на английский Карстена Хенкеля.

к синхронизму, и поддерживают его до тех пор, пока я не нарушу их ход. После этого я поместил их на большем расстоянии друг от друга, одни в одной стороне комнаты, а другие на 15 футов в стороне. Через день я увидел, что разница в их показаниях составила 5 секунд, и, следовательно, наблюдаемая ранее согласованность была следствием некоторой симпатии, которая, по моему мнению, не может быть вызвана ничем иным, кроме как незаметным движением воздуха, вызванным движением маятников. Часы помещены в закрытый корпус, который вместе со свинцовыми грузами весит чуть менее ста фунтов. Колебания маятников, достигших синхронизма, не таковы, что они двигаются параллельно друг другу, а, наоборот, они приближаются и удаляются противоположным образом. Когда я снова поместил часы ближе друг к другу, я увидел, что маятники вновь стали двигаться таким образом. Далее я взял квадратный стол толщиной один дюйм и поместил его между двумя часами, так что внизу он касался пола и был достаточно высок, чтобы полностью закрыть часы и тем самым отделить их друг от друга. Несмотря на это, синхронизм сохранялся и далее, в течение нескольких дней и ночей; даже когда я его нарушил, то он вскоре восстановился. Сейчас я планирую достичь согласования часов, когда они далеко друг от друга и определить расстояние, на которое распространяется упомянутая симпатия. Основываясь на том, что я уже видел, я полагаю, что оно будет между пятью и шестью футами. Но чтобы получить большую уверенность в этих вопросах Вам придется подождать, пока я глубже их изучу и выявлю причину. Тем не менее, мы обнаружили, что двое часов находятся в полном согласовании, что кажется абсолютно невероятным, и тем не менее абсолютно истинно. Ранее никакие часы не были способны на такую согласованность, как эти вновь изобретенные часы, из чего можно увидеть, насколько они точны, если нечто столь малое способно их согласовать.

П1.2 Морские часы (симпатия часов). Часть V²

22 Февраля 1665.

В течение четырех или пяти дней я заметил удивительное согласование между двумя новыми часовыми механизмами, содержащими малые цепи (рис. П1.1), так что одни часы даже в малейшей степени

² Перевод с латыни на английский Доротеи Прелл.

не опережали другие. Но качания обоих маятников оставались строго противоположными. Следовательно, так как расстояние между часами было небольшим, я начал подозревать существование некоей симпатии, как если бы одни часы были подвержены влиянию других. Чтобы изучить это экспериментально, я изменил движение одного из маятников, так что они не двигались более вместе в одно и то же время, но через четверть или половину часа я нашел их вновь согласованными.

Каждые часы свисали с собственной балки, толщиной примерно в 3 дюйма, концы которой опирались на два стула. Балки были всё время рядом; часы *B* были расположены не непосредственно сбоку от часов *A*, а немного впереди. *B* были также несколько короче, чем *A* и не имели груза в нижней части, каковой в часах *A* обозначен как *D*. Оба часовых механизма висели рядом, с грузами около 80 или 90 фунтов, укрепленными в их нижней части для поддержания равновесия, и со слегка большим грузом у *A* из-за груза *D*. Длина маятников была 7 дюймов. Их качания были таковы, что они всегда приближались и удалялись друг от друга одновременно; вынужденные к другому движению, они не оставались в таком состоянии, а автоматически возвращались [к синхронному] и оставались так без изменения.

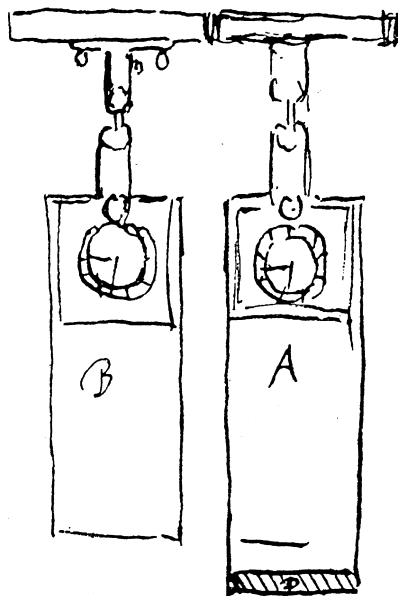


Рис. П1.1.

22 февраля я повернул часы так, что их циферблаты смотрели друг на друга; в этом положении согласованность не была длительной: часы *A* имели некоторое опережение до тех пор пока я не вернул их в предыдущее положение. Вечером я отодвинул *B* на 4 фута от *A* таким образом, что боковая сторона часов *B* была напротив циферблата часов *A*. Утром, точнее через $10\frac{1}{2}$ часа, я увидел, что *A* опережали *B*, но всего лишь на 2 секунды.

23 февраля. Я слегка ускорил маятник часов *B*. Я увидел, немного позднее, что маятники вернулись к согласованному движению, хотя при этом их ход был не одинаков, а со смешанными биениями, и в таком состоянии они оставались весь день. Тем не менее, около 9 вечера *B* в конце концов оказались впереди на половину колебания. Возможно, что холодный вечерний воздух нарушил согласованность, так как не удивительно, что на таком расстоянии согласованность может быть нарушена малейшим возмущением. Боковая сторона часов *B* была напротив лицевой стороны часов *A*.

В половину одиннадцатого вечера 23 февраля я поместил оба часовых механизма на старое место. Они немедленно восстановили согласованный ход, как много раз наблюдалось ранее, с движениями в противоположном направлении.

24 февраля. В 9 часов утра они кажутся идеально согласованными.

24 февраля. Я слегка повернул циферблат часов *A* к боковой части *B*. При этом согласование не сохранилось, а *B* были впереди, и так продолжалось, пока я не поместил их, как ранее.

Далее я раздвинул часы на расстояние шести с половиной футов в то время как ранее они были лишь на 2 дюйма друг от друга. В течение часа или двух они оставались со смешанными движениями, но после этого вернулись к согласованному ходу, как это было при меньшем расстоянии. В 3 часа после полудня я поместил между часовыми механизмами прямоугольную доску длиной 2 фута, что должно было остановить движение воздуха, по крайней мере в нижней части. В верхней части часы выступали примерно на полфута, но здесь движение (воздуха), если и есть, то минимальное. Тем не менее, часы продолжали быть в согласовании, как и ранее.

25 февраля. Хотя предыдущим вечером я и поместил другую планку, 3 фута длиной и примерно один дюйм толщиной, между ними, полностью скрыв одни часы от других, тем не менее этим утром я обнаружил, что они двигались в согласовании в течение всей ночи. Они оставались в таком состоянии до 6 часов вечера, когда часы *B* остановились из-за поломки в большей цепи. После того, как это препятствие было устранено, они после получасовой задержки вновь



вернулись к согласованному ходу, и оставались в этом состоянии до 11 часов, когда я начал новое испытание, раздвинув их более чем на 12 футов.

26 февраля. В половине девятого утра я обнаружил, что часы *B* ушли на 5 секунд вперед, и тем самым было установлено, как далеко распространяется симпатия (по-видимому, путем коммуникации через движение воздуха).

27 февраля. Я уменьшил скорость часов *B*, так чтобы они двигались в лучшем согласовании между собой на том же расстоянии в 12 футов, но я не был свободен, чтобы заниматься этим дальше. В 9 часов вечера я подстроил их более точно.

28 февраля. В 9 часов утра я обнаружил, что часы *A* ушли вперед менее чем на 1 секунду; они шли со смешанными биениями, и они оставались в таком состоянии до шести вечера. В половине седьмого они двигались одновременно, причем часы *B* были впереди на эту половину колебания. Я сомневаюсь, что такое согласование могло продолжаться 9 часов без помощи симпатии, но она не могла противостоять вечернему изменению воздуха (который был значительно более теплым, так как холод прекратился после того, как он был с нами в течение трех дней). Так как изначально были впереди часы *A*, а впоследствии *B*, то они не могли быть с большей точностью подстроены друг к другу.

1 марта. В 10 часов утра *A* были на три секунды впереди.

Оба часовых механизма имели в качестве опоры два стула (см. рис. 1.2 в разделе 1.1), чье малейшее и абсолютно невидимое движение, вызванное маятником, было причиной предсказанной симпатии, и заставляло маятники постоянно двигаться с противоположными отклонениями. Каждый маятник тянет собой основание с наиболь-

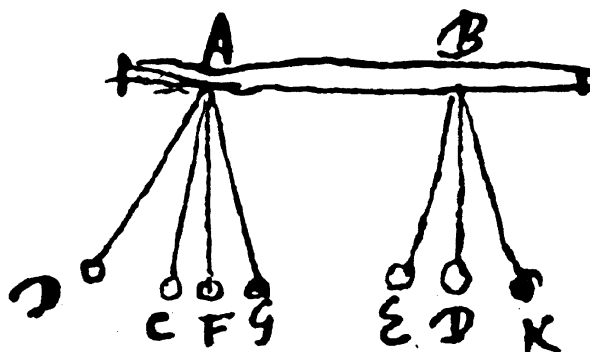


Рис. П1.2.

шей силой в момент, когда он проходит через нижнее положение. Таким образом, если маятник B находится в положении BD (рис. П1.2), в то время как A – только в AC , и B движется налево, а A направо, то точка подвеса A сдвигается влево, при этом вибрация маятника A ускоряется. Когда B опять проходит через BE и A находится в положении AF , подвес B сдвигается вправо, и, следовательно, вибрация маятника B замедляется. B опять проходит через положение BD , когда A находится в AG , при этом подвес A утягивается вправо, и, следовательно, вибрация маятника A ускоряется. B опять в BK , когда A возвращается в положение AF , при этом подвес B утягивается влево и, следовательно, вибрация маятника B замедляется. Итак, когда вибрация маятника B постоянно замедляется, а A ускоряется, необходимым образом некоторое короткое время они должны двигаться с противоположными отклонениями: в одно и то же время A движется направо, а B – налево, и наоборот. В этот момент они не могут выйти из согласованности, потому что по этим же причинам они немедленно будут возвращены обратно тем же образом. Подвесы, естественно, являются неподвижными, но, если согласованность хотя бы слегка нарушается, то она будет восстановлена за счет малейших движений подвесов. Эти движения, конечно, не могут быть наблюдаемы и поэтому неудивительно, что это явилось причиной ошибки [в толковании].

Приложение П2

Мгновенные фаза и частота сигнала

П2.1 Аналитический сигнал и преобразование Гильберта

Непротиворечивый способ определения фазы *произвольного сигнала* известен в теории обработки данных как метод аналитического сигнала [Panter 1965; Рабинер и Голд 1975; Вайнштейн и Вакман 1983; Boashash 1992; Smith and Mersereau 1992]. Этот общий подход, предложенный Габором [Gabor 1946] и основанный на *преобразовании Гильберта* (ПГ), позволяет однозначно получить *мгновенные фазу и амплитуду* сигнала $s(t)$ путем конструирования *аналитического сигнала* $\zeta(t)$, который является комплексной функцией времени

$$\zeta(t) = s(t) + is_H(t) = A(t)e^{i\phi(t)}, \quad (\text{П2.1})$$

где функция $s_H(t)$ есть ПГ от $s(t)$

$$s_H(t) = \pi^{-1} \text{P.V.} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau, \quad (\text{П2.2})$$

и P.V. означает, что интеграл берется в смысле главного значения Коши. Таким образом, мгновенные амплитуда $A(t)$ и фаза $\phi(t)$ сигнала $s(t)$ однозначно определяются из (П2.1). Подчеркнем, что ПГ не содержит параметров. Заметим также, что вычисление мгновенных характеристик сигнала требует его знания на всем интервале времени, т.е. ПГ нелокально во времени. Тем не менее, основной вклад

в интеграл (П2.2) вносит непосредственная окрестность выбранного момента времени.

Как можно видеть из (П2.2), ПГ является сверткой функций $s(t)$ и $1/\pi t$. По свойствам свертки, преобразование Фурье $S_H(\zeta)$ от $s_H(t)$ является произведением преобразований Фурье от $s(t)$ и $1/\pi t$. Для физически значимых частотных компонент $\zeta > 0$ имеем $S_H(\zeta) = -iS(\zeta)$. Это означает, что ПГ может быть реализовано идеальным фильтром с единичной амплитудной характеристикой, вносящим постоянную фазовую задержку $\pi/2$ для всех частотных компонент.

Гармоническое колебание $s(t) = A \cos \omega t$ часто представляют в комплексном виде как $A \cos \omega t + iA \sin \omega t$. Это означает, что действительное колебание дополняют мнимой частью, которая отстает по фазе на $\pi/2$, т.е. связана с $s(t)$ преобразованием Гильберта. Аналитический сигнал есть естественное расширение такого представления, т.к. ПГ осуществляет сдвиг фазы $-\pi/2$ для каждой спектральной компоненты $s(t)$.

Хотя формально $A(t)$ и $\phi(t)$ могут быть вычислены для произвольного $s(t)$, они имеют четкий физический смысл только для узкополосных сигналов $s(t)$ (см. подробное обсуждение в [Boashash 1992]). В этом случае амплитуда $A(t)$ совпадает с огибающей $s(t)$ и *мгновенная частота* $d\phi/dt$ соответствует частоте максимума спектра мощности, вычисленного в скользящем временном окне.

П2.2 Примеры

Проиллюстрируем свойства преобразования Гильберта следующими примерами.

Затухающие колебания

Промоделируем измеряемый сигнал свободными колебаниями линейного осциллятора,

$$\ddot{x} + 0.05\dot{x} + x = 0, \quad (\text{П2.3})$$

и нелинейного осциллятора Дуффинга,

$$\ddot{x} + 0.05\dot{x} + x + x^3 = 0. \quad (\text{П2.4})$$

Вычислим по $x(t)$ мгновенные амплитуды $A(t)$ и частоту $d\phi/dt$ (рис. П2.1). Амплитуды, показанные жирными линиями, действительно являются огибающими затухающих процессов. Частота линейного осциллятора постоянна, в то время как частота осцилля-

тора Дуффинга зависит от амплитуды, как и следовало ожидать. Заметим, что хотя всего лишь около 20 периодов колебаний было использовано для этих вычислений, нелинейные свойства системы удалось выявить благодаря тому, что частота и амплитуда оцениваются не в среднем, а в каждой точке временного ряда. Такой метод используется в инженерном деле для идентификации свойств упругости и затухания механических систем [Feldman 1994]. Этот пример иллюстрирует важное свойство ПГ: оно может быть применено к *нестационарным сигналам*.

Периодический сигнал

В качестве следующего примера возьмем решение уравнения Ван-дер-Поля (ср. с (7.2))

$$\ddot{x} - (1 - x^2)\dot{x} + x = 0. \quad (\text{П2.5})$$

Для данных значений параметров форма колебаний существенно отличается от синусоидальной (рис. П2.2а), а фазовый портрет системы (П2.5) – от окружности. Соответственно, мгновенная амплитуда $A(T)$ не является константой, а осциллирует (рис. П2.2а) с частотой $2\omega = 2 \cdot 2\pi/T$, где T период колебаний. Рост мгновенной фазы не является строго линейным; действительно, $\phi(t) - \omega t$ колеблется с

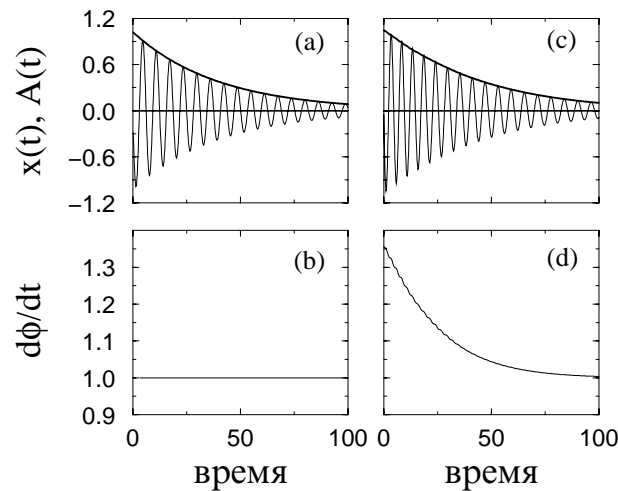


Рис. П2.1. Свободные колебания $x(t)$ линейного осциллятора (а) и нелинейного осциллятора Дуффинга (с). Мгновенные амплитуды $A(t)$, вычисленные с помощью преобразования Гильберта, показаны жирными линиями. Соответствующие мгновенные частоты $d\phi/dt$ показаны в (b) и (d). Из [Rosenblum and Kurths 1998], рис. 1, Copyright Springer-Verlag.

частотой 2ω (рис. П2.2b,c). Напомним, что метод аналитического сигнала дает лишь оценку истинной фазы (см. главу 7), которая должна возрастать линейно во времени.

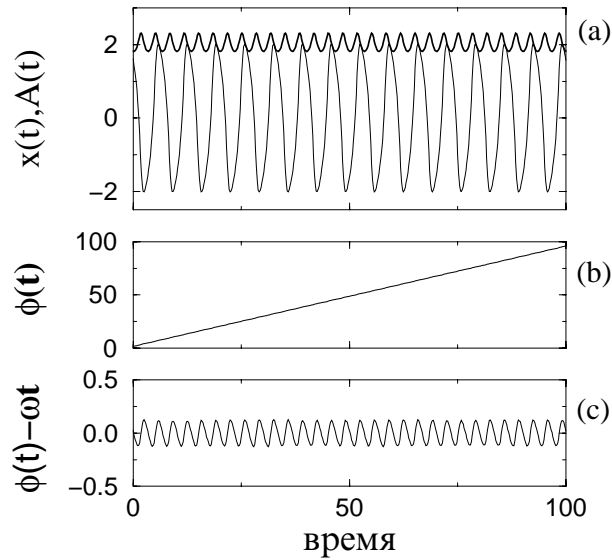


Рис. П2.2. Решение $x(t)$ уравнения Ван-дер-Поля и мгновенная амплитуда $A(t)$ (жирная линия) (a). Мгновенная фаза ϕ растет практически линейно (b); тем не менее, малые колебания видны при большом увеличении (c); здесь ω – это средняя частота.

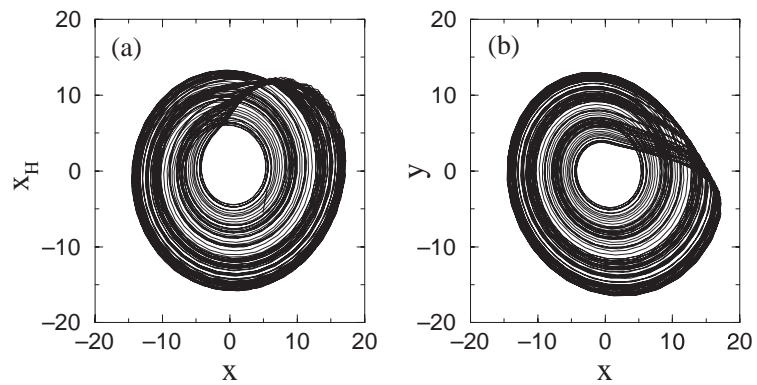


Рис. П2.3. Фазовый портрет системы Рёсслера в координатах (x, x_H) (a) и исходных координатах (x, y) (b).

Хаотический сигнал

С точки зрения теории анализа временных рядов (см., например, [Kantz and Schreiber 1997]) ПГ можно рассматривать как двумерную реконструкцию сигнала в координатах (s, s_H) . Выберем в качестве наблюдаемой x -компоненту системы Рёсслера (10.2). Фазовый портрет этой системы в координатах (x, x_H) показан на рис. П2.3а; можно видеть, что он очень близок к «истинному» портрету системы Рёсслера в координатах (x, y) (рис. П2.3б).¹ Мгновенная амплитуда и фаза показаны на рис. П2.4. Хотя фаза ϕ растет практически линейно, заметны малые нерегулярные флуктуации этого роста. Это согласуется с тем известным фактом, что, хотя колебания системы Рёсслера хаотические, спектр мощности от $x(t)$ содержит очень острый пик.

Электрокардиограмма человека

Как пример сложного сигнала возьмем запись ЭКГ человека (рис. П2.5). Мы видим, что точка в плоскости (s, s_H) делает два оборота, соответствующие так называемым R- и T-зубцам (малые

¹ Отметим, что ПГ дает оптимальную в некотором смысле реконструкцию. Действительно, если фазовый портрет системы реконструируется методом Такенса [Takens 1981] по сигналу с периодом T , то временная задержка $T/4$ обеспечивает то, что аттрактор не вытянут вдоль диагонали. Применение ПГ эквивалентно выбору такой оптимальной задержки для каждой компоненты сигнала.

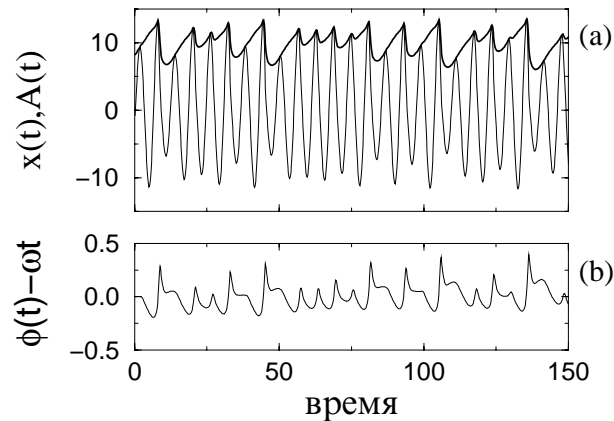


Рис. П2.4. Решение системы Рёсслера $x(t)$ и его мгновенная амплитуда $A(t)$ (жирная линия) (а). Мгновенная фаза ϕ растет практически линейно, тем не менее, малые колебания видны при большом увеличении (б). Из [Rosenblum and Kurths 1998], рис. 2, Copyright Springer-Verlag.

петли, соответствующие Р-зубцам не видны при данном увеличении). Важно, что траектории в (s, s_H) проходят через начало координат, и, следовательно, фаза не всегда определена. Мы не сталкивались с этой проблемой в предыдущих примерах благодаря достаточно простой структуре сигналов. Действительно, обычно перед применением ПГ из сигнала вычитают его среднее значение. Часто это обеспечивает то, что траектории охватывают начало координат; ранее мы неявно использовали это свойство. Для вычисления фазы кардиограммы необходимо сдвинуть начало координат в некую точку s^*, s_H^* и вычислить фазу и амплитуду в соответствии с

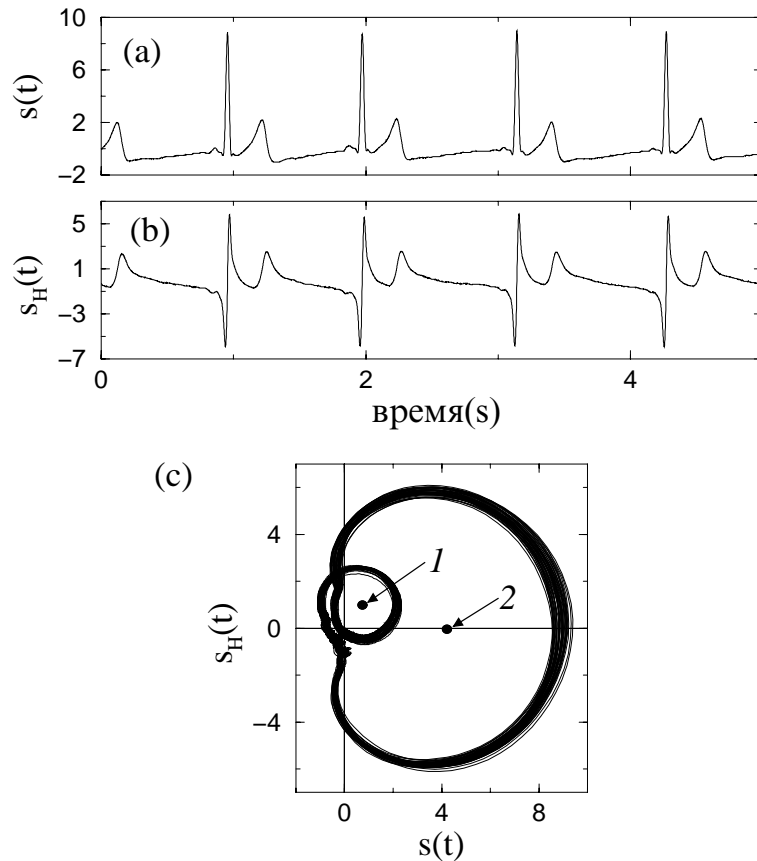


Рис. П2.5. ЭКГ человека (а), ее преобразование Гильберта (б) и их зависимость друг от друга (с). Определение фазы зависит от выбора начала координат в плоскости (s, s_H) ; два разумных выбора показаны стрелками в (с).

$$A(t)e^{i\phi(t)} = (s - s^*) + i(s_H - s_H^*). \quad (\text{П2.6})$$

Конечно, при таком способе теряется однозначность определения фазы: теперь она зависит от выбора точки отсчета. Два разумных выбора показаны на рис. П2.5с стрелками. Очевидно, что в зависимости от нового начала координат один сердечный цикл (интервал между двумя сокращениями сердца) будет соответствовать набегу фазы 2π или 4π . Это отражает тот факт, что наше понимание того, что есть «одно колебание», зависит от конкретной проблемы и от нашей физической интуиции.

П2.3 Численные проблемы и практические рекомендации

Важное преимущество метода аналитического сигнала состоит в том, что он легко может быть реализован численно. Выделим основные шаги в вычислении.

Вычисление ПГ в частотной области

Самый простой способ вычислить ПГ состоит в том, чтобы сделать быстрое преобразование Фурье (БПФ) от исходного временного ряда, сдвинуть фазу каждой частотной компоненты на $-\pi/2$ и применить обратное БПФ.² Чтобы сделать длину временного ряда подходящей для применения БПФ, надо добавить к нему нули (zero padding). Чтобы уменьшить краевые эффекты, желательно не использовать порядка десяти характерных периодов в начале и в конце сигнала для вычисления мгновенных характеристик. Вычисления с двойной точностью позволяют получить ПГ с погрешностью около 1%. (Погрешность оценивалась путем вычисления дисперсии от $s(t) + H^2(s(t))$, где H^2 означает, что ПГ было выполнено дважды; теоретически $s(t) + H^2(s(t)) \equiv 0$.)

Вычисление ПГ во временной области

Численно это может быть осуществлено с помощью свертки экспериментальной реализации с заранее вычисленной характеристикой фильтра (преобразователя Гильберта) [Рабинер и Голд 1975; Little and Shure 1992; Smith and Mersereau 1992]. Такие фильтры

² Фазовый сдвиг может быть легко реализован, если поменять местами мнимую и действительную часть преобразования Фурье: $\text{Re}(\omega_i) \rightarrow \text{tmp}$, $\text{Im}(\omega_i) \rightarrow \text{Re}(\omega_i)$, $-\text{tmp} \rightarrow \text{Im}(\omega_i)$, где tmp - промежуточная переменная.

могут быть, например, реализованы с помощью пакетов программ MATLAB [Little and Shure 1992] и RLAB (public domain, URL: <http://rlab.sourceforge.net>). Хотя ПГ требует вычисления на всей временной оси (т.е. преобразователь Гильберта является фильтром с бесконечной импульсной характеристикой), приемлемая погрешность порядка 1% может быть получена с помощью 256-точечной характеристики фильтра. Частота дискретизации должна быть выбрана таким образом, чтобы иметь по крайней мере 20 точек на характерный период колебаний. В процессе вычисления свертки $L/2$ точек теряется с каждого конца временного ряда, где L есть длина преобразователя.

Вычисление и разворачивание фазы

Удобный способ вычисления фазы состоит в использовании функций $\text{DATAN2}(s_H, s)$ (FORTRAN) и $\text{atan2}(s_H, s)$ (C), что дает циклическую фазу на интервале $[-\pi, \pi]$. Разность фаз двух сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ может быть получена с помощью ПГ как

$$\phi_1(t) - \phi_2(t) = \tan^{-1} \frac{s_{H,1}(t)s_2(t) - s_1(t)s_{H,2}(t)}{s_1(t)s_2(t) + s_{H,1}(t)s_{H,2}(t)}. \quad (\text{П2.7})$$

Для определения синхронизации часто бывает необходимо использовать фазу, определенную не на окружности, а на всей действительной оси (т.е. фазу, изменяющуюся от $-\infty$ до ∞). Для этой цели фаза (или разность фаз) может быть развернута путем отслеживания скачков $\approx 2\pi$ в зависимости $\phi(t)$.

Чувствительность к низкочастотному тренду

Мы уже обсуждали, что фаза хорошо определена, только если траектория в плоскости (s, s_H) всегда обходит начало координат и s и s_H не обращаются в ноль одновременно. Это условие может быть нарушено, если сигнал содержит низкочастотный тренд, например, из-за дрейфа нуля измерительного прибора. В результате некоторые обороты траектории, не охватывающие начало координат, не будут восприняты как цикл, и в набеге фазы будет потеряно 2π . Чтобы проиллюстрировать это, добавим искусственный тренд к ЭКГ; реконструкция такого сигнала в координатах s, s_H показана на рис. П2.6, его следует сравнить с аналогичным графиком для оригинальных данных на рис. П2.5. Очевидно, что начало координат, помеченное на рис. П2.5 первой стрелкой, будет в этом случае неправильным выбором. Чтобы избежать этой проблемы, мы рекомендуем всегда

строить график зависимости ПГ от исходного сигнала и проверять, правильно ли выбрано начало координат.

П2.4 Вычисление мгновенной частоты

Частота непрерывного сигнала

Вычисление мгновенной частоты $\omega(t)$ сигнала является довольно сложной процедурой. Непосредственное вычисление путем численного дифференцирования $\phi(t)$ приводит, естественно, к большим флуктуациям в оценке $\omega(t)$. Более того, может оказаться, что $\omega(t) < 0$ для некоторых t . Это может произойти не только из-за влияния шума, но и как следствие сложной формы сигнала. Так, например, типичные элементы ЭКГ (например, Т-зубцы) приводят к отрицательным значениям мгновенной частоты. С физической точки зрения мы ожидаем, что мгновенная частота является положительной функцией времени, изменяющейся медленно по сравнению с характерным периодом колебаний и имеющей смысл числа колебаний в единицу времени. Это особенно важно в контексте исследования синхронизации, где нас не интересует поведение фазы на масштабах, меньших характерного периода колебаний. Существует несколько методов получения оценки $\omega(t)$ в соответствии с такой точкой зрения; их обсуждение и сравнение можно найти в [Boashash 1992].

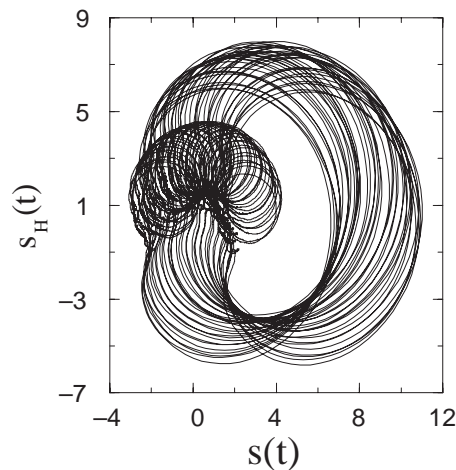


Рис. П2.6. Иллюстрация чувствительности преобразования Гильберта к низкочастотному тренду.

Возьмем для иллюстрации запись дыхания человека (поток воздуха через нос), см. рис. П2.7а, и воспользуемся методом, называемым в [Boashash 1992] «оценкой частоты методом максимального правдоподобия». Пусть мгновенная фаза $\phi(t)$ развернута на бесконечной оси, так что она является возрастающей, хотя и не обязательно монотонной, функцией времени. Выполним для каждого момента времени локальную аппроксимацию полиномом по интервалу, существенно большему характерного периода колебаний. Аналитически

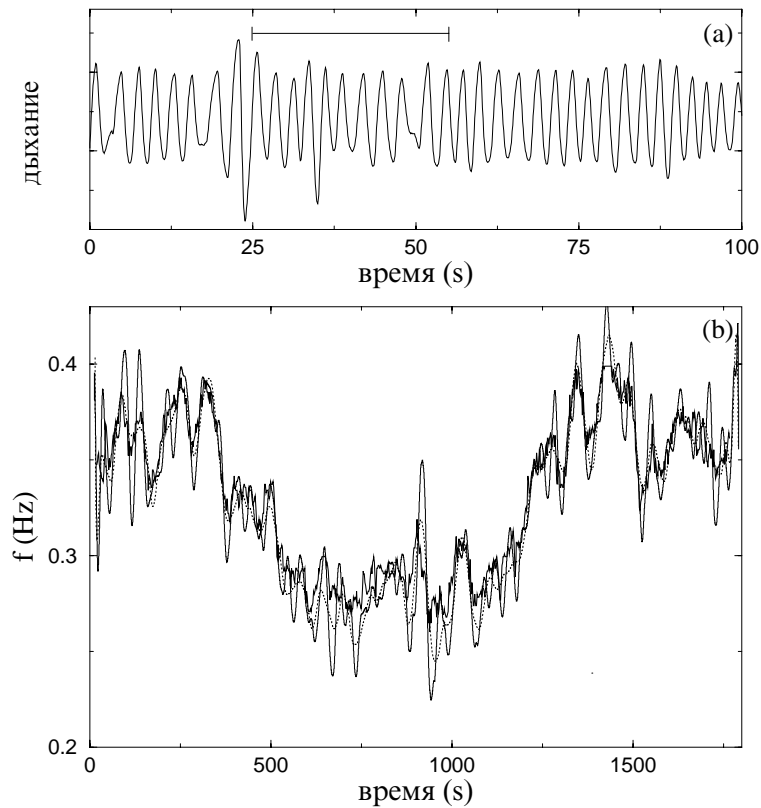


Рис. П2.7. Мгновенная частота дыхания человека. Исходный сигнал – поток воздуха – показан на (а). На (б) жирная линия показывает частоту, соответствующую максимуму спектра мощности, вычисленного методом авторегрессии (методом Бурга [Press *et al.* 1992]) в скользящем окне длительностью 30 секунд. Длина окна показана горизонтальным отрезком на (а); она соответствует примерно 10 характерным периодам дыхания. Непрерывная и пунктирные линии на (б) изображают мгновенную частоту $f(t)$, полученную с помощью ПГ с последующей аппроксимацией полиномом в окне длиной соответственно 30 и 60 секунд.

вычисленная производная полиномиальной функции в данный момент времени даёт всегда положительную оценку частоты. Практически это делается с помощью фильтра Савицкого–Голая (Savitzky–Golay); четвертая степень полинома и длина интервала аппроксимации порядка 10 характерных периодов являются разумным выбором параметров. Мгновенная частота, вычисленная таким способом, практически совпадает с частотой, соответствующей максимуму скользящего спектра, полученного методом авторегрессии, например методом Бурга [Press *et al.* 1992], см. рис. П2.7b.

Частота точечного процесса

Фаза и медленно меняющаяся частота точечного процесса могут быть получены достаточно просто. Действительно, если интервал времени между двумя событиями соответствует полному циклу колебательного процесса, то набег фазы за этот интервал в точности равен 2π . Следовательно, мы можем приписать временам t_i значения фазы $\phi_i = \phi(t_i) = 2\pi i$. С таким временным рядом трудно работать, так как он неэквидистантен по времени. Тем не менее, мы можем воспользоваться тем, что такой сигнал есть монотонно возрастающая функция времени, и обратить ее. Полученный процесс $t(\phi_i)$ эквидистантен, так как шаг по фазе равен 2π . Теперь мы можем применить описанный выше метод полиномиальной аппроксимации, чтобы получить мгновенный период $T_i = T(\phi_i)$. Снова обращая временной ряд, получим частоту $\omega_i = \omega(t_i) = 2\pi/T_i$.

Список литературы

- А. А. Андронов и А. А. Витт. К математической теории захватывания. *Журнал прикладной физики*, 7(4):3, 1930а.
- А. А. Андронов и А. А. Витт. Zur Theorie des Mitnehmens von van der Pol. *Archiv für Elektrotechnik*, 24(1):99–110, 1930b. Русский перевод в: А. А. Андронов. *Собрание трудов*, стр. 70–84. Из-во АН СССР, М., 1956.
- А. А. Андронов, А. А. Витт и С. Э. Хайкин. *Теория колебаний*. Гостехиздат, М., 1937; Физматгиз, М., 1959; Наука, М., 1981.
- В. С. Анищенко. *Сложные колебания в простых системах. Механизмы возникновения, структура и свойства хаоса в радиофизических системах*. Наука, М., 1990.
- В. С. Анищенко и В. В. Астахов. Бифуркационные явления в автостохастическом генераторе при внешнем воздействии. *ЖТФ*, 53(11):2165–2170, 1983.
- В. С. Анищенко, Т. Е. Вадивасова, Д. Э. Постнов и М. А. Сафонова. Вынужденная и взаимная синхронизация хаоса. *Радиотехника и электроника*, 36(2):338–351, 1991.
- В. В. Антюхов, А. Ф. Глова, О. Р. Качурин, Ф. В. Лебедев, В. В. Лиханский, А. П. Напартович и В. Д. Письменный. Эффективная фазовая синхронизация набора ОКГ. *Письма в ЖЭТФ*, 44(2):63–75, 1986.
- В. И. Арнольд. Малые знаменатели. I. Об отображениях окружности в окружность. *Изв. Акад. Наук Сер. Мат.*, 25(1):21–86, 1961.
- В. И. Арнольд. Замечания о теории возмущений для задач типа Матье. *Усп. Мат. Наук*, 38(4):189–203, 1983.
- В. С. Афраймович и Л. П. Шильников. Инвариантные двумерные торы, их разрушение и стохастичность. В *Методы качественной теории*

- дифференциальных уравнений*, стр. 3–28. Горький, 1983.
- Л. Г. Безаева, Л. Н. Капцов и П. С. Ланда. Порог синхронизации как критерий стохастичности в генераторе с инерционной нелинейностью. *ЖТФ*, 56(9):1849–1853, 1986.
- Б. П. Безручко. *Экспериментальное исследование нестационарных и хаотических эффектов в распределенной автоколебательной системе электронный пучок – электромагнитная волна*. Автореферат канд. дисс., Саратовский Университет, 1980.
- Б. П. Безручко, Л. В. Булгакова, С. П. Кузнецов и Д. И. Трубецков. Экспериментальное и теоретическое исследование стохастических автоколебаний в лампе обратной волны. В *Лекции по высокочастотной электронике (5-ая Зимняя Школа)*, Саратов 1981, стр. 25–77, Изд-во Саратовского Университета, 1981.
- Б. П. Безручко, С. П. Кузнецов и Д. И. Трубецков. Экспериментальное наблюдение стохастических автоколебаний в динамической системе электронный пучок – обратная электромагнитная волна. *Письма в ЖЭТФ*, 29(3):180–184, 1979.
- И. И. Блехман. *Синхронизация динамических систем*. Наука, М., 1971
- И. И. Блехман. *Синхронизация в природе и технике*. Наука, М., 1981
- Н. Н. Боголюбов и Ю. А. Митропольский. *Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний*. Физматгиз, М., 1958.
- А. В. Бондаренко, А. Ф. Глова, С. Н. Козлов, Ф. В. Лебедев, В. В. Лиханский, А. П. Напартович, В. Д. Письменный и В. П. Ярцев. Бифуркации и хаос в системе оптически связанных СО₂-лазеров. *ЖЭТФ*, 95(3): 807–816, 1989.
- В. Я. Бродский. Околочасовые ритмы в клеточной популяции. Проблема синхронизации. *Бюлл. Эксп. Биол. Мед.*, 124(12):604–609, 1997.
- Н. В. Бутенин, Ю. И. Неймарк и Н. А. Фуфаев. *Введение в теорию нелинейных колебаний*. Наука, М., 1987.
- Л. А. Вайнштейн и Д. Е. Вакман *Разделение частот в теории колебаний и волн*. Наука, М., 1983.
- И. М. Гельфанд, С. А. Ковалев и Л. М. Чайлахян. Внутриклеточное раздражение различных отделов сердца лягушки. *ДАН СССР*, 148(4): 973–976, 1963.
- Л. Гласс и М. Мэки. *От часов к хаосу: Ритмы жизни*. Мир, М., 1991.
- А. Ф. Глова, С. Ю. Курчатов, В. В. Лиханский, А. Ю. Лысиков и А. П. Напартович. О когерентной генерации линейного набора волноводных СО₂-лазеров с пространственным фильтром. *Квант. электрон.*, 23(6): 515–517, 1996.
- В. С. Гурфинкель, Я. М. Коц и М. Л. Шик. *Регуляция позы человека*. Наука, М., 1965.
- Ж. Йосс и Д. Джозеф. *Элементарная теория устойчивости и бифуркаций*. Мир, М., 1983.



- А. Б. Каток и Б. Хассельблат *Введение в современную теорию динамических систем*. Факториал, М., 1999.
- В. Г. Колинко, Т. А. Архангельская и Ю. М. Романовский. Движение протоплазмы плазмодия миксомицета *Physarum* в условиях изменяющейся температуры. *Stud. Biophys.*, 106(3):215–222, 1985.
- И. П. Корнфельд, С. В. Фомин и Я. Г. Синай. *Эргодическая теория*. Наука, М., 1980.
- С. П. Кузнецов, *Динамический хаос*. Физматлит, М., 2001.
- С. П. Кузнецов и А. С. Пиковский. Переход от симметричного к несимметричному режиму хаотической динамики в системе диссипативно связанных рекуррентных отображений. *Изв. ВУЗов – Радиофизика*, 32(1):41–45, 1989.
- Ю. И. Кузнецов, П. С. Ланда, А. Ф. Ольховой и С. М. Перминов. Связь между амплитудным порогом синхронизации и энтропией в стохастических автоколебательных системах. *ДАН СССР*, 281(2):291–294, 1985.
- И. О. Кулик и И. К. Янсон. *Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах*. Наука, М., 1970.
- П. С. Ланда. *Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы*. Наука, М., 1980.
- П. С. Ланда. *Нелинейные колебания и волны*. Наука, М., 1997.
- П. С. Ланда и С. М. Перминов. Взаимодействие периодических и стохастических автоколебаний. *Изв. ВУЗов – Радиофизика*, 25(3):424–427, 1985.
- П. С. Ланда и С. М. Перминов. Синхронизация хаотических колебаний в системе Маккея–Гласса. *Изв. ВУЗов – Радиофизика*, 30(3):437–439, 1987.
- П. С. Ланда, Ю. С. Рендель и В. А. Шер. Синхронизация колебаний в системе Лоренца. *Изв. ВУЗов – Радиофизика*, 32:1172–1174, 1989.
- П. С. Ланда и М. Г. Розенблюм. О синхронизации хаотических автоколебательных систем. *ДАН СССР*, 324(1):63–68, 1992.
- П. С. Ланда и Н. Д. Таранкова. Синхронизация генератора при модуляции его собственной частоты. *Радиотехника и электроника*, 21(2):260, 1976.
- Е. М. Лифшиц и Л. П. Питаевский. *Физическая кинетика*. Наука, М., 1979.
- А. Н. Малахов. *Флуктуации в автоколебательных системах*. Наука, М., 1968.
- И. Г. Малкин. *Некоторые задачи теории нелинейных колебаний*. Гостехиздат, М., 1956.
- В. М. Митюшин, Л. Л. Литинская и Л. Б. Каминир. О синхронном изменении клеточных ядер. В *Колебательные процессы в биологических и химических системах*, стр. 325–331, Наука, М., 1967.
- Ф. Мун. *Хаотические колебания: Вводный курс для научных сотрудников и инженеров*. Мир, М., 1990.
- А. Найфэ. *Введение в методы возмущений*. Мир, М., 1984.

- Ю. И. Неймарк и П. С. Ланда. *Стохастические и хаотические колебания*. Наука, М., 1987.
- А. А. Непомнящий. Устойчивость волновых режимов в пленке, стекающей по наклонной плоскости. *Изд. АН СССР, Механика жидкости и газа*, (3):28–34, 1974.
- Я. Г. Пановко и И. И. Губанова. *Устойчивость и колебания упругих систем*. Наука, М., 1964.
- А. С. Пиковский. Синхронизация и стохастизация ансамбля автогенераторов внешним шумом. *Изв. ВУЗов–Радиофизика*, 27(5):576–581, 1984а.
- А. С. Пиковский. Синхронизация фазы стохастических автоколебаний периодическим внешним сигналом. *Радиотехника и электроника*, 30(10):1970–1974, 1984б.
- Л. Рабинер и Б. Голд. *Теория и применение цифровой обработки сигналов*. Мир, М., 1978.
- М. И. Рабинович и Д. И. Трубецков. *Введение в теорию колебаний и волн*. Рег. Хаот. Дин., Ижевск, 2000.
- Д. В. Рэлей (Стретт). *Теория звука*. Гостехиздат, М., 1955.
- Ю. М. Романовский, Н. В. Степанова и Д. С. Чернавский. *Математическое моделирование в биофизике*. Наука, М., 1975.
- Ю. М. Романовский, Н. В. Степанова и Д. С. Чернавский. *Математическая биофизика*. Наука, М., 1984.
- С. М. Рытов. *Введение в статистическую радиофизику*. Наука, М., 1976.
- Р. Л. Стратонович. *Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике*. Сов. Радио, М., 1961.
- К. Ф. Теодорчик. *Автоколебательные системы*. Гостехиздат, М., 1952.
- В. Феллер. *Введение в теорию вероятностей и ее приложения*. Мир, М., 1984.
- А. А. Харкевич. *Основы радиотехники*. Связьиздат, М., 1962.
- Т. Хаяси. *Нелинейные колебания в физических системах*. Мир, М., 1968.
- В. Хорстхемке и Р. Лефевр. *Индукцированные шумом переходы*. Мир, М., 1987.
- М. Л. Цетлин. *Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем*. Наука, М., 1969.
- Р. Шмидт и Г. Тевс. *Физиология человека*. Мир, М., 1986.
- Г. Шустер. *Детерминированный хаос. Введение*. Мир, М., 1988.
- H. D. I. Abarbanel. *Analysis of Observed Chaotic Data*. Springer, New York, Berlin, Heidelberg, 1996.
- H. D. I. Abarbanel, N. F. Rulkov, and M. M. Suschik. Generalized synchronization of chaos: The auxiliary system approach. *Phys. Rev. E*, 53(5):4528–4535, 1996.
- L. F. Abbott and C. van Vreeswijk. Asynchronous states in networks of pulse-coupled oscillators. *Phys. Rev. E*, 48(2):1483–1490, 1993.
- J. A. Acebrón, L. L. Bonilla, S. De Leo, and R. Spigler. Breaking the symmetry

- in bimodal frequency distributions of globally coupled oscillators. *Phys. Rev. E*, 57(5):5287–5290, 1998.
- U. Achenbach and K. E. Wohlfarth-Bottermann. Synchronization and signal transmission in protoplasmatic strands of *Physarum*. Reaction to varying temperature gradient. *Planta*, 150:180–188, 1980.
- U. Achenbach and K. E. Wohlfarth-Bottermann. Synchronization and signal transmission in protoplasmatic strands of *Physarum*. Effects of externally applied substances and mechanical influences. *Planta*, 151:574–583, 1981.
- R. Adler. A study of locking phenomena in oscillators. *Proc. IRE*, 34:351–357, 1946. Reprinted in *Proc. IEEE*, 61(10):1380–1385, 1973.
- V. S. Afraimovich, V. I. Nekorkin, G. V. Osipov, and V. D. Shalfeev. *Stability, Structures and Chaos in Nonlinear Synchronization Networks*. World Scientific, Singapore, 1994.
- Y. Aizawa and T. Uezu. Global aspects of the dissipative dynamical systems. II. Periodic and chaotic responses in the forced Lorenz system. *Prog. Theor. Phys.*, 68(6):1864–1879, 1982.
- M. K. Ali. Synchronization of a chaotic map in the presence of common noise. *Phys. Rev. E*, 55(4):4804–4805, 1997.
- M. K. Ali and J.-Q. Fang. Synchronization of chaos and hyperchaos using linear and nonlinear feedback functions. *Phys. Rev. E*, 55(5):5285–5290, 1997.
- K. T. Alligood, T. D. Sauer, and J. A. Yorke. *Chaos: An Introduction to Dynamical Systems*. Springer, New York, 1997.
- P. Alstrøm, B. Christiansen, and M. T. Levinsen. Characterization of a simple class of modulated relaxation oscillators. *Phys. Rev. B*, 41(3):1308–1319, 1990.
- R. Andretic, S. Chaney, and J. Hirsh. Requirement of circadian genes for cocaine sensitization in *Drosophila*. *Science*, 285:1066–1068, 1999.
- V. S. Anishchenko, A. G. Balanov, N. B. Janson, N. B. Igosheva, and G. V. Bordyugov. Entrainment between heart rate and weak noninvasive forcing. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 10:2339–2348, 2000.
- V. S. Anischenko, T. E. Vadivasova, D. E. Postnov, and M. A. Safonova. Synchronization of chaos. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 2(3):633–644, 1992.
- T. Aoyagi and Y. Kuramoto. Frequency order and wave patterns of mutual entrainment in two-dimensional oscillator lattices. *Phys. Lett. A*, 155(6,7):410–414, 1991.
- E. V. Appleton. The automatic synchronization of triode oscillator. *Proc. Cambridge Phil. Soc. (Math. and Phys. Sci.)*, 21:231–248, 1922.
- J. Argyris, G. Faust, and M. Haase. *An Exploration of Chaos*. North-Holland, Amsterdam, 1994.
- J. Arnhold, P. Grassberger, K. Lehnertz, and C. E. Elger. A robust method for detecting interdependences: Application to intracranially recorded EEG. *Physica D*, 134(4):419–430, 1999.
- L. Arnold. *Random Dynamical Systems*. Springer, Berlin, 1998.

- V. I. Arnold. Cardiac arrhythmias and circle mappings. *Chaos*, 1:20–24, 1991.
- D. G. Aronson, M. A. Chory, G. R. Hall, and R. P. McGehee. Bifurcations from an invariant circle for two parameter families of maps of the plane: A computer-assisted study. *Commun. Math. Phys.*, 83:303–353, 1982.
- D. G. Aronson, G. B. Ermentrout, and N. Koppel. Amplitude response of coupled oscillators. *Physica D*, 41:403–449, 1990.
- D. G. Aronson, R. P. McGehee, I. G. Kevrekidis, and R. Aris. Entrainment regions for periodically forced oscillations. *Phys. Rev. A*, 33(3):2190–2192, 1986.
- R. Artuso, E. Aurell, and P. Cvitanović. Recycling of strange sets. I. Cycle expansions. *Nonlinearity*, 3:325–359, 1990a.
- R. Artuso, E. Aurell, and P. Cvitanović. Recycling of strange sets. II. Applications. *Nonlinearity*, 3:361–386, 1990b.
- J. Aschoff, S. Daan, and G. A. Groos. *Vertebrate Circadian Systems. Structure and Physiology*. Springer, Berlin, 1982.
- P. Ashwin and P. J. Aston. Blowout bifurcations of codimension two. *Phys. Lett. A*, 244(4):261–270, 1998.
- P. Ashwin, J. Buescu, and I. Stewart. Bubbling of attractors and synchronization of chaotic oscillators. *Phys. Lett. A*, 193:126–139, 1994.
- P. Ashwin, J. Buescu, and I. Stewart. From attractor to chaotic saddle: a tale of transverse instability. *Nonlinearity*, 9(3):703–737, 1996.
- P. Ashwin, J. R. Terry, K. S. Thornburg, and R. Roy. Blowout bifurcation in a system of coupled chaotic lasers. *Phys. Rev. E*, 58(6):7186–7189, 1998.
- V. Astakhov, T. Kapitaniak, A. Shabunin, and V. Anishchenko. Non-bifurcational mechanism of loss of chaos synchronization in coupled non-identical systems. *Phys. Lett. A*, 258(2–3):99–102, 1999.
- P. J. Aston and M. Dellnitz. Symmetry breaking bifurcations of chaotic attractors. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 5(6):1643–1676, 1995.
- R. Badii, G. Broggi, B. Derighetti, M. Ravani S. Ciliberto, A. Politi, and M. A. Rubio. Dimension increase in filtered chaotic signals. *Phys. Rev. Lett.*, 60:979–982, 1988.
- R. Badii and A. Politi. *Complexity. Hierarchical Structures and Scaling in Physics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- F. Bagnoli, L. Baroni, and P. Palmerini. Synchronization and directed percolation in coupled map lattices. *Phys. Rev. E*, 59(1):409–416, 1999.
- F. Bagnoli and R. Rechtman. Synchronization and maximum Lyapunov exponents of cellular automata. *Phys. Rev. E*, 59(2):R1307–R1310, 1999.
- G. L. Baker, J. A. Blackburn, and H. J. T. Smith. A stochastic model of synchronization for chaotic pendulums. *Phys. Lett. A*, 252(3–4):191–197, 1999.
- J. Baker and J. Gollub. *Chaotic Dynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- N. Balmforth, C. Tresser, P. Worfolk, and C. W. Wu. Master-slave synchronization and the Lorenz equation. *Chaos*, 7(3):392–394, 1997.

- N. J. Balmforth, A. Jacobson, and A. Provenzale. Synchronized family dynamics in globally coupled maps. *Chaos*, 9(3):738–754, 1999.
- N. J. Balmforth and R. Sassi. A shocking display of synchrony. *Physica D*, 143(1–4):21–55, 2000.
- M. Banaji and P. Glendinning. Towards a quasi-periodic mean flow theory for globally coupled oscillators. *Phys. Lett. A*, 251:297–302, 1994.
- A.-L. Barabási and H. E. Stanley. *Fractal Concepts in Surface Growth*. Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
- S. Barbay, G. Giacomelli, and F. Marin. Stochastic resonance in vertical cavity surface emitting lasers. *Phys. Rev. E*, 61(1):157–166, 2000.
- A. Barone and G. Paterno. *Physics and Applications of the Josephson Effect*. Wiley, New York, 1982.
- C. Beck and F. Schlögl. *Thermodynamics of Chaotic Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- J. Benford, H. Sze, W. Woo, R. R. Smith, and B. Harteneck. Phase locking of relativistic magnetrons. *Phys. Rev. Lett.*, 62(8):969–971, 1989.
- T. B. Benjamin and J. E. Feir. The disintegration of wave trains on deep water. *J. Fluid Mech.*, 27:417, 1967.
- R. E. Best. *Phase-Locked Loops*. McGraw-Hill, New York, 1984.
- L. Billings, J. H. Curry, and E. Phipps. Lyapunov exponents, singularities, and a riddling bifurcation. *Phys. Rev. Lett.*, 79(6):1018–1021, 1997.
- B. Blasius, A. Huppert, and L. Stone. Complex dynamics and phase synchronization in spatially extended ecological systems. *Nature*, 399:354–359, 1999.
- I. I. Blekhman, P. S. Landa, and M. G. Rosenblum. Synchronization and chaotization in interacting dynamical systems. *Appl. Mech. Rev.*, 48(11):733–752, 1995.
- B. Boashash. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. *Proc. IEEE*, 80(4):520–568, 1992.
- S. Boccaletti, J. Bragard, F. T. Arecchi, and H. Mancini. Synchronization in nonidentical extended systems. *Phys. Rev. Lett.*, 83(3):536–539, 1999.
- S. Boccaletti, A. Farini, and F. T. Arecchi. Adaptive synchronization of chaos for secure communication. *Phys. Rev. E*, 55(5):4979–4981, 1997.
- T. Bohr, M. H. Jensen, G. Paladin, and A. Vulpiani. *Dynamical Systems Approach to Turbulence*. Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- R. Bonaccini and A. Politi. Chaotic-like behavior in chains of stable nonlinear oscillators. *Physica D*, 103:362, 1997.
- L. L. Bonilla, J. M. Casado, and M. Morillo. Self-synchronization of populations of nonlinear oscillators in the thermodynamic limit. *J. Stat. Phys.*, 48(3/4):571–591, 1987.
- L. L. Bonilla, J. C. Neu, and R. Spigler. Nonlinear stability of incoherence and collective synchronization in a population of coupled oscillators. *J. Stat. Phys.*, 67(1/2):313–330, 1992.
- L. L. Bonilla, C. J. Pérez Vicente, F. Ritort, and J. Soler. Exactly solvable

- phase oscillator models with synchronization dynamics. *Phys. Rev. Lett.*, 81(17):3643–3646, 1998.
- L. L. Bonilla, C. J. Pérez Vicente, and J. M. Rubi. Glassy synchronization in a population of coupled oscillators. *J. Stat. Phys.*, 70(3/4):921–936, 1993.
- S. Bottani. Pulse-coupled relaxation oscillators: From biological synchronization to self-organized criticality. *Phys. Rev. Lett.*, 74(21):4189–4192, 1995.
- S. Bottani. Synchronization of integrate and fire oscillators with global coupling. *Phys. Rev. E*, 54(3):2334–2350, 1996.
- C. Boyd. On the structure of the family of Cherry fields on the torus. *Ergod. Theor. Dynam. Syst.*, 5:27–46, 1985.
- M. Bračič and A. Stefanovska. Synchronization and modulation in the human cardiorespiratory system. *Physica A*, 283:451–461, 2000.
- Y. Braiman, W. L. Ditto, K. Wiesenfeld, and M. L. Spano. Disorder-enhanced synchronization. *Phys. Lett. A*, 206:54–60, 1995.
- D. M. Bramble and D. R. Carrier. Running and breathing in mammals. *Science*, 219:251–256, 1983.
- H. Bremmer. The scientific work of Balthasar van der Pol. *Philips Tech. Rev.*, 22(2):36–52, 1960/61.
- P. C. Bressloff and S. Coombes. Symmetry and phase-locking in a ring of pulse-coupled oscillators with distributed delays. *Physica D*, 126(1–2):99–122, 1999.
- J. Brindley and T. Kapitaniak. Analytic predictors for strange non-chaotic attractors. *Phys. Lett. A*, 155:361–364, 1991.
- R. Brown and N. Rulkov. Designing a coupling that guarantees synchronization between identical chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.*, 78(22):4189–4192, 1997a.
- R. Brown and N. Rulkov. Synchronization of chaotic systems: Transverse stability of trajectories in invariant manifolds. *Chaos*, 7(3):395–413, 1997b.
- L. Brunnet and H. Chaté. Phase coherence in chaotic oscillatory media. *Physica A*, 257:347–356, 1998.
- L. Brunnet, H. Chaté, and P. Manneville. Long-range order with local chaos in lattices of diffusively coupled ODEs. *Physica D*, 78:141–154, 1994.
- P. Bryant and C. Jeffries. The dynamics of phase locking and points of resonance in a forced magnetic resonator. *Physica D*, 25:196–232, 1987.
- J. Buck and E. Buck. Mechanism of rhythmic synchronous flashing of fireflies. *Science*, 159:1319–1327, 1968.
- J. Buck, E. Buck, F. E. Hanson, J. F. Case, L. Mets, and G. J. Atta. Control of flashing in fireflies. IV. Free run pacemaking in a synchronic *Pteroptyx*. *J. Comp. Physiol.*, 144:277–286, 1981.
- C. J. Buczek, R. J. Freiberg, and M. L. Skolnick. Laser injection locking. *Proc. IEEE*, 61(10):1411–1431, 1973.
- P. J. Butler and A. J. Woakes. Heart rate, respiratory frequency and wing beat frequency of free flying barnacle geese. *J. Exp. Biol.*, 85:213–226, 1980.

- J. L. Cardy, Editor. *Finite-Size Scaling*. North-Holland, Amsterdam, 1988.
- T. L. Carroll. Amplitude-independent chaotic synchronization. *Phys. Rev. E*, 53(4):3117–3122, 1996.
- T. L. Carroll, J. F. Heagy, and L. M. Pecora. Transforming signals with chaotic synchronization. *Phys. Rev. E*, 54(5):4676–4680, 1996.
- T. L. Carroll and G. A. Johnson. Synchronizing broadband chaotic systems to narrow-band signals. *Phys. Rev. E*, 57(2):1555–1558, 1998.
- T. L. Carroll and L. M. Pecora. Cascading synchronized chaotic systems. *Physica D*, 67:126–140, 1993a.
- T. L. Carroll and L. M. Pecora. Synchronizing nonautonomous chaotic circuits. *IEEE Trans. Circ. Syst.*, 40:646, 1993b.
- T. L. Carroll and L. M. Pecora. Synchronizing hyperchaotic volume-preserving maps and circuits. *IEEE Trans. Circ. Syst. I*, 45(6):656–659, 1998.
- M. L. Cartwright and J. E. Littlewood. On nonlinear differential equations of the second order. *J. London Math. Soc.*, 20:180–189, 1945.
- A. Čenys, A. N. Anagnostopoulos, and G. L. Bleris. Distribution of laminar lengths for noisy on–off intermittency. *Phys. Lett. A*, 224(6):346–352, 1997a.
- A. Čenys, A. N. Anagnostopoulos, and G. L. Bleris. Symmetry between laminar and burst phases for on–off intermittency. *Phys. Rev. E*, 56(3):2592–2596, 1997b.
- A. Čenys, A. Namajunas, A. Tamasevicius, and T. Schneider. On–off intermittency in chaotic synchronization experiment. *Phys. Lett. A*, 213:259–264, 1996.
- J. Cernacek. Stabilography in neurology. *Agressologie D*, 21:25–29, 1980.
- H. Chaté and P. Manneville. Collective behaviors in spatially extended systems with local interactions and synchronous updating. *Prog. Theor. Phys.*, 87(1):1–60, 1992.
- H. Chaté and P. Manneville. Phase diagram of the two-dimensional complex Ginzburg-Landau equation. *Physica A*, 224:348, 1996.
- H. Chaté, A. Pikovsky, and O. Rudzick. Forcing oscillatory media: Phase kinks vs. synchronization. *Physica D*, 131(1–4):17–30, 1999.
- Chia-Chu Chen. Threshold effects on synchronization of pulse-coupled oscillators. *Phys. Rev. E*, 49:2668–2672, 1994.
- M. Y. Choi, H. J. Kim, D. Kim, and H. Hong. Synchronization in a system of globally coupled oscillators with time delay. *Phys. Rev. E*, 61(1):371–381, 2000.
- B. Christiansen, P. Alstrøm, and M. T. Levinsen. Routes to chaos and complete phase locking in modulated relaxational oscillators. *Phys. Rev. A*, 42(4):1891–1900, 1990.
- B. Christiansen, P. Alstrøm, and M. T. Levinsen. Collective dynamics of coupled modulated oscillators with random pinning. *Physica D*, 56:23–35, 1992.

- J. J. Collins and I. N. Stewart. Coupled nonlinear oscillators and the symmetries of animal gaits. *J. Nonlinear Sci.*, 3:349–392, 1993.
- S. Coombes. Liapunov exponents and mode-locked solutions for integrate-and-fire dynamical systems. *Phys. Lett. A*, 255(1–2):49–57, 1999.
- S. Coombes and P. C. Bressloff. Mode locking and Arnold tongues in integrate-and-fire neural oscillators. *Phys. Rev. E*, 60(2):2086–2096, 1999.
- Á. Corral, C. J. Pérez, A. Díaz-Guilera, and A. Arenas. Self-organized criticality and synchronization in a lattice model of integrate-and-fire oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 74(1):118–121, 1995a.
- Á. Corral, C. J. Pérez, A. Díaz-Guilera, and A. Arenas. Synchronization in a lattice model of pulse-coupled oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 75(20):3697–3700, 1995b.
- D. Cortez and S. J. Elledge. Conducting the mitotic symphony. *Nature*, 406:354–356, 2000.
- P. Couillet and K. Emilsson. Pattern formation in the strong resonant forcing of spatially distributed oscillators. *Physica A*, 188:190–200, 1992a.
- P. Couillet and K. Emilsson. Strong resonances of spatially distributed oscillators: A laboratory to study patterns and defects. *Physica D*, 61:119–131, 1992b.
- H. Crauel and F. Flandoli. Attractors for random dynamical systems. *Probab. Theory Relat. Fields*, 100:365–393, 1994.
- J. D. Crawford. Amplitude expansions for instabilities in populations of globally-coupled oscillators. *J. Stat. Phys.*, 74(5/6):1047–1084, 1994.
- J. D. Crawford. Scaling and singularities in the entrainment of globally coupled oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 74(21):4341–4344, 1995.
- J. D. Crawford and K. T. R. Davies. Synchronization of globally coupled phase oscillators: Singularities and scaling for general couplings. *Physica D*, 125(1–2):1–46, 1999.
- A. Crisanti, M. Falconi, and A. Vulpiani. Broken ergodicity and glassy behavior in a deterministic chaotic map. *Phys. Rev. Lett.*, 76(4):612–615, 1996.
- A. Crisanti, G. Paladin, and A. Vulpiani. *Products of Random Matrices in Statistical Physics*. Springer, Berlin, 1993.
- M. C. Cross and P. C. Hohenberg. Pattern formation outside of equilibrium. *Rev. Mod. Phys.*, 65:851–1112, 1993.
- J. P. Crutchfield and K. Kaneko. Are attractors relevant to turbulence? *Phys. Rev. Lett.*, 60:2715–2718, 1988.
- K. M. Cuomo and A. V. Oppenheim. Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications. *Phys. Rev. Lett.*, 71(1):65–68, 1993.
- K. M. Cuomo, A. V. Oppenheim, and S. H. Strogatz. Robustness and signal recovery in a synchronized chaotic system. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 3(6):1629–1638, 1993a.
- K. M. Cuomo, A. V. Oppenheim, and S. H. Strogatz. Synchronization of Lorenz-based chaotic circuits with applications to communications. *IEEE*

- Trans. Circ. Syst.*, 40:626–633, 1993b.
- C. A. Czeisler, J. S. Allan, S. H. Strogatz, J. M. Ronda, R. Sánchez, C. D. Ríos, W. O. Freitag, G. S. Richardson, and R. E. Kronauer. Bright light resets the human circadian pacemaker independent of the timing of the sleep–wake cycle. *Science*, 233:667–671, 1986.
- C. A. Czeisler, J. F. Duffy, T. L. Shanahan, E. N. Brown, J. F. Mitchell, D. W. Rimmer, J. M. Ronda, E. J. Silva, J. S. Allan, J. S. Emens, D.-J. Dijk, and R. E. Kronauer. Stability, precision, and near-24-hour period of the human circadian pacemaker. *Science*, 284:2177–2181, 1999.
- H. Daido. Intrinsic fluctuations and a phase transition in a class of large population of interacting oscillators. *J. Stat. Phys.*, 60(5/6):753–800, 1990.
- H. Daido. Order function and macroscopic mutual entrainment in uniformly coupled limit-cycle oscillators. *Prog. Theor. Phys.*, 88(6):1213–1218, 1992a.
- H. Daido. Quasientrainment and slow relaxation in a population of oscillators with random and frustrated interactions. *Phys. Rev. Lett.*, 68(7):1073–1076, 1992b.
- H. Daido. Critical conditions of macroscopic mutual entrainment in uniformly coupled limit-cycle oscillators. *Prog. Theor. Phys.*, 89(4):929–934, 1993a.
- H. Daido. A solvable model of coupled limit-cycle oscillators exhibiting perfect synchrony and novel frequency spectra. *Physica D*, 69:394–403, 1993b.
- H. Daido. Multi-branch entrainment and multi-peaked order-functions in a phase model of limit-cycle oscillators with uniform all-to-all coupling. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 28:L151–L157, 1995.
- H. Daido. Onset of cooperative entrainment in limit-cycle oscillators with uniform all-to-all interactions: Bifurcation of the order function. *Physica D*, 91:24–66, 1996.
- D. Dawson and J. Gärtner. Large deviations from the McKean–Vlasov limit for weakly interacting diffusions. *Stochastics*, 20:247–308, 1987.
- M. de Sousa Vieira and A. J. Lichtenberg. Nonuniversality of weak synchronization in chaotic systems. *Phys. Rev. E*, 56(4):R3741–3744, 1997.
- M. de Sousa Vieira, A. J. Lichtenberg, and M. A. Lieberman. Synchronization of regular and chaotic systems. *Phys. Rev. A*, 46(12):R7359–R7362, 1992.
- M. de Sousa Vieira, A. J. Lichtenberg, and M. A. Lieberman. Self synchronization of many coupled oscillations. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 4(6):1563–1577, 1994.
- A. Denjoy. Sur les courbes définies par les équations différentielles à la surface du tore. *J. Math. Pure Appl.*, 11:333–375, 1932.
- R. L. Devaney. *An Introduction to Chaotic Dynamical Systems*. Addison-Wesley, Reading MA, 1989.
- N. E. Diamant and A. Bortoff. Nature of the intestinal slow-wave frequency. *Am. J. Physiol.*, 216(2):301–307, 1969.
- A. Díaz-Guilera, C. J. Pérez, and A. Arenas. Mechanisms of synchronization and pattern formation in a lattice of pulse-coupled oscillators. *Phys. Rev. E*, 57(4):3820–3828, 1998.

- M. Ding, C. Grebogi, and E. Ott. Evolution of attractors in quasiperiodically forced systems: From quasiperiodic to strange nonchaotic to chaotic. *Phys. Rev. A*, 39(5):2593–2598, 1989.
- M. Ding and W. Yang. Stability of synchronous chaos and on–off intermittency in coupled map lattices. *Phys. Rev. E*, 56(4):4009–4016, 1997.
- W. L. Ditto, M. L. Spano, H. T. Savage, S. N. Rauseo, J. Heagy, and E. Ott. Experimental observation of a strange nonchaotic attractor. *Phys. Rev. Lett.*, 65:533, 1990.
- M. Dolnik and I. R. Epstein. Coupled chaotic chemical oscillators. *Phys. Rev. E*, 54(4):3361–3368, 1996.
- B. Drossel. Self-organized criticality and synchronization in a forest-fire-model. *Phys. Rev. Lett.*, 76(6):936–939, 1996.
- G. S. Duane. Synchronized chaos in extended systems and meteorological teleconnections. *Phys. Rev. E*, 56(6):6475–6493, 1997.
- J. Dudel and W. Trautwein. Der Mechanismus der automatischen rhythmischen Impulsbildung der Herzmusselfaser. *Pflügers Arch.*, 313:553, 1958.
- G. I. Dykman, P. S. Landa, and Yu. I. Neymark. Synchronizing the chaotic oscillations by external force. *Chaos, Solit. Fract.*, 1(4):339–353, 1991.
- W. H. Eccles and J. H. Vincent. British Patent Spec. clxiii p.462, 1920. Application date 17.02.1920.
- R. J. Elble and W. C. Koller. *Tremor*. John Hopkins University Press, Baltimore, 1990.
- C. Elphick, A. Hagberg, and E. Meron. Multiphase patterns in periodically forced oscillatory systems. *Phys. Rev. E*, 59(5):5285–5291, 1999.
- R. C. Elson, A. I. Selverston, R. Huerta, N. F. Rulkov, M. I. Rabinovich, and H. D. I. Abarbanel. Synchronous behavior of two coupled biological neurons. *Phys. Rev. Lett.*, 81(25):5692–5695, 1998.
- C. Elton and M. Nicholson. The ten-year cycle in numbers of the lynx in Canada. *J. Anim. Ecol.*, 11:215–244, 1942.
- J. Engel and T. A. Pedley. *Epilepsy: A Comprehensive Textbook*. Lippincott-Raven, Philadelphia, 1975.
- G. B. Ermentrout. The behavior of rings of coupled oscillators. *J. Math. Biol.*, 23:55–74, 1985.
- G. B. Ermentrout. Oscillator death in populations of “all to all” coupled nonlinear oscillators. *Physica D*, 41:219–231, 1990.
- G. B. Ermentrout and N. Kopell. Frequency plateaus in a chain of weakly coupled oscillators, I. *SIAM J. Math. Anal.*, 15(2):215–237, 1984.
- G. B. Ermentrout and J. Rinzel. Beyond a pacemaker’s entrainment limit: Phase walk-through. *Am. J. Physiol.*, 246:R102–106, 1984.
- U. Ernst, K. Pawelzik, and T. Geisel. Synchronization induced by temporal delays in pulse-coupled oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 74(9):1570–1573, 1995.
- U. Ernst, K. Pawelzik, and T. Geisel. Delay-induced multistable synchronization of biological oscillators. *Phys. Rev. E*, 57(2):2150–2162,

- 1998.
- M. S. Feldman. Non-linear system vibration analysis using Hilbert transform I. Free vibration analysis method “FREEVIB”. *Mech. Syst. Signal Proc.*, 8 (2):119–127, 1994.
- R. Femat and G. Solis-Perales. On the chaos synchronization phenomena. *Phys. Lett. A*, 262(1):50–60, 1999.
- M. Franz and M. Zhang. Suppression and creation of chaos in a periodically forced Lorenz system. *Phys. Rev. E*, 52(4):3558–3565, 1995.
- H.-J. Freund. Motor unit and muscle activity in voluntary motor control. *Physiol. Rev.*, 63(2):387–436, 1983.
- H. Fujigaki, M. Nishi, and T. Shimada. Synchronization of nonlinear systems with distinct parameters: Phase synchronization and metamorphosis. *Phys. Rev. E*, 53(4):3192–3197, 1996.
- H. Fujigaki and T. Shimada. Phase synchronization and nonlinearity decision in the network of chaotic flows. *Phys. Rev. E*, 55(3):2426–2433, 1997.
- H. Fujisaka, H. Ishii, M. Inoue, and T. Yamada. Intermittency caused by chaotic modulation II. *Prog. Theor. Phys.*, 76(6):1198–1209, 1986.
- H. Fujisaka, S. Matsushita, and T. Yamada. Fluctuation-controlled transient below the on-off intermittency transition. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 30(16):5697–5707, 1997.
- H. Fujisaka, K. Ouchi, H. Hata, B. Masaoka, and S. Miyazaki. On-off intermittency in oscillatory media. *Physica D*, 114(3–4):237–250, 1998.
- H. Fujisaka and T. Yamada. Stability theory of synchronized motion in coupled-oscillator systems. *Prog. Theor. Phys.*, 69(1):32–47, 1983.
- H. Fujisaka and T. Yamada. A new intermittency in coupled dynamical systems. *Prog. Theor. Phys.*, 74(4):918–921, 1985.
- H. Fujisaka and T. Yamada. Stability theory of synchronized motion in coupled-oscillator systems. IV. Instability of synchronized chaos and new intermittency. *Prog. Theor. Phys.*, 75(5):1087–1104, 1986.
- H. Fujisaka and T. Yamada. Intermittency caused by chaotic modulation. III. Self-similarity and higher order correlation functions. *Prog. Theor. Phys.*, 77(5):1045–1056, 1987.
- J. M. Furman. Posturography: Uses and limitations. In *Baillière’s Clinical Neurology*, volume 3, pages 501–513. Baillière Tindall, London, 1994.
- D. Gabor. Theory of communication. *J. IEE (London)*, 93(3):429–457, 1946.
- P. M. Gade. Synchronization of oscillators with random nonlocal connectivity. *Phys. Rev. E*, 54(1):64–70, 1996.
- J. A. C. Gallas, P. Grassberger, H. J. Herremann, and P. Ueberholz. Noisy collective behaviour in deterministic cellular automata. *Physica A*, 180:19–41, 1992.
- L. Gammaitoni, P. Hänggi, P. Jung, and F. Marchesoni. Stochastic resonance. *Rev. Mod. Phys.*, 70:223–288, 1998.
- C. W. Gardiner. *Handbook of Stochastic Methods*. Springer, Berlin, 1990.
- D. J. Gauthier and J. C. Bienfang. Intermittent loss of synchronization

- in coupled chaotic oscillators: Toward a new criterion for high-quality synchronization. *Phys. Rev. Lett.*, 77(9):1751–1754, 1996.
- W. Gerstner. Time structure of the activity in neural network models. *Phys. Rev. E*, 51(1):738–758, 1995.
- L. Glass. Cardiac arrhythmias and circle maps. *Chaos*, 1:13–19, 1991.
- L. Glass. Synchronization and rhythmic processes in physiology. *Nature*, 410:277–284, 2001.
- L. Glass and A. Shrier. Low-dimensional dynamics in the heart. In L. Glass, P. Hunter, and A. McCulloch, Editors, *Theory of Heart*, pages 289–312. Springer, New York, 1991.
- P. Glendinning. *Stability, Instability and Chaos*. Cambridge University Press, Cambridge, 1994.
- P. Glendinning. The stability boundary of synchronized states in globally coupled dynamical systems. *Phys. Lett. A*, 259:129–134, 1999.
- P. Glendinning, U. Feudel, A. Pikovsky, and J. Stark. The structure of mode-locking regions in quasi-periodically forced circle maps. *Physica D*, 140(1):227–243, 2000.
- P. Glendinning and M. Proctor. Travelling waves with spatially resonant forcing: Bifurcation of a modified Landau equation. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 3(6):1447–1455, 1993.
- N. R. J. Glossop, L. C. Lyons, and P. E. Hardin. Interlocked feedback loops within the *Drosophila* circadian oscillator. *Science*, 286:766–768, 1999.
- L. Goldberg, H. F. Taylor, and J. F. Weller. Injection locking of coupled-stripe diode laser arrays. *Appl. Phys. Lett.*, 46(3):236–238, 1985.
- D. Golomb, D. Hansel, B. Shraiman, and H. Sompolinsky. Clustering in globally coupled phase oscillators. *Phys. Rev. A*, 45(6):3516, 1992.
- D. L. Gonzalez and O. Piro. Symmetric kicked self-oscillators: Iterated maps, strange attractors, and symmetry of the phase-locking Farey hierarchy. *Phys. Rev. Lett.*, 55(1):17–20, 1985.
- J. M. González-Miranda. Chaotic systems with a null conditional Lyapunov exponent under nonlinear driving. *Phys. Rev. E*, 53(1):R5–R8, 1996a.
- J. M. González-Miranda. Synchronization of symmetric chaotic systems. *Phys. Rev. E*, 53(6):5656–5669, 1996b.
- J. M. Gonzalez-Miranda. Communications by synchronization of spatially symmetric chaotic systems. *Phys. Lett. A*, 251(2):115–120, 1999.
- M. Gorman, P. J. Widmann, and K. A. Robbins. Chaotic flow regimes in a convective loop. *Phys. Rev. Lett.*, 52(25):2241–2244, 1984.
- M. Gorman, P. J. Widmann, and K. A. Robbins. Nonlinear dynamics of a convection loop: a quantitative comparison of experiment with theory. *Physica D*, 19(2):255–267, 1986.
- A. Goryachev, H. Chaté, and R. Kapral. Synchronization defects and broken symmetry in spiral waves. *Phys. Rev. Lett.*, 80(4):873–876, 1998.
- A. Goryachev and R. Kapral. Spiral waves in chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.*, 76(10):1619–1622, 1996.

- P. Grassberger. Are damage spreading transitions generically in the universality class of directed percolation? *J. Stat. Phys.*, 79(1–2):13, 1995.
- P. Grassberger. Synchronization of coupled systems with spatiotemporal chaos. *Phys. Rev. E*, 59(3):R2520–R2522, 1999.
- C. Graves, L. Glass, D. Laporta, R. Meloche, and A. Grassino. Respiratory phase locking during mechanical ventilation in anesthetized human subjects. *Am. J. Physiol.*, 250:R902–R909, 1986.
- C. M. Gray, P. König, A. K. Engel, and W. Singer. Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties. *Nature*, 338:334–337, 1989.
- C. Grebogi, E. Ott, S. Pelikan, and J. A. Yorke. Strange attractors that are not chaotic. *Physica D*, 13:261–268, 1984.
- G. Grinstein, D. Mukamel, R. Seidin, and C. H. Bennett. Temporally periodic phases and kinetic roughening. *Phys. Rev. Lett.*, 70(23):3607–3610, 1993.
- J. Guckenheimer. Isochrons and phaseless sets. *J. Math. Biol.*, 1:259–273, 1975.
- J. Guckenheimer and P. Holmes. *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*. Springer, New York, 1986.
- J. Güémez, C. Martín, and M. A. Matías. Approach to the chaotic synchronized state of some driving methods. *Phys. Rev. E*, 55(1):124–134, 1997.
- J. Güémez and M. A. Matías. Synchronization in small assemblies of chaotic systems. *Phys. Rev. E*, 53(4):3059–3067, 1996.
- M. R. Guevara. Iteration of the human atrioventricular (AV) nodal recovery curve predicts many rhythms of AV block. In L. Glass, P. Hunter, and A. McCulloch, Editors, *Theory of Heart*, pages 313–358. Springer, New York, 1991.
- M. R. Guevara, L. Glass, and A. Shrier. Phase-locking, period-doubling bifurcations and irregular dynamics in periodically stimulated cardiac cells. *Science*, 214:1350–1353, 1981.
- M. R. Guevara, A. Shrier, and L. Glass. Phase-locked rhythms in periodically stimulated cardiac cells. *Am. J. Physiol.*, 254:H1–10, 1989.
- N. Gupte and R. E. Amritkar. Synchronization of chaotic orbits: The influence of unstable periodic orbits. *Phys. Rev. E*, 48(3):R1620–R1623, 1993.
- H. Gutowitz, Editor. *Cellular Automata: Theory and Experiment*. North-Holland, Amsterdam, 1990.
- R. Guttman, S. Lewis, and J. Rinzel. Control of repetitive firing in squid axon membrane as a model for a neuron oscillator. *J. Physiol. (London)*, 305:377–395, 1980.
- H. Haken. *Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems*. Springer, Berlin, 1988; 2nd edition, 1999.
- H. Haken. *Advanced Synergetics: Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems*. Springer, Berlin, 1993.
- H. Haken, J. A. S. Kelso, and H. Bunz. A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biol. Cybern.*, 51:347–356, 1985.

- V. Hakim and W. J. Rappel. Dynamics of the globally coupled complex Ginzburg–Landau equation. *Phys. Rev. A*, 46(12):R7347–R7350, 1992.
- J. K. Hale and H. Koçak. *Dynamics and Bifurcations*. Springer, New York, 1991.
- G. M. Hall, S. Bahar, and D. J. Gauthier. Prevalence of rate-dependent behaviors in cardiac muscle. *Phys. Rev. Lett.*, 82(14):2995–2998, 1999.
- T. Halpin-Healy and Y.-C. Zhang. Kinetic roughening phenomena, stochastic growth, directed polymers and all that. *Physics Reports*, 254:215–414, 1995.
- M. Hämäläinen, R. Hari, R. J. Ilmoniemi, J. Knuutila, and O. V. Lounasmaa. Magnetoencephalography – Theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain. *Rev. Mod. Phys.*, 65:413–497, 1993.
- P. W. Hammer, N. Platt, S. M. Hammel, J. F. Heagy, and B. D. Lee. Experimental observation of on–off intermittency. *Phys. Rev. Lett.*, 73(8):1095–1098, 1994.
- S. K. Han, C. Kurrer, and Y. Kuramoto. Dephasing and bursting in coupled neural oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 75:3190–3193, 1995.
- S. K. Han, Ch. Kurrer, and Y. Kuramoto. Diffusive interaction leading to dephasing of coupled neural oscillators. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 7(4):869–876, 1997.
- D. Hansel, G. Mato, and C. Meunier. Clustering and slow switching in globally coupled phase oscillators. *Phys. Rev. E*, 48(5):3470–3477, 1993.
- M. Hasler, Yu. Maistrenko, and O. Popovych. Simple example of partial synchronization of chaotic systems. *Phys. Rev. E*, 58(5):6843–6846, 1998.
- R. He and P. G. Vaidya. Time delayed chaotic systems and their synchronization. *Phys. Rev. E*, 59(4):4048–4051, 1999.
- J. F. Heagy and T. L. Carroll. Chaotic synchronization in Hamiltonian systems. *Chaos*, 4:385, 1994.
- J. F. Heagy, T. L. Carroll, and L. M. Pecora. Experimental and numerical evidence for riddled basins in coupled chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.*, 73(26):3528, 1994a.
- J. F. Heagy, T. L. Carroll, and L. M. Pecora. Synchronous chaos in coupled oscillator systems. *Phys. Rev. E*, 50(3):1874–1884, 1994b.
- J. F. Heagy, T. L. Carroll, and L. M. Pecora. Desynchronization by periodic orbits. *Phys. Rev. E*, 52(2):R1253–R1256, 1995.
- J. F. Heagy and S. M. Hammel. The birth of strange nonchaotic attractors. *Physica D*, 70:140–153, 1994.
- J. F. Heagy, N. Platt, and S. M. Hammel. Characterization of on–off intermittency. *Phys. Rev. E*, 49(2):1140–1150, 1994c.
- M. R. Herman. Une méthode pour minorer les exposants de Lyapunov et quelques exemples montrant le caractère local d’un théorème d’Arnold et de Moser sur le tori de dimension 2. *Comment. Math. Helvetici*, 58:453, 1983.
- A. V. Herz and J. J. Hopfield. Earthquake cycles and neural reverberations:

- Collective oscillations in systems with pulse-coupled threshold elements. *Phys. Rev. Lett.*, 75(6):1222–1225, 1995.
- H. Herzog and J. Freund. Chaos, noise, and synchronization reconsidered. *Phys. Rev. E*, 52(3):3238, 1995.
- R. C. Hilborn. *Chaos and Nonlinear Dynamics: An Introduction for Scientists and Engineers*. Oxford University Press, Oxford, New York, 1994.
- P. Holmes and D. R. Rand. Bifurcations of the forced van der Pol oscillator. *Quart. Appl. Math.*, 35:495–509, 1978.
- H. Hong, M. Y. Choi, K. Park, B. G. Yoon, and K. S. Soh. Synchronization and resonance in a driven system of coupled oscillators. *Phys. Rev. E*, 60(4):4014–4020, 1999a.
- H. Hong, M. Y. Choi, J. Yi, and K.-S. Soh. Inertia effects on periodic synchronization in a system of coupled oscillators. *Phys. Rev. E*, 59(1):353–363, 1999b.
- H. Hong, M. Y. Choi, B.-G. Yoon, K. Park, and K.-S. Soh. Noise effects on synchronization in systems of coupled oscillators. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 32:L9–L15, 1999c.
- J. J. Hopfield. Neurons, dynamics and computation. *Phys. Today*, pages 40–46, February 1994.
- J. J. Hopfield and A. V. M. Herz. Rapid local synchronization of action potentials: Toward computation with coupled integrate-and-fire neurons. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 92:6655–6662, 1995.
- F. C. Hoppensteadt and E. M. Izhikevich. *Weakly Connected Neural Networks*. Springer, Berlin, 1997.
- F. C. Hoppensteadt and E. M. Izhikevich. Oscillatory neurocomputers with dynamic connectivity. *Phys. Rev. Lett.*, 82(14):2983–2986, 1999.
- D. Hoyer, O. Hader, and U. Zwiener. Relative and intermittent cardiorespiratory coordination. *IEEE Eng. Med. Biol.*, 16(6):97–104, 1997.
- G. Hu, J. Xiao, J. Yang, F. Xie, and Zh. Qu. Synchronization of spatiotemporal chaos and its applications. *Phys. Rev. E*, 56(3):2738–2746, 1997.
- B. R. Hunt, E. Ott, and J. A. Yorke. Differentiable generalized synchronization of chaos. *Phys. Rev. E*, 55(4):4029–4034, 1997.
- Ch. Huygens (Hugenii). *Horologium Oscillatorium*. Apud F. Muguet, Parisiis, France, 1673. English translation: *The Pendulum Clock*, Iowa State University Press, Ames, 1986. Русский перевод: Х. Гюйгенс. *Три мемуара по механике*. Изд-во АН СССР, М., 1951.
- Ch. Huygens. *Œuvres Complètes*, volume 15. Swets & Zeitlinger B. V., Amsterdam, 1967a.
- Ch. Huygens. *Œuvres Complètes*, volume 17. Swets & Zeitlinger B. V., Amsterdam, 1967b.
- J. M. Hyman, B. Nicolaenko, and S. Zaleski. Order and complexity in the Kuramoto–Sivashinsky model of weakly turbulent interfaces. *Physica D*, 23(1–3):265–292, 1986.

- A. K. Jain, K. K. Likharev, J. E. Lukens, and J. E. Sauvageau. Mutual phase-locking in Josephson junction arrays. *Phys. Reports*, 109(6):309–426, 1984.
- J. Jalife and C. Antzelevitch. Phase resetting and annihilation of pacemaker activity in cardiac tissue. *Science*, 206:695–697, 1979.
- M. H. Jensen, P. Bak, and T. Bohr. Complete devil's staircase, fractal dimension and universality of mode-locking structure in the circle map. *Phys. Rev. Lett.*, 50(21):1637–1639, 1983.
- M. H. Jensen, P. Bak, and T. Bohr. Transition to chaos by interaction of resonances in dissipative systems. I. Circle maps. *Phys. Rev. A*, 30(4):1960–1969, 1984.
- Y. Jiang and P. Parmananda. Synchronization of spatiotemporal chaos in asymmetrically coupled map lattices. *Phys. Rev. E*, 57(4):4135–4139, 1998.
- G. A. Johnson, D. J. Mar, T. L. Carroll, and L. M. Pecora. Synchronization and imposed bifurcations in the presence of large parameter mismatch. *Phys. Rev. Lett.*, 80(18):3956–3959, 1998.
- L. Junge and U. Parlitz. Phase synchronization of coupled Ginzburg–Landau equations. *Phys. Rev. E*, 62(1):438–441, 2000.
- E. Kaempfer. *The History of Japan (With a Description of the Kingdom of Siam)*. Sloane, London, 1727. Posthumous translation; or reprint by McLehose, Glasgow, 1906.
- P. B. Kahn. *Mathematical Methods for Scientists and Engineers: Linear and Nonlinear Systems*. Wiley, New York, 1990.
- K. Kaneko. Clustering, coding, switching, hierarchical ordering and control in network of chaotic elements. *Physica D*, 41:137–172, 1990.
- K. Kaneko. Globally coupled circle maps. *Physica D*, 54(1):5–19, 1991.
- K. Kaneko, Editor. *Theory and Applications of Coupled Map Lattices*. Wiley, Chichester, 1993.
- K. Kaneko. Dominance of Milnor attractors and noise-induced selection in a multiattractor system. *Phys. Rev. Lett.*, 78(14):2736–2739, 1997.
- K. Kaneko. On the strength of attractors in a high-dimensional system: Milnor attractor network, robust global attraction, and noise-induced selection. *Physica D*, 124:322–344, 1998.
- H. Kantz and T. Schreiber. *Nonlinear Time Series Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- T. Kapitaniak, Y. Maistrenko, A. Stefanski, and J. Brindley. Bifurcations from locally to globally riddled basins. *Phys. Rev. E*, 57(6):R6253–R6256, 1998.
- T. Kapitaniak and Yu. L. Maistrenko. Chaos synchronization and riddled basins in two coupled one-dimensional maps. *Chaos Solit. Fract.*, 9(1–2):271–282, 1998.
- T. Kapitaniak, J. Wojewoda, and J. Brindley. Synchronization and desynchronization in quasi-hyperbolic chaotic systems. *Phys. Lett. A*, 210:283–289, 1996.
- D. Kaplan and L. Glass. *Understanding Nonlinear Dynamics*. Springer, New York, 1995.

- J. L. Kaplan, J. Mallet-Paret, and J. A. Yorke. The Lyapunov dimension of a nowhere differentiable attracting torus. *Ergod. Theor. Dynam. Syst.*, 4: 261–281, 1984.
- J. L. Kaplan and J. A. Yorke. Chaotic behavior of multidimensional difference equations. In H. O. Walter and H.-O. Peitgen, Editors, *Functional Differential Equations and Approximation of Fixed Points*, volume 730 of *Lecture Notes in Mathematics*, pages 204–227. Springer, Berlin, 1979.
- R. Kapral and K. Showalter, Editors. *Chemical Waves and Patterns*. Kluwer, Dordrecht, 1995.
- G. Keller. A note on strange nonchaotic attractors. *Fund. Math.*, 151:139–148, 1996.
- T. Kenner, H. Pessenhofer, and G. Schwabergger. Method for the analysis of the entrainment between heart rate and ventilation rate. *Pflügers Arch.*, 363:263–265, 1976.
- P. Khoury, M. A. Lieberman, and A. J. Lichtenberg. Degree of synchronization of noisy maps on the circle. *Phys. Rev. E*, 54(4):3377–3388, 1996.
- P. Khoury, M. A. Lieberman, and A. J. Lichtenberg. Experimental measurement of the degree of chaotic synchronization using a distribution exponent. *Phys. Rev. E*, 57(5):5448–5466, 1998.
- C.-M. Kim. Mechanism of chaos synchronization and on-off intermittency. *Phys. Rev. E*, 56(3):3697–3700, 1997.
- V. Kirk and E. Stone. Effect of a refractory period on the entrainment of pulse-coupled integrate-and-fire oscillators. *Phys. Lett. A*, 232:70–76, 1997.
- L. Kocarev and U. Parlitz. Generalized synchronization, predictability, and equivalence of unidirectionally coupled dynamical systems. *Phys. Rev. Lett.*, 76(11):1816–1819, 1996.
- L. Kocarev, Z. Tasev, and U. Parlitz. Synchronizing spatiotemporal chaos of partial differential equations. *Phys. Rev. Lett.*, 79(1):51–54, 1997.
- H. P. Koepchen. Physiology of rhythms and control systems: An integrative approach. In H. Haken and H. P. Koepchen, Editors, *Rhythms in Physiological Systems*, volume 55 of *Springer Series in Synergetics*, pages 3–20, Springer, Berlin, 1991.
- R. Konnur. Equivalence of synchronization and control of chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.*, 77(14):2937–2940, 1996.
- N. Kopell and G. B. Ermentrout. Symmetry and phase locking in chains of weakly coupled oscillators. *Comm. Pure Appl. Math.*, 39:623–660, 1986.
- N. Koshiya and J. C. Smith. Neuronal pacemaker for breathing visualized *in vitro*. *Nature*, 400:360–363, 1999.
- Y. Kuramoto. Self-entrainment of a population of coupled nonlinear oscillators. In H. Araki, Editor, *International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics*, volume 39 of *Springer Lecture Notes in Physics*, page 420, Springer, New York, 1975.
- Y. Kuramoto. *Chemical Oscillations, Waves and Turbulence*. Springer, Berlin, 1984.

- Y. Kuramoto, T. Aoyagi, I. Nishikawa, T. Chawanya, and K. Okuda. Neural network model carrying phase information with application to collective dynamics. *Prog. Theor. Phys.*, 87(5):1119–1126, 1992.
- Y. Kuramoto and T. Tsuzuki. Persistent propagation of concentration waves in dissipative media far from thermal equilibrium. *Prog. Theor. Phys.*, 55:356, 1976.
- K. Kurokawa. Injection locking of microwave solid-state oscillators. *Proc. IEEE*, 61(10):1386–1410, 1973.
- C. Kurrer. Synchronization and desynchronization of weakly coupled oscillators. *Phys. Rev. E*, 56(4):3799–3802, 1997.
- J. Kurths, Editor. A focus issue on phase synchronization in chaotic systems. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 10:2289–2667, 2000.
- J. Kurths and A. S. Pikovsky. Symmetry breaking in distributed systems and modulational spatio-temporal intermittency. *Chaos Solit. Fract.*, 5(10):1893–1899, 1995.
- S. Kuznetsov, A. Pikovsky, and U. Feudel. Birth of a strange nonchaotic attractor: A renormalization group analysis. *Phys. Rev. E*, 51(3):R1629–R1632, 1995.
- Y.-Ch. Lai. Symmetry-breaking bifurcation with on-off intermittency in chaotic dynamical systems. *Phys. Rev. E*, 53(5):4267–4270, 1996a.
- Y.-Ch. Lai. Transition from strange nonchaotic to strange chaotic attractors. *Phys. Rev. E*, 53(1):57–65, 1996b.
- Y.-Ch. Lai. Scaling laws for noise-induced temporal riddling in chaotic systems. *Phys. Rev. E*, 56(4):3897–3908, 1997.
- Y.-Ch. Lai and C. Grebogi. Noise-induced riddling in chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.*, 77(25):5047–5050, 1996.
- Y.-Ch. Lai, C. Grebogi, J. A. Yorke, and S. C. Venkataramani. Riddling bifurcation in chaotic dynamical systems. *Phys. Rev. Lett.*, 77(1):55–58, 1996.
- B. C. Lampkin, T. Nagao, and A. M. Mauer. Synchronization of the mitotic cycle in acute leukaemia. *Nature*, 222:1274–1275, 1969.
- P. S. Landa and M. G. Rosenblum. Synchronization and chaotization of oscillations in coupled self-oscillating systems. *Appl. Mech. Rev.*, 46(7):414–426, 1993.
- K. J. Lee, Y. Kwak, and T. K. Lim. Phase jumps near a phase synchronization transition in systems of two coupled chaotic oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 81(2):321–324, 1998.
- G. V. Levina and A. A. Nepomnyaschiy. Analysis of an amplitude equation for autovibrational flow regimes at resonance external forces. *A. Angew. Math. Mech.*, 66(6):241–246, 1986.
- A. J. Lichtenberg and M. A. Leiberman. *Regular and Chaotic Dynamics*. Springer, New York, 1992.
- K. K. Likharev. *Dynamics of Josephson Junctions and Circuits*. Gordon and Breach, Philadelphia, 1991.

- A. L. Lin, M. Bertram, K. Martinez, H. L. Swinney, A. Ardelea, and G. F. Carey. Resonant phase patterns in a reaction–diffusion system. *Phys. Rev. Lett.*, 84(18):4240–4243, 2000.
- W. C. Lindsey and C. M. Chie, Editors. *Phase-Locked Loops*. IEEE Press, New York, 1985.
- M. Lipp and N. S. Longridge. Computerized dynamic posturography: Its place in the evaluation of patients with dizziness and imbalance. *J. Otolaryngology*, 23(3):177–183, 1994.
- J. N. Little and L. Shure. *Signal Processing Toolbox for Use with MATLAB. User's Guide*. Mathworks, Natick, MA, 1992.
- Z. Liu and S. Chen. Symbolic analysis of generalized synchronization of chaos. *Phys. Rev. E*, 56(6):7297–7300, 1997.
- Z. H. Liu, S. G. Chen, and B. B. Hu. Coupled synchronization of spatiotemporal chaos. *Phys. Rev. E*, 59(3):2817–2821, 1999.
- L. Longa, S. P. Dias, and E. M. F. Curado. Lyapunov exponents and coalescence of chaotic trajectories. *Phys. Rev. E*, 56(1):259–263, 1997.
- A. Longtin, A. Bulsara, D. Pierson, and F. Moss. Bistability and the dynamics of periodically forced sensory neurons. *Biol. Cybernetics*, 70:569–578, 1994.
- A. Longtin and D. R. Chialvo. Stochastic and deterministic resonances for excitable systems. *Phys. Rev. Lett.*, 81(18):4012–4015, 1998.
- R. Lopez-Ruiz and Y. Pomeau. Transition between two oscillation modes. *Phys. Rev. E*, 55(4):R3820–R3823, 1997.
- E. N. Lorenz. Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, 20:130–141, 1963.
- E. N. Lorenz. *The Essence of Chaos*. University of Washington Press, Seattle, 1993.
- M. N. Lorenzo, I. P. Mariño, V. Pérez-Muñuzuri, M. A. Matías, and V. Pérez-Villar. Synchronization waves in arrays of driven chaotic systems. *Phys. Rev. E*, 54(4):3094–3097, 1996.
- C. Ludwig. Beiträge zur Kenntnis des Einflusses der Respirationsbewegung auf den Blutlauf im Aortensystem. *Arch. Anat. Physiol.*, 13:242–302, 1847.
- W. A. MacKay. Synchronized neuronal oscillations and their role in motor processes. *Trends Cogn. Sci.*, 1:176–183, 1997.
- R. Mainieri and J. Rehacek. Projective synchronization in three-dimensional chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.*, 82(15):3042–3045, 1999.
- Y. Maistrenko and T. Kapitaniak. Different types of chaos synchronization in two coupled piecewise linear maps. *Phys. Rev. E*, 54(4):3285–3292, 1996.
- Y. Maistrenko, T. Kapitaniak, and P. Szuminski. Locally and globally riddled basins in two coupled piecewise-linear maps. *Phys. Rev. E*, 56(6):6393–6399, 1997.
- Y. L. Maistrenko, V. L. Maistrenko, O. Popovych, and E. Mosekilde. Desynchronization of chaos in coupled logistic maps. *Phys. Rev. E*, 60(3):2817–2830, 1999a.
- Yu. L. Maistrenko, V. L. Maistrenko, O. Popovych, and E. Mosekilde. Transverse instability and riddled basins in a system of two coupled logistic

- maps. *Phys. Rev. E*, 57(3):2713–2724, 1998.
- Yu. L. Maistrenko, O. Popovych, and M. Hasler. On strong and weak chaotic partial synchronization. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 10(1):179–204, 2000.
- S. C. Manrubia and A. S. Mikhailov. Mutual synchronization and clustering in randomly coupled chaotic dynamical networks. *Phys. Rev. E*, 60(2):1579–1589, 1999.
- M. Manscher, M. Nordham, E. Mosekilde, and Yu. L. Maistrenko. Riddled basins of attraction for synchronized type-I intermittency. *Phys. Lett. A*, 238:358–364, 1998.
- A. Maritan and J. R. Banavar. Chaos, noise, and synchronization. *Phys. Rev. Lett.*, 72:1451–1454, 1994.
- S. Martin and W. Martienssen. Circle maps and mode locking in the driven electrical conductivity of barium sodium niobate crystals. *Phys. Rev. Lett.*, 56(15):1522–1525, 1986.
- G. Matsumoto, K. Aihara, Y. Hanyu, N. Takahashi, S. Yoshizawa, and J. Nagumo. Chaos and phase locking in normal squid axons. *Phys. Lett. A*, 123:162–166, 1987.
- K. Matsumoto and I. Tsuda. Noise-induced order. *J. Stat. Phys.*, 31(1):87–106, 1983.
- T. Matsumoto and M. Nishi. Subsystem decreasing for exponential synchronization of chaotic systems. *Phys. Rev. E*, 59(2):1711–1718, 1999.
- P. C. Matthews, R. E. Mirollo, and S. H. Strogatz. Dynamics of a large system of coupled nonlinear oscillators. *Physica D*, 52:293–331, 1991.
- P. C. Matthews and S. H. Strogatz. Phase diagram for the collective behavior of limit-cycle oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 65(14):1701–1704, 1990.
- M. K. McClintock. Menstrual synchrony and suppression. *Nature*, 229:244–245, 1971.
- R. V. Mendes. Clustering and synchronization with positive Lyapunov exponents. *Phys. Lett. A*, 257:132–138, 1999.
- R. Mettin, U. Parlitz, and W. Lauterborn. Bifurcation structure of the driven van der Pol oscillator. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 3(6):1529–1555, 1993.
- A. S. Mikhailov. *Foundations of Synergetics 1. Distributed Active Systems*. Springer, Berlin, 1994.
- M. Milan, S. Campuzano, and A. Garcia-Bellido. Cell cycling and patterned cell proliferation in the *Drosophila* wing during metamorphosis. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93(21):11687–11692, 1996.
- J. Milnor. On the concept of attractor. *Commun. Math. Phys.*, 99:177–195, 1985.
- A. A. Minai and T. Anand. Chaos-induced synchronization in discrete-time oscillators driven by a random input. *Phys. Rev. E*, 57(2):1559–1562, 1998.
- A. A. Minai and T. Anand. Synchronization of chaotic maps through a noisy coupling channel with application to digital communication. *Phys. Rev. E*, 59(1):312–320, 1999a.

- A. A. Minai and T. Anand. Synchronizing multiple chaotic maps with a randomized scalar coupling. *Physica D*, 125(3-4):241–259, 1999b.
- N. Minorsky. *Nonlinear Oscillations*. Van Nostrand, Princeton, NJ, 1962.
- R. Mirollo and S. Strogatz. Amplitude death in an array of limit-cycle oscillators. *J. Stat. Phys.*, 60:245–262, 1990a.
- R. Mirollo and S. Strogatz. Synchronization of pulse-coupled biological oscillators. *SIAM J. Appl. Math.*, 50:1645–1662, 1990b.
- F. Mitschke. Acausal filters for chaotic signals. *Phys. Rev. A*, 41:1169–1171, 1990.
- F. Mitschke, M. Möller, and H. W. Lange. Measuring filtered chaotic signals. *Phys. Rev. A*, 37:4518–4521, 1988.
- S. Miyazaki and H. Hata. Universal scaling law of the power spectrum in the on–off intermittency. *Phys. Rev. E*, 58(6):7172–7175, 1998.
- R. Y. Moore. A clock for the ages. *Science*, 284:2102–2103, 1999.
- L. G. Morelli and D. H. Zanette. Synchronization of stochastically coupled cellular automata. *Phys. Rev. E*, 58(1):R8–R11, 1998.
- O. Morgül. Necessary condition for observer-based chaos synchronization. *Phys. Rev. Lett.*, 82(1):77–80, 1999.
- O. Morgül and M. Feki. A chaotic masking scheme by using synchronized chaotic systems. *Phys. Lett. A*, 251(3):169–176, 1999.
- F. Mormann, K. Lehnertz, P. David, and C. E. Elger. Mean phase coherence as a measure for phase synchronization and its application to the EEG of epilepsy patients. *Physica D*, 144(3–4):358–369, 2000.
- F. Moss, A. Bulsara, and M. Shlesinger, Editors. The proceedings of the NATO advanced research workshop: Stochastic resonance in physics and biology. *J. Stat. Phys.*, 70:1–512, 1993.
- F. Moss, D. Pierson, and D. O’Gorman. Stochastic resonance: Tutorial and update. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 4(6):1383–1397, 1994.
- N. Mousseau. Synchronization by disorder in coupled systems. *Phys. Rev. Lett.*, 77:968–971, 1996.
- R. Mrowka, A. Patzak, and M. G. Rosenblum. Quantitative analysis of cardiorespiratory synchronization in infants. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 10(11):2479–2518, 2000.
- Y. Nagai and Y.-Ch. Lai. Characterization of blowout bifurcation by unstable periodic orbits. *Phys. Rev. E*, 55(2):1251–1254, 1997a.
- Y. Nagai and Y.-Ch. Lai. Periodic-orbit theory of the blowout bifurcation. *Phys. Rev. E*, 56(4):4031–4041, 1997b.
- N. Nakagawa and Y. Kuramoto. Collective chaos in a population of globally coupled oscillators. *Prog. Theor. Phys.*, 89(2):313–323, 1993.
- N. Nakagawa and Y. Kuramoto. From collective oscillations to collective chaos in a globally coupled oscillator system. *Physica D*, 75:74–80, 1994.
- N. Nakagawa and Y. Kuramoto. Anomalous Lyapunov spectrum in globally coupled oscillators. *Physica D*, 80:307–316, 1995.

- H. Nakao. Asymptotic power law of moments in a random multiplicative process with weak additive noise. *Phys. Rev. E*, 58(2):1591–1600, 1998.
- S. Nakata, T. Miyata, N. Ojima, and K. Yoshikawa. Self-synchronization in coupled salt-water oscillators. *Physica D*, 115:313–320, 1998.
- Z. Néda, E. Ravasz, Y. Brechet, T. Vicsek, and A.-L. Barabási. Tumultuous applause can transform itself into waves of synchronized clapping. *Nature*, 403(6772):849–850, 2000.
- A. Neiman, X. Pei, D. F. Russell, W. Wojtenek, L. Wilkens, F. Moss, H. A. Braun, M. T. Huber, and K. Voigt. Synchronization of the noisy electrosensitive cells in the paddlefish. *Phys. Rev. Lett.*, 82(3):660–663, 1999a.
- A. Neiman, L. Schimansky-Geier, A. Cornell-Bell, and F. Moss. Noise-enhanced phase synchronization in excitable media. *Phys. Rev. Lett.*, 83(23):4896–4899, 1999b.
- A. Neiman, L. Schimansky-Geier, F. Moss, B. Shulgin, and J. J. Collins. Synchronization of noisy systems by stochastic signals. *Phys. Rev. E*, 60(1):284–292, 1999c.
- A. Neiman, A. Silchenko, V. S. Anishchenko, and L. Schimansky-Geier. Stochastic resonance: Noise-enhanced phase coherence. *Phys. Rev. E*, 58(6):7118–7125, 1998.
- A. B. Neiman, D. F. Russell, X. Pei, W. Wojtenek, J. Twitty, E. Simonotto, B. A. Wettring, E. Wagner, L. A. Wilkens, and F. Moss. Stochastic synchronization of electroreceptors in the paddlefish. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 10(11):2499–2518, 2000.
- A. C. Newell. Envelope equations. In *Lectures in Applied Mathematics*, volume 15, page 157, American Mathematical Society, Providence, RI, 1974.
- S. Nichols and K. Wiesenfeld. Ubiquitous neutral stability of splay-phase states. *Phys. Rev. A*, 45:8430–8435, 1992.
- K. Niizeki, K. Kawahara, and Y. Miyamoto. Interaction among cardiac, respiratory, and locomotor rhythms during cardiocomotor synchronization. *J. Appl. Physiol.*, 75(4):1815–1821, 1993.
- T. Nishikawa and K. Kaneko. Fractalization of torus revisited as a strange nonchaotic attractor. *Phys. Rev. E*, 54(6):6114–6124, 1996.
- E. P. Odum. *Fundamentals of Ecology*. Saunders, Philadelphia, 1953.
- K. Okuda. Variety and generality of clustering in globally coupled oscillators. *Physica D*, 63:424–436, 1993.
- F. Ollendorf and W. Peters. Schwingungstabilität parallelarbeitender Synchronmaschinen. In *Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern*, volume 6, pages 7–26. Springer, Berlin, 1925–1926.
- G. Osipov, A. Pikovsky, M. Rosenblum, and J. Kurths. Phase synchronization effects in a lattice of nonidentical Rössler oscillators. *Phys. Rev. E*, 55(3):2353–2361, 1997.
- S. Ostlund, D. Rand, J. Sethna, and E. Siggia. Universal properties of the

- transition from quasi-periodicity to chaos in dissipative systems. *Physica D*, 8:303–342, 1983.
- E. Ott. *Chaos in Dynamical Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
- G. Paladin and A. Vulpiani. Anomalous scaling laws in multifractal objects. *Phys. Rep.*, 156:147–225, 1987.
- M. Palus. Detecting phase synchronization in noisy systems. *Phys. Lett. A*, 227:301–308, 1997.
- P. Panter. *Modulation, Noise, and Spectral Analysis*. McGraw-Hill, New York, 1965.
- P. Paoli, A. Politi, and R. Badii. Long-range order in the scaling behaviour of hyperbolic dynamical systems. *Physica D*, 36(6):263–286, 1989a.
- P. Paoli, A. Politi, G. Broggi, M. Ravani, and R. Badii. Phase transitions in filtered chaotic signals. *Phys. Rev. Lett.*, 62(21):2429–2432, 1989b.
- N. Parekh, V. R. Kumar, and B. D. Kulkarni. Analysis and characterization of complex spatio-temporal patterns in nonlinear reaction–diffusion systems. *Physica A*, 224(1–2):369–381, 1996.
- E.-H. Park, M. A. Zaks, and J. Kurths. Phase synchronization in the forced Lorenz system. *Phys. Rev. E*, 60(6):6627–6638, 1999.
- K. Park, S. W. Rhee, and M. Y. Choi. Glass synchronization in the network of oscillators with random phase shifts. *Phys. Rev. E*, 57(5):5030–5035, 1998.
- S. H. Park, S. Kim, H.-B. Pyo, and S. Lee. Effects of time-delayed interactions on dynamic patterns in a coupled oscillator system. *Phys. Rev. E*, 60(4):4962–4965, 1999a.
- S. H. Park, S. Kim, H.-B. Pyo, and S. Lee. Multistability analysis of phase locking patterns in an excitatory coupled neural system. *Phys. Rev. E*, 60(2):2177–2181, 1999b.
- U. Parlitz, L. Junge, and L. Kocarev. Subharmonic entrainment of unstable periodic orbits and generalized synchronization. *Phys. Rev. Lett.*, 79(17):3158–3161, 1997.
- U. Parlitz, L. Junge, W. Lauterborn, and L. Kocarev. Experimental observation of phase synchronization. *Phys. Rev. E*, 54(2):2115–2118, 1996.
- U. Parlitz and L. Kocarev. Synchronization of chaotic systems. In H. Schuster, Editor, *Handbook of Chaos Control*, pages 271–303. Wiley-VCH, Weinheim, 1999.
- V. Parlitz and W. Lauterborn. Period-doubling cascades and devil’s staircases of the driven van der Pol oscillator. *Phys. Rev. A*, 36(3):1428–1434, 1987.
- F. Pasemann. Synchronized chaos and other coherent states for two coupled neurons. *Physica D*, 128(2–4):236–249, 1999.
- I. Pastor-Díaz and A. López-Fraguas. Dynamics of two coupled van der Pol oscillators. *Phys. Rev. E*, 52(2):1480–1489, 1995.
- I. Pastor-Díaz, V. Perez-García, F. Encinas-Sanz, and J. M. Guerra. Ordered and chaotic behavior of two coupled van der Pol oscillators. *Phys. Rev. E*, 48(1):171–182, 1993.

- T. Pavlidis. Populations of interacting oscillators and circadian rhythms. *J. Theor. Biol.*, 22:418–436, 1969.
- L. Pecora, Editor. A focus issue on synchronization in chaotic systems. *Chaos*, 7(4):509–687, 1997.
- L. M. Pecora and T. L. Carroll. Synchronization in chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.*, 64:821–824, 1990.
- L. M. Pecora and T. L. Carroll. Driving systems with chaotic signals. *Phys. Rev. A*, 44:2374–2383, 1991.
- L. M. Pecora and T. L. Carroll. Discontinuous and nondifferentiable functions and dimension increase induced by filtering chaotic data. *Chaos*, 6(3):432–439, 1996.
- L. M. Pecora and T. L. Carroll. Master stability functions for synchronized coupled systems. *Phys. Rev. Lett.*, 80(10):2109–2112, 1998.
- L. M. Pecora, T. L. Carroll, and J. F. Heagy. Statistics for continuity and differentiability: An application to attractor reconstruction from time series. In C. D. Cutler and D. T. Kaplan, Editors, *Nonlinear Dynamics and Time Series*, volume 11 of *Fields Inst. Communications*, pages 49–62. American Mathematical Society, Providence, RI, 1997a.
- L. M. Pecora, T. L. Carroll, G. Johnson, and D. Mar. Volume-preserving and volume-expanding synchronized chaotic systems. *Phys. Rev. E*, 56(5):5090–5100, 1997b.
- L. M. Pecora, T. L. Carroll, G. A. Johnson, D. J. Mar, and J. F. Heagy. Fundamentals of synchronization in chaotic systems, concepts, and applications. *Chaos*, 7(4):520–543, 1997c.
- J. Peinke, R. Richter, and J. Parisi. Spatial coherence of nonlinear dynamics in a semiconductor experiment. *Phys. Rev. B*, 47(1):115–124, 1993.
- H.-O. Peitgen, H. Jürgens, and D. Saupe. *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science*. Springer, New York, 1992.
- J. H. Peng, E. J. Ding, M. Ding, and W. Yang. Synchronizing hyperchaos with a scalar transmitted signal. *Phys. Rev. Lett.*, 76(6):904–907, 1996.
- H. Pessenhofer and T. Kenner. Zur Methodik der kontinuierlichen Bestimmung der Phasenbeziehung zwischen Herzschlag und Atmung. *Pflügers Arch.*, 355:77–83, 1975.
- D. W. Peterman, M. Ye, and P. E. Wigen. High frequency synchronization of chaos. *Phys. Rev. Lett.*, 74:1740–1742, 1995.
- D. Petracchi, M. Barbi, S. Chillemi, E. Pantazelou, D. Pierson, C. Dames, L. Wilkens, and F. Moss. A test for a biological signal encoded by noise. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 5(1):89–100, 1995.
- V. Petrov, Q. Ouyang, and H. L. Swinney. Resonant pattern formation in a chemical system. *Nature*, 388:655–657, 1997.
- A. Pikovsky and U. Feudel. Correlations and spectra of strange nonchaotic attractors. *J. Phys. A: Math., Gen.*, 27(15):5209–5219, 1994.
- A. Pikovsky, G. Osipov, M. Rosenblum, M. Zaks, and J. Kurths. Attractor–repeller collision and eyelet intermittency at the transition to phase

- synchronization. *Phys. Rev. Lett.*, 79:47–50, 1997a.
- A. Pikovsky, M. Rosenblum, and J. Kurths. Synchronization in a population of globally coupled chaotic oscillators. *Europhys. Lett.*, 34(3):165–170, 1996.
- A. Pikovsky, M. Rosenblum, G. Osipov, and J. Kurths. Phase synchronization of chaotic oscillators by external driving. *Physica D*, 104:219–238, 1997b.
- A. Pikovsky and S. Ruffo. Finite-size effects in a population of interacting oscillators. *Phys. Rev. E*, 59(2):1633–1636, 1999.
- A. Pikovsky, M. Zaks, M. Rosenblum, G. Osipov, and J. Kurths. Phase synchronization of chaotic oscillations in terms of periodic orbits. *Chaos*, 7(4):680–687, 1997c.
- A. S. Pikovsky. On the interaction of strange attractors. *Z. Physik B*, 55(2):149–154, 1984a.
- A. S. Pikovsky. Synchronization and stochastization of nonlinear oscillations by external noise. In R. Z. Sagdeev, Editor, *Nonlinear and Turbulent Processes in Physics*, pages 1601–1604, Harwood, Singapore, 1984b.
- A. S. Pikovsky. Statistics of trajectory separation in noisy dynamical systems. *Phys. Lett. A*, 165:33, 1992.
- A. S. Pikovsky. Comment on “Chaos, Noise, and Synchronization”. *Phys. Rev. Lett.*, 73(21):2931, 1994.
- A. S. Pikovsky and U. Feudel. Characterizing strange nonchaotic attractors. *Chaos*, 5(1):253–260, 1995.
- A. S. Pikovsky and P. Grassberger. Symmetry breaking bifurcation for coupled chaotic attractors. *J. Phys. A: Math., Gen.*, 24(19):4587–4597, 1991.
- A. S. Pikovsky and J. Kurths. Roughening interfaces in the dynamics of perturbations of spatiotemporal chaos. *Phys. Rev. E*, 49(1):898–901, 1994.
- A. S. Pikovsky, M. G. Rosenblum, and J. Kurths. Phase synchronization in regular and chaotic systems. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 10(1):2291–2306, 2000.
- N. Platt, S. M. Hammel, and J. F. Heagy. Effects of additive noise on on–off intermittency. *Phys. Rev. Lett.*, 72:3498–3501, 1994.
- N. Platt, E. A. Spiegel, and C. Tresser. On–off intermittency: A mechanism for bursting. *Phys. Rev. Lett.*, 70:279–282, 1989.
- A. A. Polezhaev and E. I. Volkov. On the possible mechanism of cell cycle synchronization. *Biol. Cybern.*, 41:81–89, 1981.
- A. Politi, R. Livi, G.-L. Oppo, and R. Kapral. Unpredictable behavior of stable systems. *Europhys. Lett.*, 22:571, 1993.
- B. Pompe. Measuring statistical dependencies in a time series. *J. Stat. Phys.*, 73:587–610, 1993.
- D. Postnov, S. K. Han, and H. Kook. Synchronization of diffusively coupled oscillators near the homoclinic bifurcation. *Phys. Rev. E*, 60(3):2799–2807, 1999a.
- D. E. Postnov, T. E. Vadivasova, O. V. Sosnovtseva, A. G. Balanov, V. S. Anishchenko, and E. Mosekilde. Role of multistability in the transition to chaotic phase synchronization. *Chaos*, 9(1):227–232, 1999b.
- A. Prasad, V. Mehra, and R. Ramaswamy. Strange nonchaotic attractors in

- the quasiperiodically forced logistic map. *Phys. Rev. E*, 57(2):1576–1584, 1998.
- W. H. Press, S. T. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery. *Numerical Recipes in C: the Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, Cambridge, second edition, 1992.
- K. Pyragas. Weak and strong synchronization of chaos. *Phys. Rev. E*, 54(5):R4508–R4511, 1996.
- K. Pyragas. Conditional Lyapunov exponents from time series. *Phys. Rev. E*, 56(5):5183–5188, 1997.
- W. J. Rappel and A. Karma. Noise-induced coherence in neural networks. *Phys. Rev. Lett.*, 77(15):3256–3259, 1996.
- D. V. R. Reddy, A. Sen, and G. L. Johnston. Time delay effects on coupled limit cycle oscillators at Hopf bifurcation. *Physica D*, 129(1–2):15–34, 1999.
- C. Reichhardt and F. Nori. Phase locking, devil’s staircase, Farey trees, and Arnold tongues in driven vortex lattices with periodic pinning. *Phys. Rev. Lett.*, 82(2):414–417, 1999.
- P. Reimann, C. Van den Broeck, and P. Kawai. Nonequilibrium noise in coupled phase oscillators. *Phys. Rev. E*, 60(6):6402–6406, 1999.
- L. Ren and B. Ermentrout. Phase locking in chains of multiple-coupled oscillators. *Physica D*, 143(1–4):56–73, 2000.
- A. Rényi. *Probability Theory*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1970.
- P. Richard, B. M. Bakker, B. Teusink, K. Van Dam, and H. V. Westerhoff. Acetaldehyde mediates the synchronization of sustained glycolytic oscillations in population of yeast cells. *Eur. J. Biochem.*, 235:238–241, 1996.
- H. Z. Risken. *The Fokker–Planck Equation*. Springer, Berlin, 1989.
- E. Rodriguez, N. George, J.-P. Lachaux, J. Martinerie, B. Renault, and F. J. Varela. Perception’s shadow: Long distance synchronization of human brain activity. *Nature*, 397(4):430–433, 1999.
- O. E. Rössler. An equation for continuous chaos. *Phys. Lett. A*, 57:397–398, 1976.
- J. L. Rogers and L. T. Wille. Phase transitions in nonlinear oscillator chains. *Phys. Rev. E*, 54(3):R2193–R2196, 1996.
- F. J. Romeiras, A. Bondeson, E. Edward Ott, Th. M. Antonsen Jr., and C. Grebogi. Quasiperiodically forced dynamical systems with strange nonchaotic attractors. *Physica D*, 26:277–294, 1987.
- E. Rosa Jr., E. Ott, and M. H. Hess. Transition to phase synchronization of chaos. *Phys. Rev. Lett.*, 80(8):1642–1645, 1998.
- E. Rosa Jr., W. B. Pardo, C. M. Ticos, J. A. Walkenstein, and M. Monti. Phase synchronization of chaos in a plasma discharge tube. *Int. J. Bifurc. Chaos*, 10(11):2551–2564, 2000.
- J. E. Rose, J. F. Brugge, D. J. Anderson, and J. E. Hind. Phase-locked response to low-frequency tones in single auditory nerve fibers of the squirrel monkey. *J. Neurophysiol.*, 30:769–793, 1967.

- M. Rosenblum, A. Pikovsky, and J. Kurths. Phase synchronization of chaotic oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 76:1804, 1996.
- M. Rosenblum, A. Pikovsky, and J. Kurths. Effect of phase synchronization in driven chaotic oscillators. *IEEE Trans. CAS-I*, 44(10):874–881, 1997a.
- M. Rosenblum, A. Pikovsky, and J. Kurths. From phase to lag synchronization in coupled chaotic oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 78:4193–4196, 1997b.
- M. G. Rosenblum. A characteristic frequency of chaotic dynamical system. *Chaos, Solit. Fract.*, 3(6):617–626, 1993.
- M. G. Rosenblum, G. I. Firsov, R. A. Kuuz, and B. Pompe. Human postural control: Force plate experiments and modelling. In H. Kantz, J. Kurths, and G. Mayer-Kress, Editors, *Nonlinear Analysis of Physiological Data*, pages 283–306. Springer, Berlin, 1998.
- M. G. Rosenblum and J. Kurths. Analysing synchronization phenomena from bivariate data by means of the Hilbert transform. In H. Kantz, J. Kurths, and G. Mayer-Kress, Editors, *Nonlinear Analysis of Physiological Data*, pages 91–99. Springer, Berlin, 1998.
- M. G. Rosenblum, A. S. Pikovsky, J. Kurths, C. Schäfer, and P. A. Tass. Phase synchronization: From theory to data analysis. In F. Moss and S. Gielen, Editors, *Handbook of Biological Physics. Vol. 4, Neuro-informatics*, pages 279–321. Elsevier, Amsterdam, 2001.
- M. G. Rosenblum, P. A. Tass, and J. Kurths. Estimation of synchronization from noisy data with application to human brain activity. In J. A. Freund and T. Pöschel, Editors, *Stochastic Processes in Physics, Chemistry, and Biology*, Lecture Notes in Physics, LNP 557, pages 202–211. Springer, Berlin, 2000.
- O. E. RöSSLer. An equation for continuous chaos. *Phys. Lett. A*, 57(5):397, 1976.
- R. Roy and K. S. Thornburg. Experimental synchronization of chaotic lasers. *Phys. Rev. Lett.*, 72:2009–2012, 1994.
- N. F. Rulkov. Images of synchronized chaos: Experiments with circuits. *Chaos*, 6(3):262–279, 1996.
- N. F. Rulkov and M. M. Suschik. Experimental observation of synchronized chaos with frequency ratio 1:2. *Phys. Lett. A*, 214:145–150, 1996.
- N. F. Rulkov, M. M. Sushchik, L. S. Tsimring, and H. D. I. Abarbanel. Generalized synchronization of chaos in directionally coupled chaotic systems. *Phys. Rev. E*, 51(2):980–994, 1995.
- D. F. Russell, L. A. Wilkens, and F. Moss. Use of behavioral stochastic resonance by paddle fish for feeding. *Nature*, 402:291–294, 1999.
- T. Saitoh and T. Nishino. Phase locking in a double junction of Josephson weak links. *Phys. Rev. B*, 44(13):7070–7073, 1991.
- H. Sakaguchi and Y. Kuramoto. A solvable active rotator model showing phase transition via mutual entrainment. *Prog. Theor. Phys.*, 76(3):576–581, 1986.
- H. Sakaguchi, S. Shinomoto, and Y. Kuramoto. Mutual entrainment in

- oscillator lattices with nonvariational type interaction. *Prog. Theor. Phys.*, 79(5):1069–1079, 1988a.
- H. Sakaguchi, S. Shinomoto, and Y. Kuramoto. Phase transitions and their bifurcation analysis in a large population of active rotators with mean-field coupling. *Prog. Theor. Phys.*, 79(3):600–607, 1988b.
- E. Sánchez, M. A. Matías, and V. Pérez-Muñuzuri. Analysis of synchronization of chaotic systems by noise: An experimental study. *Phys. Rev. E*, 56(4):4068–4071, 1997.
- G. Santoboni, A. Varone, and S. R. Bishop. Spatial distribution of chaotic transients in unidirectional synchronisation. *Phys. Lett. A*, 257(3–4):175–181, 1999.
- P. Sassone-Corsi. Molecular clocks: Mastering time by gene regulation. *Nature*, 392:871–874, 1999.
- M. Sauer and F. Kaiser. Synchronized spatiotemporal chaos and spatiotemporal on–off intermittency in a nonlinear ring cavity. *Phys. Rev. E*, 54(3):2468–2473, 1996.
- J. P. Saul. Cardiorespiratory variability: Fractals, white noise, nonlinear oscillators, and linear modeling. What’s to be learned? In H. Haken and H. P. Koepchen, Editors, *Rhythms in Physiological Systems*, volume 55 of *Springer Series in Synergetics*, pages 115–126. Springer, Berlin, 1991.
- C. Schäfer, M. G. Rosenblum, H.-H. Abel, and J. Kurths. Synchronization in the human cardiorespiratory system. *Phys. Rev. E*, 60:857–870, 1999.
- C. Schäfer, M. G. Rosenblum, J. Kurths, and H.-H. Abel. Heartbeat synchronized with ventilation. *Nature*, 392(6673):239–240, March 1998.
- M. Schiek, F. R. Drepper, R. Engbert, H.-H. Abel, and K. Suder. Cardiorespiratory synchronization. In H. Kantz, J. Kurths, and G. Mayer-Kress, Editors, *Nonlinear Analysis of Physiological Data*, pages 191–209. Springer, Berlin, 1998.
- S. J. Schiff, P. So, T. Chang, R. E. Burke, and T. Sauer. Detecting dynamical interdependence and generalized synchrony through mutual prediction in a neural ensemble. *Phys. Rev. E*, 54(6):6708–6724, 1996.
- G. Schmidt and A. A. Chernikov. General form of coupling leading to synchronization of oscillating dynamical systems. *Phys. Rev. E*, 60(3):2767–2770, 1999.
- A. Schrader, M. Braune, and H. Engel. Dynamics of spiral waves in excitable media subjected to external periodic forcing. *Phys. Rev. E*, 52(1):98–108, 1995.
- H. G. Schuster, Editor. *Handbook of Chaos Control*. Wiley-VCH, Weinheim, 1999.
- H. G. Schuster, S. Martin, and W. Martienssen. A new method for determining the largest Lyapunov exponent in simple nonlinear systems. *Phys. Rev. A*, 33:3547, 1986.
- D. M. Scolnick and T. D. Halazonetis. *Chfr* defines a mitotic stress checkpoint that delays entry into metaphase. *Nature*, 406:354–356, 2000.

- H. Seidel and H.-P. Herzl. Analyzing entrainment of heartbeat and respiration with surrogates. *IEEE Eng. Med. Biol.*, 17(6):54–57, 1998.
- S. Shapiro. Josephson current in superconducting tunneling: The effect of microwaves and other observations. *Phys. Rev. Lett.*, 11(2):80–82, 1963.
- S. Shinomoto and Y. Kuramoto. Cooperative phenomena in two-dimensional active rotator systems. *Prog. Theor. Phys.*, 75(6):1319–1327, 1986.
- B. I. Shraiman, A. Pumir, W. van Saarloos, P. C. Hohenberg, H. Chaté, and M. Holen. Spatiotemporal chaos in the one-dimensional Ginzburg-Landau equation. *Physica D*, 57:241–248, 1992.
- J. W. Shuai and K. W. Wong. Noise and synchronization in chaotic neural networks. *Phys. Rev. E*, 57(6):7002–7007, 1998.
- B. Shulgin, A. Neiman, and V. Anishchenko. Mean switching frequency locking in stochastic bistable systems driven by a periodic force. *Phys. Rev. Lett.*, 75(23):4157–4160, 1995.
- A. E. Siegman. *Lasers*. University Science Books, Mill Valley, CA, 1986.
- A. Simon and A. Libchaber. Escape and synchronization of a Brownian particle. *Phys. Rev. Lett.*, 68:3375, 1992.
- J. Simonet, M. Warden, and E. Brun. Locking and Arnold tongues in an infinite-dimensional system: The nuclear magnetic resonance laser with delayed feedback. *Phys. Rev. E*, 50:3383–3391, 1994.
- W. Singer. Striving for coherence. *Nature*, 397(4):391–393, 1999.
- W. Singer and C. M. Gray. Visual feature integration and the temporal correlation hypothesis. *Annu. Rev. Neurosci.*, 18:555–586, 1995.
- G. Sivashinsky. Self-turbulence in the motion of a free particle. *Found. Phys.*, 8(9–10):735–744, 1978.
- S. Smale. *The Mathematics of Time*. Springer, New York, 1980.
- M. J. T. Smith and R. M. Mersereau. *Introduction to Digital Signal Processing. A Computer Laboratory Textbook*. Wiley, New York, 1992.
- M. Smolensky. Chronobiology and chronotherapeutics: Applications to cardiovascular medicine. In P. C. Deedwania, Editor, *Circadian Rhythms of Cardiovascular Disorders*, pages 173–206. Futura, Armonk, NY, 1997.
- Y. Soen, N. Cohen, D. Lipson, and E. Braun. Emergence of spontaneous rhythm disorders in self-assembled networks of heart cells. *Phys. Rev. Lett.*, 82(17):3556–3559, 1999.
- O. V. Sosnovtseva, A. G. Balanov, T. E. Vadivasova, V. V. Astakhov, and E. Mosekilde. Loss of lag synchronization in coupled chaotic systems. *Phys. Rev. E*, 60(6):6560–6565, 1999.
- P. Stange, A. S. Mikhailov, and B. Hess. Mutual synchronization of molecular turnover cycles in allosteric enzymes. *J. Phys. Chem. B*, 102(32):6273–6289, 1998.
- P. Stange, A. S. Mikhailov, and B. Hess. Mutual synchronization of molecular turnover cycles in allosteric enzymes II. *J. Phys. Chem. B*, 103(29):6111–6120, 1999.

- J. Stark. Invariant graphs for forced systems. *Physica D*, 109(1-2):163–179, 1997.
- O. Steinbock, V. Zykov, and S. Müller. Control of spiral-wave dynamics in active media by periodic modulation of excitability. *Nature*, 366:322–324, 1993.
- P. N. Steinmetz, A. Roy, P. J. Fitzgerald, S. S. Hsiao, K. O. Johnson, and E. Niebur. Attention modulates synchronized neuronal firing in primate somatosensory cortex. *Nature*, 404(9):187–190, 2000.
- E. A. Stern, D. Jaeger, and C. J. Wilson. Membrane potential synchrony of simultaneously recorded striatal spiny neurons *in vivo*. *Nature*, 394:475–478, 1998.
- E. F. Stone. Frequency entrainment of a phase coherent attractor. *Phys. Lett. A*, 163:367–374, 1992.
- M. Stopfer, S. Bhagavan, B. H. Smith, and G. Laurent. Impaired odour discrimination on desynchronization of odour-encoding neural assemblies. *Nature*, 390(6):70–74, 1997.
- S. H. Strogatz. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1994.
- S. H. Strogatz. From Kuramoto to Crawford: Exploring the onset of synchronization in populations of coupled oscillators. *Physica D*, 143(1–4):1–20, 2000.
- S. H. Strogatz, C. M. Marcus, R. M. Westervelt, and R. E. Mirollo. Collective dynamics of coupled oscillators with random pinning. *Physica D*, 36:23–50, 1989.
- S. H. Strogatz and R. E. Mirollo. Stability of incoherence in a population of coupled oscillators. *J. Stat. Phys.*, 63(3/4):613–635, 1991.
- S. H. Strogatz and R. E. Mirollo. Splay states in globally coupled Josephson arrays: Analytical prediction of Floquet multipliers. *Phys. Rev. E*, 47(1):220–227, 1993.
- S. H. Strogatz, R. E. Mirollo, and P. C. Matthews. Coupled nonlinear oscillators below the synchronization threshold: Relaxation by generalized Landau damping. *Phys. Rev. Lett.*, 68(18):2730–2733, 1992.
- S. H. Strogatz and I. Stewart. Coupled oscillators and biological synchronization. *Sci. Am.*, 12:68–75, 1993.
- J. Sturis, C. Knudsen, N. M. O’Meara, J. S. Thomsen, E. Mosekilde, E. Van Cauter, and K. S. Polonsky. Phase-locking regions in a forced model of slow insulin and glucose oscillations. *Chaos*, 5(1):193–199, 1995.
- J. Sturis, E. Van Cauter, J. Blackman, and K. S. Polonsky. Entrainment of pulsatile insulin secretion by oscillatory glucose infusion. *J. Clin. Invest.*, 87:439–445, 1991.
- K. H. Stutte and G. Hildebrandt. Untersuchungen über die Koordination von Herzschlag und Atmung. *Pflügers Arch.*, 289:R47, 1966.
- T. Sugawara, M. Tachikawa, T. Tsukamoto, and T. Shimizu. Observation of synchronization in laser chaos. *Phys. Rev. Lett.*, 72:3502–3505, 1994.

- J. W. Swift, S. H. Strogatz, and K. Wiesenfeld. Averaging of globally coupled oscillators. *Physica D*, 55:239–250, 1992.
- S. Taherion and Y.-C. Lai. Observability of lag synchronization of coupled chaotic oscillators. *Phys. Rev. E*, 59(6):R6247–R6250, 1999.
- F. Takens. Detecting strange attractors in turbulence. In *Dynamical Systems and Turbulence*, volume 898 of *Springer Lecture Notes in Mathematics*, pages 366–381. Springer, New York, 1981.
- A. Tamasevicius and A. Čenys. Synchronizing hyperchaos with a single variable. *Phys. Rev. E*, 55(1):297–299, 1997.
- T. Tamura, N. Inaba, and J. Miyamichi. Mechanism for taming chaos by weak harmonic perturbations. *Phys. Rev. Lett.*, 83(19):3824–3827, 1999.
- H. Tanaka, A. Lichtenberg, and S. Oishi. First order phase transition resulting from finite inertia in coupled oscillator systems. *Phys. Rev. Lett.*, 78(11):2104–2107, 1997a.
- H.-A. Tanaka, A. J. Lichtenberg, and Sh. Oishi. Self-synchronization of coupled oscillators with hysteretic responses. *Physica D*, 100:279–300, 1997b.
- D. Y. Tang, R. Dykstra, M. W. Hamilton, and N. R. Heckenberg. Experimental evidence of frequency entrainment between coupled chaotic oscillations. *Phys. Rev. E*, 57(3):3649–3651, 1998a.
- D. Y. Tang, R. Dykstra, M. W. Hamilton, and N. R. Heckenberg. Observation of generalized synchronization of chaos in a driven chaotic system. *Phys. Rev. E*, 57(5):5247–5251, 1998b.
- D. Y. Tang, R. Dykstra, M. W. Hamilton, and N. R. Heckenberg. Stages of chaotic synchronization. *Chaos*, 8(3):697–701, 1998c.
- P. Tass. Phase and frequency shifts of two nonlinearly coupled oscillators. *Z. Physik B*, 99:111–121, 1995.
- P. Tass. Phase and frequency shifts in a population of phase oscillators. *Phys. Rev. E*, 56(2):2043–2060, 1997.
- P. Tass and H. Haken. Synchronization in networks of limit cycle oscillators. *Z. Physik B*, 100:303–320, 1996.
- P. Tass, J. Kurths, M. G. Rosenblum, J. Weule, A. S. Pikovsky, J. Volkmann, A. Schnitzler, and H.-J. Freund. Complex phase synchronization in neurophysiological data. In C. Uhl, Editor, *Analysis of Neurophysiological Brain Functioning*, *Springer Series in Synergetics*, pages 252–273. Springer, Berlin, 1999.
- P. Tass, M. G. Rosenblum, J. Weule, J. Kurths, A. S. Pikovsky, J. Volkmann, A. Schnitzler, and H.-J. Freund. Detection of $n : m$ phase locking from noisy data: Application to magnetoencephalography. *Phys. Rev. Lett.*, 81(15):3291–3294, 1998.
- P. A. Tass. *Phase Resetting in Medicine and Biology. Stochastic Modelling and Data Analysis*. Springer, Berlin, 1999.
- J. R. Terry, K. S. Thornbug, D. J. DeShazer, G. D. VanWiggeren, S. Q. Zhu, P. Ashwin, and R. Roy. Synchronization of chaos in an array of three lasers. *Phys. Rev. E*, 59(4):4036–4043, 1999.

- K. S. Thornburg, M. Möller, R. Roy, T. W. Carr, R.-D. Li, and T. Erneux. Chaos and coherence in coupled lasers. *Phys. Rev. E*, 55(4):3865–3869, 1997.
- C. M. Ticos, E. Rosa Jr., W. B. Pardo, J. A. Walkenstein, and M. Monti. Experimental real-time phase synchronization of a paced chaotic plasma discharge. *Phys. Rev. Lett.*, 85(14):2929–2932, 2000.
- E. Toledo, M. G. Rosenblum, J. Kurths, and S. Akselrod. Cardiorespiratory synchronization: Is it a real phenomenon? In A. Murray and S. Swiryn, Editors, *Computers in Cardiology*, pages 237–240. IEEE Computer Society Press, Hannover, 1999.
- E. Toledo, M. G. Rosenblum, C. Schäfer, J. Kurths, and S. Akselrod. Quantification of cardiorespiratory synchronization in normal and heart transplant subjects. In *Proc. of Int. Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, volume 1, pages 171–174. Crans-Montana, Switzerland, Sept. 14–17, 1998. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1998.
- A. Torcini, P. Grassberger, and A. Politi. Error propagation in extended systems. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 27:4533, 1995.
- C. Tresser, P. Worfolk, and C. W. Wu. Master–slave synchronization from the point of view of global dynamics. *Chaos*, 5(4):693–699, 1995.
- K. Y. Tsang, R. E. Mirollo, S. H. Strogatz, and K. Wiesenfeld. Dynamics of globally coupled oscillator array. *Physica D*, 48:102–112, 1991a.
- K. Y. Tsang, S. H. Strogatz, and K. Wiesenfeld. Reversibility and noise sensitivity in globally coupled oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 66:1094–1097, 1991b.
- M. Tsodyks, I. Mitkov, and H. Sompolinsky. Pattern of synchrony in inhomogeneous networks of oscillators with pulse interactions. *Phys. Rev. Lett.*, 71(8):1280–1283, 1993.
- T. Tsukamoto, M. Tachikawa, T. Hirano, T. Kuga, and T. Shimizu. Synchronization of a chaotic laser pulsation with its prerecorded history. *Phys. Rev. E*, 54(4):4476–4479, 1996.
- T. Tsukamoto, M. Tachikawa, T. Tohei, T. Hirano, T. Kuga, and T. Shimizu. Synchronization of a laser system to a modulation signal artificially constructed from its strange attractor. *Phys. Rev. E*, 56(6):6564–6568, 1997.
- N. Tufillaro, T. R. Abbott, and J. Reilly. *An Experimental Approach to Nonlinear Dynamics and Chaos*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1992.
- J. Urias, G. Salazar, and E. Ugalde. Synchronization of cellular automation pairs. *Chaos*, 8(4):814–818, 1998.
- T. E. Vadivasova, A. G. Balanov, O. V. Sosnovtseva, D. E. Postnov, and E. Mosekilde. Synchronization in driven chaotic systems: Diagnostics and bifurcations. *Phys. Lett. A*, 253:66–74, 1999.
- T. P. Valkering, C. L. A. Hooijer, and M. F. Kroon. Dynamics of two capacitively coupled Josephson junctions in the overdamped limit. *Physica*

- D, 135(1–2):137–153, 2000.
- B. van der Pol. A theory of the amplitude of free and forced triode vibration. *Radio Rev.*, 1:701, 1920.
- B. van der Pol. On relaxation oscillation. *Phil. Mag.*, 2:978–992, 1926.
- B. van der Pol. Forced oscillations in a circuit with non-linear resistance. (Reception with reactive triode). *Phil. Mag.*, 3:64–80, 1927.
- B. van der Pol and J. van der Mark. Frequency demultiplication. *Nature*, 120(3019):363–364, 1927.
- B. van der Pol and J. van der Mark. The heartbeat considered as a relaxation oscillation, and an electrical model of the heart. *Phil. Mag.*, 6:763–775, 1928.
- J. L. van Hemmen and W. F. Wreszinski. Lyapunov function for the Kuramoto model of nonlinearly coupled oscillators. *J. Stat. Phys.*, 72(1/2):145–166, 1993.
- N. G. van Kampen. *Stochastic Processes in Physics and Chemistry*, 2nd edition. North Holland, Amsterdam, 1992.
- C. van Vreeswijk. Partial synchronization in populations of pulse-coupled oscillators. *Phys. Rev. E*, 54(5):5522–5537, 1996.
- V. K. Vanag, L. Yang, M. Dolnik, A. M. Zhabotinsky, and I. R. Epshtein. Oscillatory cluster patterns in a homogeneous chemical system with global feedback. *Nature*, 406:389–391, 2000.
- S. R. S. Varadhan. *Large Deviations and Applications*. SIAM, Philadelphia, 1984.
- Yu. M. Vasiliev, I. M. Gelfand, V. I. Guelstein, and A. G. Malenkov. Interrelationships of contacting cells in the cell complexes of mouse ascites hepatoma. *Int. J. Cancer*, 1:451–462, 1966.
- J. J. P. Veerman. Irrational rotation numbers. *Nonlinearity*, 2:419–428, 1989.
- S. C. Venkataramani, T. M. Antonsen, E. Ott, and J. C. Sommerer. On-off intermittency: Power spectrum and fractal properties of time series. *Physica D*, 96(1–4):66–99, 1996.
- Sh. C. Venkataramani, Th. M. Antonsen Jr., E. Ott, and J. C. Sommerer. Characterization of on-off intermittent time series. *Phys. Lett. A*, 207:173–179, 1995.
- M. D. Vieira. Chaos and synchronized chaos in an earthquake model. *Phys. Rev. Lett.*, 82(1):201–204, 1999.
- J. Volkmann, M. Joliot, A. Mogilner, A. A. Ioannides, F. Lado, E. Fazzini, U. Ribary, and R. Llinás. Central motor loop oscillations in Parkinsonian resting tremor revealed by magnetoencephalography. *Neurology*, 46:1359–1370, 1996.
- E. I. Volkov and V. A. Romanov. Bifurcations in the system of two identical diffusively coupled brusselators. *Phys. Scr.*, 51(1):19–28, 1994.
- H. Voss and J. Kurths. Reconstruction of nonlinear time delay models from data by the use of optimal transformations. *Phys. Lett. A*, 234:336–344, 1997.

- H. U. Voss. Anticipating chaotic synchronization. *Phys. Rev. E*, 61(5):5115–5119, 2000.
- D. Walgraef. *Spatio-Temporal Pattern Formation*. Springer, New York, 1997.
- T. J. Walker. Acoustic synchrony: Two mechanisms in the snowy tree cricket. *Science*, 166:891–894, 1969.
- I. Waller and R. Kapral. Synchronization and chaos in coupled nonlinear oscillators. *Phys. Lett. A*, 105:163–168, 1984.
- W. Wang, I. Z. Kiss, and J. L. Hudson. Experiments on arrays of globally coupled chaotic electrochemical oscillators: Synchronization and clustering. *Chaos*, 10(1):248–256, 2000a.
- W. Wang, G. Perez, and H. A. Cerdeira. Dynamical behavior of the firings in a coupled neuronal system. *Phys. Rev. E*, 47(4):2893–2898, 1993.
- Y. Wang, D. T. W. Chik, and Z. D. Wang. Coherence resonance and noise-induced synchronization in globally coupled Hodgkin-Huxley neurons. *Phys. Rev. E*, 61(1):740–746, 2000b.
- S. Watanabe and S. H. Strogatz. Integrability of a globally coupled oscillator array. *Phys. Rev. Lett.*, 70(16):2391–2394, 1993.
- S. Watanabe and S. H. Strogatz. Constants of motion for superconducting Josephson arrays. *Physica D*, 74:197–253, 1994.
- D. Whitmore, N. S. Foulkes, and P. Sassone-Corsi. Light acts directly on organs and cells in culture to set the vertebrate circadian clock. *Nature*, 404:87–91, 2000.
- K. Wiesenfeld. Noise, coherence, and reversibility in Josephson arrays. *Phys. Rev. B*, 45(1):431–435, 1992.
- K. Wiesenfeld, P. Colet, and S. H. Strogatz. Synchronization transition in a disordered Josephson series array. *Phys. Rev. Lett.*, 76(3):404–407, 1996.
- K. Wiesenfeld and F. Moss. Stochastic resonance: From ice ages to crayfish and SQUIDs. *Nature*, 373:33–36, 1995.
- K. Wiesenfeld and J. W. Swift. Averaged equations for Josephson junction series arrays. *Phys. Rev. E*, 51(2):1020–1025, 1995.
- S. Wiggins. *Global Bifurcations and Chaos (Analytical Methods)*. Springer, New York, 1988.
- S. Wiggins. *Introduction to Applied Dynamical Systems and Chaos*. Springer, New York, 1990.
- L. A. Wilkens, D. F. Russell, X. Pei, and C. Gurgens. The paddlefish rostrum functions as an electrosensory antenna in plankton feeding. *Proc. Roy. Soc. Lond. B*, 264:1723–1729, 1997.
- A. T. Winfree. Biological rhythms and the behavior of populations of coupled oscillators. *J. Theor. Biol.*, 16:15–42, 1967.
- A. T. Winfree. *The Geometry of Biological Time*. Springer, New York, 1980.
- H. G. Winful and L. Rahman. Synchronized chaos and spatiotemporal chaos in arrays of coupled lasers. *Phys. Rev. Lett.*, 65:1575–1578, 1990.
- F. Xie, G. Hu, and Z. Qu. On-off intermittency in a coupled-map lattice system. *Phys. Rev. E*, 52(2):1265, 1995.

- V. Yakhot. Large-scale properties of unstable systems governed by the Kuramoto–Sivashinski equation. *Phys. Rev. A*, 24:642, 1981.
- T. Yalcinkaya and Y.-Ch. Lai. Bifurcation to strange nonchaotic attractors. *Phys. Rev. E*, 56(2):1623–1630, 1997.
- T. Yamada and H. Fujisaka. Stability theory of synchronized motion in coupled-oscillator systems. II. The mapping approach. *Prog. Theor. Phys.*, 70(5):1240–1248, 1983.
- T. Yamada and H. Fujisaka. Stability theory of synchronized motion in coupled-oscillator systems. III. Mapping model for continuous system. *Prog. Theor. Phys.*, 72(5):885–894, 1984.
- T. Yamada and H. Fujisaka. Intermittency caused by chaotic modulation. I. Analysis with a multiplicative noise model. *Prog. Theor. Phys.*, 76(3):582–591, 1986.
- T. Yamada and H. Fujisaka. Effect of inhomogeneity on intermittent chaos in a coupled system. *Phys. Lett. A*, 124(8):421–425, 1987.
- Y. Yamaguchi and H. Shimizu. Theory of self-synchronization in the presence of native frequency distribution and external noises. *Physica D*, 11:212–226, 1984.
- H. L. Yang and E. J. Ding. Synchronization of chaotic systems and on–off intermittency. *Phys. Rev. E*, 54(2):1361–1365, 1996.
- T. Yang and K. Bilimgut. Experimental results of strange nonchaotic phenomenon in a second-order quasi-periodic forced electronic circuit. *Phys. Lett. A*, 236(5–6):494–504, 1997.
- A. R. Yehia, D. Jeandupeux, F. Alonso, and M. R. Guevara. Hysteresis and bistability in the direct transition from 1:1 to 2:1 rhythm in periodically driven ventricular cells. *Chaos*, 9(4):916–931, 1999.
- M. K. Stephen Yeung and S. H. Strogatz. Time delay in the Kuramoto model of coupled oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 82(3):648–651, 1999.
- K.-P. Yip and N.-H. Holstein-Rathlou. Chaos and non-linear phenomena in renal vascular control. *Cardiovasc. Res.*, 31:359–370, 1996.
- L. Yu, E. Ott, and Q. Chen. Transition to chaos for random dynamical systems. *Phys. Rev. Lett.*, 65:2935–2938, 1990.
- Y. H. Yu, K. Kwak, and T. K. Lim. On–off intermittency in an experimental synchronization process. *Phys. Lett. A*, 198(1):34–38, 1995.
- M. A. Zaks, E.-H. Park, M. G. Rosenblum, and J. Kurths. Alternating locking ratios in imperfect phase synchronization. *Phys. Rev. Lett.*, 82:4228–4231, 1999.
- D. Zanette and A. S. Mikhailov. Condensation in globally coupled populations of chaotic dynamical systems. *Phys. Rev. E*, 57(1):276–281, 1998a.
- D. Zanette and A. S. Mikhailov. Mutual synchronization in ensembles of globally coupled neural networks. *Phys. Rev. E*, 58(1):872–875, 1998b.
- G. M. Zaslavsky. The simplest case of a strange attractor. *Phys. Lett. A*, 69(3):145–147, 1978.
- W.-Z. Zeng, M. Courtemanche, L. Sehn, A. Shrier, and L. Glass. Theoretical

- computation of phase locking in embrionic atrial heart cell aggregates. *J. Theoretical Biology*, 145:225–244, 1990.
- Z. G. Zheng, G. Hu, and B. Hu. Phase slips and phase synchronization of coupled oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 81(24):5318–5321, 1998.
- T. Zhou, F. Moss, and A. Bulsara. Simulations of a strange non-chaotic attractor in a SQUID. In S. Vohra, M. Spano, M. Schlesinger, L. Pecora, and W. Ditto, Editors, *Proc. of the 1st Experiment. Chaos Conf., Arlington VA, Oct. 1–3, 1991*, pages 303–314. World Scientific, Singapore, 1992.
- Zh. Zhu and Zh. Liu. Strange nonchaotic attractors of Chua’s circuit with quasiperiodic excitation. *J. Bifurc. Chaos*, 7(1):227–238, 1997.
- L. Zonghua and C. Shigang. General method of synchronization. *Phys. Rev. E*, 55(6):6651–6655, 1997a.
- L. Zonghua and C. Shigang. Synchronization of a conservative map. *Phys. Rev. E*, 56(2):1585–1589, 1997b.

Предметный указатель

- автогенератор
 - триодный, 25, 144, 151
 - электронный, 66, 68
- автоколебания
 - вынуждаемые, 78, 96
 - с шумом, 113
 - хаотические, 186
- автоколебательная система, 28,
49–71, 232, 248
 - слабо нелинейная, 237, 292
- Адлера уравнение, 241
- амплитуда, 54–59, 73, 242
 - комплексная, 237, 249, 293, 348,
363
 - мгновенная, 206, 453, 457
- амплитудное уравнение, 248, 250,
293
- ансамбль
 - вынуждаемых осцилляторов, 135
 - копий хаотической системы, 332
 - нейронов, 369
 - хаотических осцилляторов, 197
 - хаотических отображений,
410–416
- аплодисменты, 176
- Арнольда язык, 81, 97, 269, 303,
334, 335
- аттрактор-воронка, 323
- аттрактор, 53, 406
 - симметричный, 387, 402
 - случайный, 436
 - странный, 185–189, 402
 - странный нехаотический, 444
 - топологический, 407
 - хаотический, 53
- Белоусова-Жаботинского реакция,
167–169, 173
- биений частота, 79, 145, 244, 336
- биения, 164
- бифуркация
 - вилки, 403, 407
 - докритическая, 365, 407
 - закритическая, 365, 403, 404
 - коразмерности 2 и 3, 258
 - седло-узел, 244, 255, 271, 276
 - удвоения периода, 128, 403
 - хаос-хаос, 408
 - Хопфа, 251, 254, 256, 364
- большие отклонения, 391
- Ван-дер-Поля уравнение, 24, 233,
250, 455
- взаимодействие
 - отталкивающее, 290
 - отталкивающее фазы, 143, 160

- притягивающее, 198, 290, 382
- притягивающее фазы, 143, 160
- статистическое, 423
- возмущение, 53
 - локальное, 413
 - начальных условий, 188
 - поперечное, 387
 - продольное, 387
- возмущений метод, 247
- вращения число, 266, 272, 292, 303
- время возврата, 191, 236, 325
- вымирание колебаний, *см.* гашение колебаний

- гашение колебаний, 24, 150, 295, 336, 368
- генератор, 136
 - пилообразного напряжения, 151
- Гильберта преобразование, 206, 453
- Гинзбурга-Ландау комплексное уравнение, 348, 350, 352, 422
- гиперхаос, 337
- гистерезис, 108, 365
- гликолитические колебания, 174

- Данжуа теорема, 267
- данные
 - двухканальные, 209–213, 221
 - многоканальные, 217
- деление частоты, 106
- демодуляция, 283, 314
- Джозефсона контакт, 157, 280–282, 370
- динамическая система, 49
 - автономная, 29, 324
 - диссипативная, 184
 - неавтономная, 324
 - с дискретным временем, 324
- диссипация, 50, 60
- дефект, 350, 352
 - пространственно-временной, 166
- дифференциальные уравнения
 - автономные, 186
 - в частных производных, 343, 348, 421
 - неавтономные, 186
 - нелинейные, 63
 - обыкновенные, 186, 417, 425
 - стохастические, 310
- диффузия, 305, 349, 400, 419, 433
- фазы, 113, 192, 305
- Дуффинга осциллятор, 454
- дыхание, 85, 113, 146, 177, 206

- захват
 - мод, 151
 - частот, 32, 77–82, 97, 141, 193, 210, 243, 327
 - фаз, 35, 77–82, 100, 142, 193, 243

- изохрона, 235–238
- импульсная сила, 264
- импульсов последовательность, 93–99
- инвариантная кривая, 261, 273, 278

- Каплана-Йорке формула, 439, 444
- Кардара-Паризи-Жанга уравнение, 346, 350
- кластер, 42, 161, 164, 173, 197, 202, 342, 362, 366, 415
 - в цепочке осцилляторов, 340
- клеточный автомат, 423
- когерентность, 135, 331–333, 347, 350, 356, 357, 360, 374
- колебания
 - возбуждаемые шумом, 131
 - затухающие, 454
 - изохронные, 238, 251
 - когерентные, 135, 326
 - коллективные, 42
 - неизохронные, 238, 299
 - противофазные, 148, 343
 - свободные, 37
 - сердечные, 120
 - синфазные, 148, 373
 - хаотические, 184
 - циркадные, 137
- кольца отображение, 260, 273–278
- корреляция взаимная, 210, 225
- косая система, 389
- квазипериодическая сила, 272

- квазипериодическое движение, 84, 267, 269, 288, 340
- Курамото модель, 371, 373
- Курамото переход, 170, 197, 373
- Курамото-Сивашинского уравнение, 350, 421
- лазер, 133, 136, 151, 161
взаимодействие, 198
полупроводниковый, 136
с задержанной обратной связью, 101
- Ланжевена уравнение, 306, 361
- Лежандра преобразование, 393, 441
- Лиссажу фигура, 85, 145
- локомоция, 177
- Лоренца система, 185, 321, 426
взаимодействие, 198
диффузия фазы, 326
с периодической силой, 430
синхронизация внешней силой, 329
- Ляпунова показатель, 59, 189, 312, 336, 387, 432, 444
в системе с шумом, 432
локальный по времени, 391
максимальный, 188
нулевой, 59, 190, 234, 279, 318
по предыстории, 442
поперечный, 388, 411, 417, 419, 420, 424, 425
продольный, 388
условный, 426
- менструальный цикл, 124, 174
- Милнора аттрактор, 406
- Миролло-Строгатца модель, 369
- многообразии
неустойчивое, 236, 274, 276, 407
устойчивое, 236, 407
- модуляция, 110
хаотическая, 277
частоты, 109
- мозга активность, 153, 217
- мультистабильность, 159, 278, 439
- накопление–сброс осциллятор, 68–71, 106–109, 151, 263, 300, 369
- нейрон, 70, 132, 181, 183, 221, 369
- неустойчивость
абсолютная, 414
конвективная, 414
поперечная, 407, 423
- Ньюэла критерий, 350
- область притяжения, 53
- область синхронизации, 81, 97, 99, 108, 243, 270
- обобщенная синхронизация, 199, 438
- обратная связь, 63, 66, 67, 101, 124, 145
- окружности отображение, 96, 261–274, 289, 291–292, 433
обратимое, 265, 291
разрывное, 264, 271
- окружности поворот, 262, 265, 291
- органные трубы, 23
- осциллятор
автономный, 50, 73
взаимодействие, 141
квазилинейный, 54, 73–85
линейный, 454
на соляном растворе, 178
слабо нелинейный, 248
хаотический, 42, 184–190, 318
химический, 173
циркадный, 123
электрохимический, 201
- отображение
кольца, *см.* кольца отображение
логистическое, 382, 388, 445
одномерное, 382
окружности, *см.* окружности отображение
разрывное, 264
с шумом, 433
сброса, 301
связанные, 382
типа косой тент, 384, 397, 425
типа тент, 382

- пейскекер, 71, 104, 153
циркадный, 122
- перемежаемость, 278, 354
модуляционная, 386, 392, 421, 437
- перемешивание, 189, 193
- перепад фазовый, 352
- переустановка фазы, 93
- переход к синхронизации, 82, 246,
254–257, 357, 385, 387
- переход к хаосу, 128
- период, 29, 30, 54, 233
средний, 113, 192
топологический, 319, 335
хаотических колебаний, 191
- периодическая траектория, 267,
318, 335
- подавление колебаний, 73, 128
- полная синхронизация, 45, 197–198
- популяция
клеток, 174, 179
осцилляторов с шумом, 360, 364
связанных осцилляторов, 27, 140,
355, 360
- порог синхронизации, 360, 385,
388–390
- порядка функция, 366
- порядка параметр, 357, 367
- потенциал
бистабильный, 133
действия, 70, 130, 153
наклонный, 75, 306
U-образный, 57
- потенциальный барьер, 114, 307
- поток специальный, 320
- предельный цикл, 51–54, 233–236
- профиль амплитуды, 166
- профиль фазы, 166, 346, 350
- проскок фазы, 82, 115, 117, 157,
307, 335
- противофазная синхронизация, 22,
35, 142, 143, 159, 160, 290, 297
- Пуанкаре отображение, 90, 191,
236, 319, 325
- размерность, 52
ляпуновская, 439
- обобщенная, 441
фрактальная, 270
- разность фаз, 74, 81, 100, 241, 289,
460
- обобщенная, 213
циклическая, 216, 222, 225
- расплывшееся состояние, 373
- распределение
автономных частот, 172, 356, 364,
367, 368, 376
локальных по времени
показателей Ляпунова, 391
- фаз, 119, 226, 358, 362
циклической разности фаз, 156
- расстройка, 32, 73, 94, 142, 241, 265,
293, 310, 335
- реакции-диффузии уравнения, 419
- резонанс, 37, 130
- резонансное условие, 240, 241, 289
- релаксационный осциллятор, 45,
59, 67–71, 73, 299–303
взаимодействие, 151
с внешней силой, 102–112
- репеллер, 53
- решетка двумерная, 163
- Рёсслера система, 320, 327, 335–336,
375
- ридинг, 407
- ритм, 28
дыхания, 85, 179
сердечный, 106, 119, 220
суточной активности, 51
физиологический, 51, 71
- ротатор, 157–159, 279–282, 365
ансамбль глобально связанных,
371
- светлячок, 91–93
- связи функция, 366
- связи оператор
собственные значения, 415
- спектр, 411
- связь, 22, 30
асимметричная, 287, 414
ближайших соседей, 339, 414
глобальная, 170–176, 201, 375, 415

- диссипативная, 297, 382, 415
- диффузионная, 293, 336, 420
- задержанная, 148
- линейная, 383, 410
- линейный оператор, 382
- непосредственная, 293
- однаправленная, 40, 41, 105, 199, 316, 412, 438
- реактивная, 297, 299, 349, 368
- симметричная, 290, 383
- управление-подчинение, 200
- сердечно-сосудистой и дыхательной систем взаимодействие, 220
- сердце, 50, 70, 104, 152
- частота биений, 146, 224, 459
- сигнал
 - нестационарный, 455
 - аналитический, 453
- сила
 - гармоническая, 73
 - квазипериодическая, 444
 - флуктуирующая, 131, 305, 388
 - хаотическая, 437
- симметрия, 201, 395, 438
- синаотриальный узел, 104, 152
- синфазная синхронизация, 35, 142, 143, 159, 160, 290, 297
- синхрограмма, 219
- синхронизация
 - взаимная, 22, 141, 287–303, 315, 327
 - глобально связанных осцилляторов, 175
 - порядка $n : m$, 97, 99, 106, 211
 - ротаторов, 157, 158
 - сердцебиений, дыхания и локомоции, 178
 - сильная, 404
 - системы и ее копии, 201, 425, 439
 - слабая, 404, 416
 - управление-подчинение, 201
 - через подавление хаоса, 202, 430
- случайное блуждание, 113, 192, 212, 305, 313
- спайк, 70, 109, 131
- спектр
 - особенностей, 440
 - пространственный, 346
 - спектр мощности, 202, 257, 306, 314, 331, 333
 - взаимный, 210, 213, 225
 - спиральная волна, 167, 169, 351
 - среднее поле, 171, 332, 357, 360, 375
 - хаотическое, 368
 - комплексное, 356
 - стохастический резонанс, 131–134
 - стробоскоп фазовый, 148, 218
 - стробоскопический метод, 196, 226, 236, 262, 328
 - стробоскопическое отображение, 261
- термодинамический предел, 356, 362, 374, 414
- тор, 261, 342, 444
 - инвариантный, 274, 288
- точечный процесс, 91
- турбулентность
 - фазовая, 350
- узел, 277
- усилитель, 66, 145, 412
- усреднения метод, 250, 292, 348, 371
- устойчивость, 56, 60, 189, 386
 - асимптотическая, 76, 234, 428
 - нейтральная, 73
 - поперечная, 387
 - топологическая, 270
- фаза, 33, 54–59, 63, 233
 - мгновенная, 206, 453, 457
 - начальная, 55
 - оценка по сигналу, 204–208
 - плохо определенная, 323
 - развернутая, 219, 460
 - хаотических колебаний, 190
 - циклическая, 55, 218
- фазовая когерентность, 326, 350
- фазовая плоскость, 53
- фазовая синхронизация, 42, 192–197, 375
- фазовое пространство, 52, 233

- фазовой автоподстройки система, 283–285, 314, 315
- фазовый объем, 61
- фазовый переход, 357, 360, 364
- неравновесный, 401
- фазовый портрет, 52
- фазовый сдвиг, 35, 78, 81, 234
- Фоккера-Планка уравнение, 309, 362, 365, 400
- хаос, 108, 184, 186, 276, 382
- коллективный, 368
- пространственно однородный, 418, 419
- пространственно-временной, 418, 421
- хаотизация колебаний, 73
- химическая реакция, 419
- колебательная, 167, 342, 352
- светочувствительная, 167
- хищник-жертва система, 180
- Хопфа-Коула преобразование, 345
- хронотерапия, 123
- центральный генератор ритма, 148, 160
- цепочка
- осцилляторов, 161, 165, 197, 418, 419
- слабо нелинейных, 348
- связанных отображений, 414, 418
- с однонаправленной связью, 413
- циркадный ритм, 26, 41, 51, 67, 121–124
- частота, 30, 54, 234
- автономная, 30, 73, 234, 339, 356, 376
- зависящая от амплитуды, 238
- мгновенная, 192, 305, 325, 454, 461
- наблюдаемая, 78, 141, 243, 266, 290, 327
- несоизмеримая, 267, 272, 288
- оценка по сигналу, 208, 461
- средняя, 43, 114, 192, 197, 320–321, 335
- точечного процесса, 463
- угловая, 30, 54
- частоты профиль, 165
- часы, 447
- биологические, 25, 51, 138
- маятниковые, 19, 30, 447–452
- чертова лестница, 270, 303
- численная ловушка, 394, 416, 437
- Шапиро ступеньки, 282
- шум, 113–119, 360, 364
- гауссовский, 115, 305, 309, 346, 362
- мультипликативный, 401
- ограниченный, 114, 308–309
- узкополосный, 314
- щель спектральная, 412, 413, 420
- Эдвардса-Уилкинсона уравнение, 346
- электрическая сеть, 157
- электрокардиограмма, 205–207, 457–458
- энтропийная функция, 393, 398
- эпилепсия, 182, 227
- эргодичность, 274, 387