

УДК 621.391

ОБ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ РАДИОКОЛЕБАНИЙ С НЕСОИЗМЕРИМЫМИ ЧАСТОТАМИ

Н. В. Евдокимов, В. П. Комолов

(кафедра радиофизики)

Экспериментально показано, что знаковая корреляция радиоколебаний с близкими несоизмеримыми частотами образует динамический хаос, управляемый задержкой образующих колебаний. Это свойство может быть полезным в многоканальных системах радиосвязи.

Математической моделью колебаний с несоизмеримыми частотами является тор, на поверхности которого возможно квазипериодическое движение без самопересечений траекторий, и в случае возмущений допустим случайный переход с одной траектории движения на другую, известный как диффузия Арнольда (см., напр., [1]). Вместе с тем отображение на торе приводит к равномерному перемешиванию фаз несоизмеримых колебаний, в результате которого их периодическая знаковая корреляция образует последовательности случайных двоичных импульсов, аналогичные алгоритмическим шумоподобным сигналам.

В двухконтурном параметрическом генераторе возбуждение колебаний возможно с рационально- и иррационально-связанными частотами [2]. Им соответствуют резонансные и нерезонансные (иррациональные) торы. В вырожденном режиме энергия связи осцилляторов обеспечивает автосинхронизацию колебаний. В невырожденном режиме она мала и на месте резонансных торов образуются локальные резонансы. Такие разрушения (бифуркации) наблюдаются в виде диффузии и перескоков фазы. Согласно теореме Колмогорова–Арнольда–Мозера наиболее устойчивы иррациональные торы, т. е. колебания, не имеющие общих резонансов.

Исследование знаковой корреляции колебаний невырожденного двухконтурного генератора с прореживанием выборок на частоте Ω_s , кратной частоте накачки ω_3 , показало, что диффузия фаз локальных резонансов приводит к почти-периодическим биениям с дискретным спектром. Однако при несоизмеримых близких частотах фазы перемешиваются равномерно, что приводит к случайной последовательности импульсов с непрерывным спектром и функцией автокорреляции пуассоновского вида.

Измерения проводились на экспериментальной установке, описанной в работе [3], но использовался только один параметрический генератор с соотношением частот в вырожденном режиме 1:2:3 (МГц). Кроме того, установка была дополнена КАМАКом, анализатором спектра и ЭВМ. Колебания с главными частотами ω_1 и ω_2 выделялись фильтрами, ограничивались по амплитуде и согласовывались по частоте и скважности делителями частоты. Полученные меандры с близкими несоизмеримыми частотами ($\Omega_1 = \omega_1/2 \approx \Omega_2 = \omega_2/4 \approx 0,5$ МГц) подавались на входы знакового коррелятора XOR₁ и параллельно,

через линии задержки, — на входы второго коррелятора XOR₂. Результаты корреляции на выходах XOR_{1,2} сравнивались в знаковом корреляторе XOR₃. (При совпадении знаков меандров на входах XOR напряжение на его выходе равно нулю, при несовпадении — единице.) Выборки сигнала обрабатывались на ЭВМ и наблюдались на экране дисплея, а их спектр — на выходе XOR₁. Скорость перемешивания фаз на входе коррелятора ограничена разностной частотой колебаний, поэтому частоту выборок можно было изменять в широких пределах: $\Omega_s \leq \Delta\Omega = |\Omega_1 - \Omega_2|$.

На рис. 1–3 показаны последовательности знаковых выборок с частотой 10 кГц и их функции автокорреляции. В случае локальных резонансов полного перемешивания фаз нет, поэтому сигнал на выходе XOR₁ имеет дискретный спектр и наблюдается в виде почти-периодических последовательностей выборок с соответствующими функциями корреляции (рис. 1). При соразмерных несоизмеримых частотах $\Omega_1 \approx \Omega_2$ фазы перемешиваются равномерно и сигнал на выходе XOR₁ становится случайным и имеющим непрерывный спектр. Соразмерные частоты связаны соотношением $\Delta\Omega < 0,5(\Omega_1 + \Omega_2)$. При малой расстройке частот: $\Delta\Omega < \Omega_s$ перемешивание фаз медленное (относительно Ω_s), и отображение Пуанкаре представляет собой перемежаемость — длинные случайные последовательности нулей и единиц с функциями корреляции затянутого пуассоновского вида (рис. 2). При большой расстройке частот: $\Delta\Omega > \Omega_s$ фазы перемешиваются быстро и образуется динамический хаос в виде непрерывной, практически δ -коррелированной битовой последовательности (рис. 3).

Интенсивность двухлучевой интерференции между когерентными сигналами с частотой Ω_1 или Ω_2 и квантованными одинаковыми амплитудами A равна $I_1 = 2A^2(1 + \cos \alpha)$, где $\alpha = \Omega_1 t$, или $I_2 = 2A^2(1 + \cos \beta)$, где $\beta = \Omega_2 t$. В случае приема с разделением частот сумма этих интенсивностей равна общей интенсивности I_Σ при четырехлучевой интерференции: $I_\Sigma = I_1 + I_2 = 2A^2(2 + \cos \alpha + \cos \beta)$, что наблюдается при интерференции шумоподобных последовательностей, образованных несоизмеримыми регулярными сигналами. Зависимости степени корреляции M двух случайных последовательностей от угла α между сигналами с частотой Ω_1 при $\beta = 0$ и от угла β между сигналами

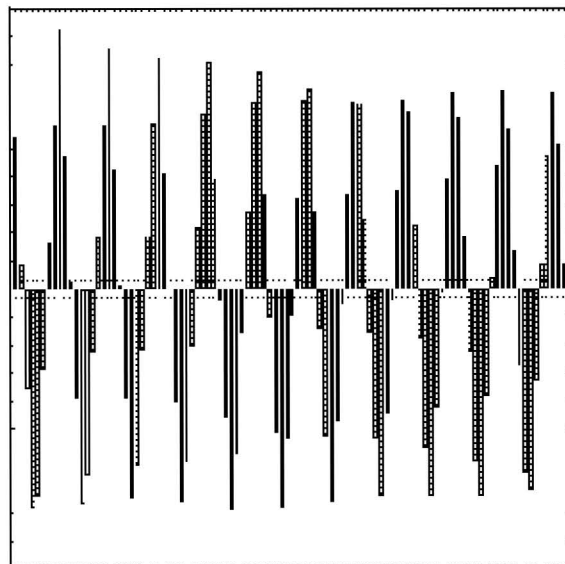
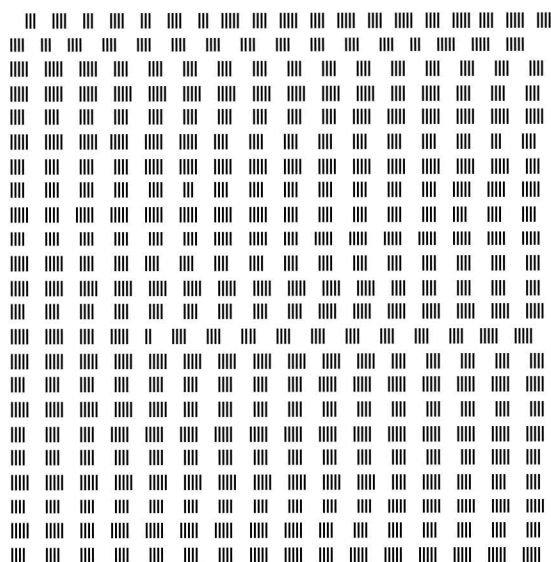


Рис. 1. Отображение одного из локальных резонансов и его функция автокорреляции

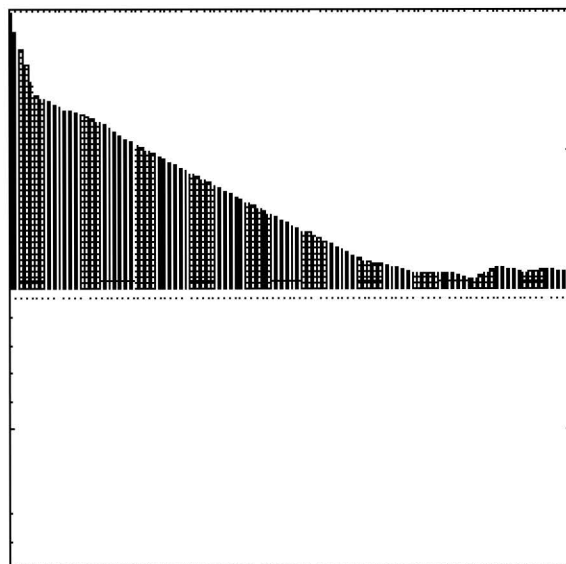
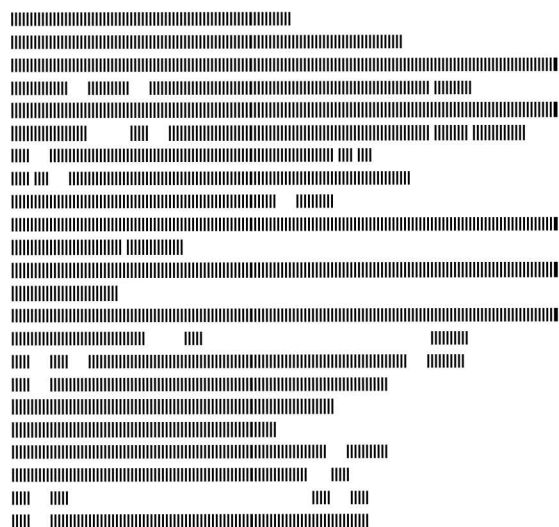


Рис. 2. Отображение перемежаемости и его функция автокорреляции

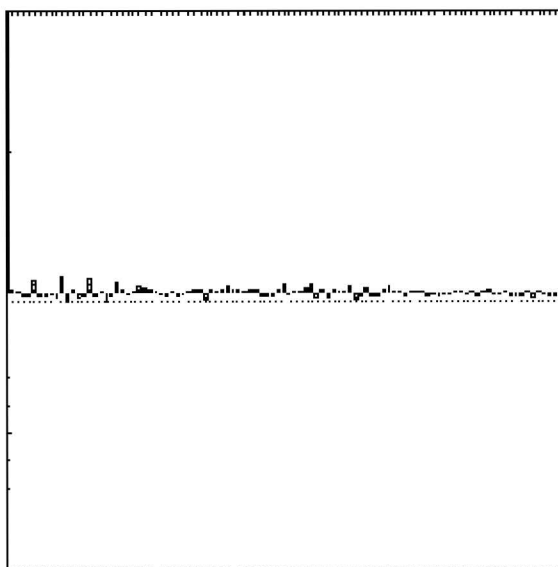
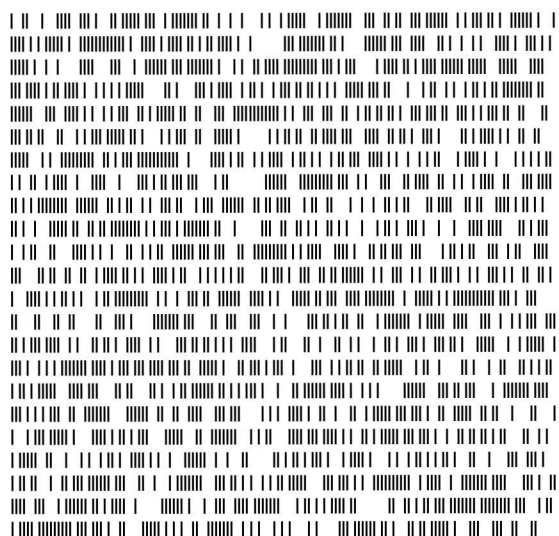


Рис. 3. Отображение динамического хаоса и его функция автокорреляции

с частотой Ω_2 при $\alpha = 0$ измерялись на выходе XOR_3 . Они соответствуют классическим выражениям для I_1 , I_2 и I_Σ и совпадают с экспериментальными результатами, приведенными в работе [3] (с. 94, рис. 2, с).

Из этих результатов следует вывод о возможном применении несоизмеримости радиосигналов [4, 5]. При передаче таких сигналов из удаленной точки в разных пунктах приема с частотным разделением когерентные сигналы можно сделать синфазными. В двухканальном четырехлучевом интерферометре интерференционный максимум соответствует когерентности случайных последовательностей. Иначе говоря, в пространственно разнесенных приемниках такого интерферометра из принимаемых радиосигналов можно формировать когерентные последовательности случайных двоичных импульсов и использовать их в качестве непрерывных ключевых потоков для защиты передаваемой информации [4, 6]. Вместе с тем колебания невырожденного генератора представляют собой классический аналог квантовых дихотомных (двухзначных) сигналов [3]. Это дает возможность абонентам автономной криптосистемы, генерируя дихотомные несоизмеримые радиосигналы и частично обмениваясь ими, скрытно формировать когерентные ключевые потоки [4].

С другой стороны, несоизмеримые сигналы можно использовать для формирования непериодических

шумоподобных сигналов неограниченной длины. В отличие от своих аналогов — последовательностей максимальной длины M — каждая N -последовательность является двоичной формой иррационального числа и не имеет собственного периода. Однако каждая N -последовательность имеет дельтовидную функцию автокорреляции, которая управляется независимыми задержками каждого из колебаний. Поэтому для N -последовательностей в целом согласованная фильтрация невозможна, но возможен отдельный синхронный прием когерентных радиосигналов и синхронное накопление выборок их знаковой корреляции. Однолепестковость функции автокорреляции можно использовать в локации для борьбы с многолучевостью.

Литература

1. Шустер Г. Детерминированный хаос. М.: Мир, 1988.
2. Каплан А.Е., Кравцов Ю.А., Рылов В.А. Параметрические генераторы и делители частоты. М.: Сов. радио, 1966.
3. Евдокимов Н.В., Клышко Д.Н., Комолов В.П., Ярочкин В.А. // УФН. 1996. **166**, № 1. С. 91.
4. Евдокимов Н.В., Клышко Д.Н., Комолов В.П., Ярочкин В.А. Патент RU 2117402 С1. 1998.
5. Евдокимов Н.В., Комолов В.П., Комолов П.В. Патент RU 2122232 С1. 1998.
6. Месси Д.Л. // ТИИЭР. 1988. **76**, № 5. С. 24.

Поступила в редакцию 12.05.00

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.41

АНИЗОТРОПИЯ АНИЗОМЕРНЫХ СПЕКЛ-СТРУКТУР

Ю. В. Васильев, А. В. Козарь, Е. Ф. Курицына, А. Е. Лукьянов

(кафедра общей физики; кафедра радиофизики; кафедра физической электроники)

Экспериментально обнаружено, что различная степень анизотропной шероховатости поверхности узких металлических полосок приводит к существенному различию в характере обратного дифракционного рассеяния освещающего лазерного излучения. Выявлена анизотропия свойств возникающих случайных оптических полей.

Известно [1], что форма индикатрисы рассеяния пучка лазерного излучения малой мощности, освещающего плоскую изотропно-шероховатую металлическую поверхность, зависит от статистических характеристик шероховатости, которые определяют в оптическом процессе различную степень участия зеркального отражения падающего излучения (по Френелю), диффузного рассеяния излучения (по Рэлею) и зеркально-диффузного (квазизеркального) рассеяния (по Райсу).

Комплексная амплитуда $\mathbf{A}$ случайного оптического поля, которое возникает в точках полупространства [2], выражается векторной суммой амплитуды $\mathbf{a}_0$ некоторой регулярной составляющей поля и совокупности малых случайных амплитуд $\mathbf{a}_n$ всех рассеянных волн, приходящих от освещенных точек

шероховатой поверхности с хаотическими фазовыми сдвигами: $\mathbf{A} = \mathbf{a}_0 + \sum_{n=1}^N \mathbf{a}_n$. В случае широких освещающих пучков можно считать, что число элементарных рассеивателей излучения $N \rightarrow \infty$. Поэтому на регистрационном экране (фотобумага, фотопластинка и т. п.) на достаточно большом расстоянии от рассеивателя излучения формируется статистически устойчивая картина распределения освещенности. Ее мелкие детали сильно зависят от соотношения вкладов $\mathbf{a}_0$ и $\sum \mathbf{a}_n$. Так, если во всех точках экрана выполняется условие $\mathbf{a}_0 = 0$, то возникает предельно контрастная, статистически изотропная, пятнистая дифракционная картина (спекл-структура), состоящая из хаотически разбросанных по плоскости экрана мелких ярких пятнышек (спеклов). Соответ-