

ВСТУП

Курс “Статистична радіофізика та оптика” присвячений вивченню статистичних задач, що виникають у фізиці коливань та хвиль. Задачі ці розділяються на два великі класи: *а)* вивчення впливу випадкових процесів на фізичні явища суттєві для комунікацій – генерації електромагнітних (акустичних) сигналів, випромінювання і розповсюдження хвиль, прийому сигналів; *б)* вивчення оптичними та радіотехнічними методами різних фізичних об'єктів – атомних ядер, молекул, живих організмів, земної атмосфери, небесних тіл із урахуванням статистичної природи цих явищ і статистичної природи випромінювання [1].

Добре відомо, що монохроматичне коливання є тільки зручною ідеалізацією. Навіть когерентне випромінювання стабілізованого лазера, що працює в одномодовому режимі можна вважати монохроматизованим тільки в деякому наближенні. Власні теплові шуми робочого середовища, вібрація дзеркал, нарешті флуктуації початкової фази коливань приводять до статистичного розкиду частоти та амплітуди коливань. Годі вже й казати про монохроматичність “звичайних”, теплових джерел випромінювання. Природа джерел випромінювання така, що його в

багатьох випадках корисно і необхідно розглядати, як *статистичний об'єкт*. Усвідомлення статистичної природи випромінювання прийшло наприкінці XIX початку XX століття, зокрема завдяки роботам Рэлея, Мандельштама і Бріллюена по розсіянню світла. Основи статистичної теорії оптичних полів були закладені в 20-і рр. XX століття Шредінгером, який ввів поняття про когерентні стани. Фізика *розсіяння хвиль в статистично неоднорідних середовищах* залишається актуальним розділом статистичної радіофізики і оптики і дотепер. З'ясування особливостей інтерференції і дифракції випадкових хвиль є основним предметом *теорії когерентності*. Розвиток цієї теорії в 20-і роки XX століття і пізніше пов'язаний з роботами Майкельсона, Верде, Лауе, Цернике та інших. У 60-і рр. була розвинена методика опису когерентності оптичних полів на основі квантової електродинаміки [13].

Вивчення будь якого об'єкту природи в багатьох випадках означає вивчення взаємодії хвиль радіо чи оптичного діапазону з цим об'єктом. Окрім принципово статистичного характеру інформації про сам об'єкт та випромінювання розсіяного від нього, виникає також проблема донесення інформації до споживача. Так, використання статистики фотовідліків дозволяє одержати інформацію про середовище, розсіяне світло, і про сам процес розсіяння світла при розповсюдженні в неоднорідному середовищі [5]. Оскільки часто-густо сигнал розповсюджується через збурене середовище, виникає проблема статистичного опису *розповсюдження хвиль*. Особливо актуальною стала ця проблема у 30-50-і роки XX століття, коли активно розроблялися методи радіолокації, дальньої радіозв'язку і радіонавігації. Було встановлено, що на всіх основних етапах передачі інформації за допомогою радіохвиль (у процесах генерації, модуляції випромінювання,

розповсюдження і прийому) статистичні явища грають вирішальну роль. Постановка статистичних задач в теорії розповсюдження радіохвиль в першу чергу була пов'язана з розповсюдженням радіохвиль, а пізніше лазерних пучків в турбулентній атмосфері.

Важливий клас питань пов'язаний із власними *флуктуаціями та шумами* в електромагнітних пристроях. Незважаючи на незначні амплітуди таких шумів, в кінцевому випадку саме вони визначають граничну чутливість вимірювальних пристроїв, оскільки їх вплив зростає у міру збільшення чутливості вимірювальних і приймальних пристроїв, підвищення точності вимірювань. Існування флуктуацій пов'язано з наявністю у всякої макроскопічної системи великого числа степенів волі. Останні можуть бути макроскопічними і мікроскопічними. Макроскопічні флуктуації характерні для систем з розподіленими параметрами. Приклади таких флуктуацій – турбулентність середовища і хвилі на поверхні моря.

Мікроскопічні флуктуації обумовлені атомізмом речовини і електрики. Найбільш поширені приклади таких флуктуацій є такі. *Тепловий шум* або теплові флуктуації різних макровеличин – густини, тиску, температури, сили струму, напруги, напруженості електромагнітних полів. Всі вони в кінцевому випадку обумовлені тепловим рухом мікрочасток і різноманітні у своїх проявах – броунівський рух, молекулярне розсіяння світла в середовищі, теплові шуми в радіотехніці і радіофізиці, теплове випромінювання тіл і т. д. *Дробовий шум* або випадкові варіації числа частинок в електронних потоках при термо-та фотоемісії. Дробовий ефект безпосередньо обумовлений дискретністю мікроскопічних носіїв заряду. Ще один різновид шуму, що зустрічається в різноманітних об'єктах (електронних, біологічних, музичних і т.і.), добре відомий завдяки своїй широкої розповсюдженості і, водночас, складності

теоретичного аналізу. Це так званий $1/f$ шум, або струмовий шум, фліккер-шум, шум контактів, надлишковий шум. На поточний момент існують теоретичні складності в дослідженнях $1/f$ -шуму, що стосуються збіжності інтегралів. Хоча для деяких систем і існують цілком прийнятні моделі цього шуму, назагал вони не можуть мати широкого застосування.

Поглиблене вивчення проблеми шумів почалося у 1928-1930 рр., коли Найквіст запропонував формулу, що описує спектральну щільність потужності власних шумів на активному опорі, спричинених тепловим рухом електронів. У 20-і роки були встановлені закономірності дробового шуму електронних ламп, обумовлених статистичним характером електронної емісії [9]. З'ясувалося, що випадкові е.р.с., що виникають за рахунок теплового і дробового шуму, визначають граничну чутливість приймальних пристроїв. Відкриття Басовим, Прохоровим і Таунсом принципів посилення і генерації електромагнітних хвиль в квантових системах дозволило створити квантові генератори – мазери та лазери. Відсутність в цих пристроях джерел дробового шуму (електронних ламп) і робота при температурі, близької до температури рідкого гелію, дозволила різко знизити в них рівень шумів до рівня *природних*. Саме ці шуми, що зумовлені принципово статистичною природою електромагнітного випромінювання, і визначають граничну ширину спектральної лінії випромінювання лазера. Теоретично це було встановлено ще Енштейном, а також в роботах Понтрягіна, Андропова і Вітта в 30-х роках XX сторіччя.

Принципово важливу роль відіграють власні флуктуації в генераторах радіо та оптичного діапазону, оскільки саме вони є *затравкою для генерації*. Важливими завданнями сучасної статистичної оптики є вивчення флуктуацій лазерного випромінювання і розробка методів

зменшення рівня цих флуктуацій, підвищення чутливості оптичних приймачів.

З проблемою шумів тісно пов'язана проблема отримання інформації про об'єкт, про який, як правило, нам нічого *a priori* невідомо. Власні шуми та флуктуації при розповсюдженні, природні та штучні завади, що приходять на вхід приймача, призводять до того, що *прийом корисного сигналу* є принципово статистична задача. Іншими словами, інформація яку ми приймаємо, має деякий статистичний доданок, який слід коректно враховувати. З точки зору практики радіолокації, навігації і комунікації надзвичайно актуальною є задача виявлення сигналу на тлі природних шумів і штучних перешкод та оцінки його параметрів [11,12]. Фундаментальні положення теорії виявлення сигналів були закладені в роботах Котельникова в 40 - 50 рр ХХ століття.

Нелінійні ефекти в статистично неоднорідних середовищах мають свої характерні особливості відсутні в детермінованих системах. Стрімкий розвиток *нелінійної оптики* [14] у другій половині ХХ століття поставив нові задачі перед статистичною оптикою: вивчення впливу часової і просторової когерентності випромінювання і статистичних неоднорідностей середовища на нелінійних оптичні ефекти (нелінійне молекулярне розсіяння, генерація оптичних гармонік і параметричні явища в неоднорідних кристалах, нелінійна дифракція та ін.).

Із статистичними задачами, схожими задачам статистичної радіофізики, доводиться зустрічатися в гідродинаміці, акустиці і фізиці плазми (теорія турбулентності, фізика випадкових лінійних і нелінійних хвиль). Для статистичної радіофізики, як і для всієї фізики в цілому, велике значення має проблема виникнення хаотичного руху в нелінійних динамічних системах [15]. Перемішування, або *хаос*, може виникати навіть

в системі з двома степенями волі. З'ясовується, що стохастична поведінка в динаміці системи може виникнути за рахунок складних нелінійних взаємодій і за відсутності явних випадкових сил. Очевидно, що в значній мірі статистичні методи, розроблені для розв'язання типових стохастичних задач, можуть бути застосовані і в цьому випадку.

Математичною основою статистичної радіофізики та оптики є теорія вірогідності, теорія випадкових функцій, математична статистика і теорія прийняття рішень [2-4]. Скалярна або векторна функція однієї або декількох незалежних змінних є випадковою, якщо значення її при довільній послідовності вибору значень незалежних змінних виявляються набором *випадкових величин*. *Випадковий (стохастичний) процес* – випадкова функція часу. *Випадкове поле* – випадкова функція радіус-вектора і часу. У математичному плані розв'язання задач статистичної радіофізики та оптики може бути проведено шляхом розв'язання стохастичних диференціальних рівнянь – лінійних або нелінійних, з випадковими початковими або граничними умовами та/або випадковими параметрами і випадковими зовнішніми силами. Розв'язання таких рівнянь – це знаходження середніх і кореляційних функцій для випадкового невідомого процесу або поля. Інший підхід полягає в обчисленні середніх, кореляційних функцій, розподілів імовірностей із допомогою стохастичних методів, навіть у тому випадку, коли самі розв'язки рівнянь невідомі.

Незважаючи на різноманіття фізичних систем, в яких протікають випадкові явища, більшість із них описується порівняно невеликим числом математичних моделей. Часто для побудови моделі не вимагається знання мікроскопічної картини процесу і деталей його фізичного механізму. Зокрема, це має місце, якщо виконані умови центральної

граничної теореми теорії вірогідності [2,3]. Тоді процес є *нормальним (гауссовим)*. Гауссів розподіл стійкий тільки для лінійних систем з постійними параметрами [1,5]. Натомість, статистика процесу, що відбувається в нелінійній системі або в лінійній системі з випадковими параметрами, може істотно відхилятися від гауссівської. Якщо для лінійних систем принцип суперпозиції дозволяє широко використовувати апарат *спектрально-кореляційної теорії* [5,6], то поява нелінійностей суттєво ускладнює спектр сигналу і приводить до появи принципово нових ефектів, які не притаманні нелінійним детермінованим системам.

ПОСИЛАННЯ

- [1] Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1976, ч. 1. Случайные процессы.
- [2] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.
- [3] Ширяев А.Н. Вероятность. М.: Наука, 1989.
- [4] Гихман И.И., Скороход А.В. Введение в теорию случайных процессов. М.: Наука, 1977.
- [5] Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981.
- [6] Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Советское радио, 1971.
- [7] Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982.
- [8] Левин Б.В. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989.
- [9] Шумы в электронных приборах / Под ред. Л. Смоллина и Г. Хауса. Л.: Энергия, 1964.
- [10] Черенкова Е.Л., Чернышев О.В. Распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 1984.

- [11] Купер Дж., Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем. М.:Мир, 1989.
- [12] Радиотехнические системы передачи информации / Под ред. В.В. Калмыкова. М.:Радио и связь, 1990.
- [13] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб. пособие в 10 т. Т. 4
- [14] В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Квантовая электродинамика. М.: Наука,1989.
- [15] Клышко Д.Н. Фотоны и нелинейная оптика. М.: Наука, 1980.
- [16] Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику. От маятника до турбулентности и хаоса. М.: Наука, 1988.
- [17] Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974.
- [18] Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника / Под ред. В.А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1988.
- [19] Тарасенко Ф.П. Введение в курс теории информации. Изд-во Томского ГУ, Томск, 1963.
- [20] Игнатов В.А. Теория информации и передачи сигналов. М.: Советское радио, 1979.
- [21] Лоудон Р. Квантовая теория света / Под ред. Г.В. Скроцкого. М.: Мир, 1976.92
- [22] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1973.
- [23] Свешников А.Г., Тихонов А.Н. Теория функций комплексной переменной. М.:Наука, 1970.
- [24] Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.

[25] Марков Г.Т., Петров Б.М., Грудинская Г.П. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Советское радио, 1979.

[26] Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1978, ч. 2. Случайные поля.