

Fizyka statystyczna sieci koewoluujących

Tomasz Raducha

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Fizyka statystyczna stworzyła fundamenty potrzebne do analizy układów składających się z dużej liczby elementów. W jej ramach udowodniono, że problemy, które pozornie wydają się niemożliwe do opisanie w sposób ilościowy, można badać w sposób ścisły. Najważniejszym krokiem w tej przemianie była zmiana podejścia do predykcji – z opisu deterministycznego do stochastycznego. Narzędzia stworzone w ramach fizyki statystycznej stosowane były następnie w wielu innych dziedzinach nauki, z których w kontekście niniejszej rozprawy najważniejsza jest nauka o układach złożonych.

W centrum nauki o układach złożonych leżą sieci. W przypadku, gdy przedmiot badań składa się z wielu elementów, których interakcje nie są oczywiste, sieci są naturalnym wyborem do jego opisu. Niedawne publikacje wręcz identyfikują układy złożone z koewoluującymi sieciami wielowarstwowymi. Można dyskutować z tak wąską definicją, jednak koewolucja struktury sieci oraz stanu wierzchołków z całą pewnością jest jedną z kluczowych własności układów złożonych.

Badania nad wpływem koewolucji na zachowanie poszczególnych modeli są stosunkowo młode. Co więcej, spójna teoria sieci koewoluujących jest jak do tej pory nieosiągalna. Aby poznać uniwersalne prawa, najpierw należy zrozumieć pojedyncze problemy. Zgodnie z tą ideą, niniejsza rozprawa bada koewolucję w różnych modelach sieciowych, tak analitycznych (czy równowagowych), jak i algorytmicznych (czy nierównowagowych).

W szczególności, w rozprawie badane są efekty generowane przez uwzględnienie koewolucji w trzech modelach: modelu wyborcy, modelu Axelroda oraz modelu Isinga. Pierwszy z nich jest klasycznym modelem stosowanym w ilościowym opisie systemów społecznych, choć był również stosowany w fizyce, biologii, czy finansach. Model wyborcy jest rozszerzony w rozprawie o koewolucję, domykanie trójkątów, nieliniowe interakcje oraz szum. Model Axelroda ma czysto socjologiczną interpretację – jest to model interakcji społecznych, lub rozprzestrzeniania się kultury. W rozprawie badany jest wpływ różnych rodzajów przełączania krawędzi na końcową topologię sieci. Otrzymane wyniki są porównane z danymi empirycznymi opracowanymi w ramach niniejszej rozprawy. Model Axelroda został poprawiony tak, aby opisać skalowanie obserwowane doświadczalnie. Warto zaznaczyć, iż wcześniej proponowane rozszerzenia modelu nie rozwiązały problemu sprzeczności z danymi. Model Isinga pierwotnie został skonstruowany w celu wyjaśnienia zjawiska ferromagnetyzmu. Zdobył on jednak dużo więcej uwagi niż by na to wskazywało pierwsze zastosowanie. Stał się on punktem odniesienia dla wielu modeli sieciowych i był badany w wielu wariantach – nie tylko motywowanych empirycznie, ale również teoretycznie atrakcyjnych. Model jest rozwinięty w niniejszej rozprawie w tym właśnie abstrakcyjnym kontekście. Dynamika spinów z modelu Isinga jest połączona z cechami topologicznymi wierzchołków w celu zbadania zachowania modelu równowagowego z własnościami topologicznymi uwzględnionymi w hamiltonianie.

We wszystkich badanych modelach otrzymane zostały nowe wyniki. W nieliniowym koewoluującym modelu wyborcy została zaobserwowana nowa faza rozbita, a także wysokie wartości współczynnika gronowania. Po dodaniu szumu do modelu otrzymane zostały dwie nowe fazy o interesujących własnościach. Pierwsza faza istnieje w granicy termodynamicznej, druga zaś zawiera klastry topologiczne generowane przez stany wierzchołków, co nie zostało do tej pory zaobserwowane w koewoluującym modelu wyborcy z szumem. Dodatkowo wyprowadzony został nowy opis analityczny modelu. Jako że model ten jest uogólnieniem poprzednio badanych modeli, opis analityczny obejmuje również przypadki graniczne. Również w modelu Axelroda osiągnięto wysokie wartości współczynnika gronowania, a także potęgowy rozkład stopnia wierzchołków. Przede wszystkim jednak, dzięki zastosowanym modyfikacjom model przejawia nowe skalowanie liczby domen ze wzrostem sieci. To nowe skalowanie, w przeciwieństwie do oryginalnego modelu,

jest zgodne z danymi empirycznymi. W rozprawie zaproponowany został także model równowagowy sieci koewoluujących. Hamiltonian modelu zawiera nie tylko stany wierzchołków i ich interakcje, ale również ich stopnie jako lokalne cechy topologiczne. Bogaty diagram fazowy otrzymany w ten sposób jest dodatkowo opisany analitycznie. Konfiguracje obserwowane w modelu częściowo pokrywają się z konfiguracjami z modeli nierównowagowych, sugerując możliwość opisanie ich w podejściu równowagowym.

Wyniki otrzymane w ramach niniejszej rozprawy rzucają nowe światło na modele sieci koewoluujących i ich analizę przy użyciu metod fizyki statystycznej. Teoria układów złożonych nie jest jeszcze kompletna, a kolejne cegły są wciąż kładzione pod jej fundamenty. Być może bardziej ogólna teoria zostanie odkryta po zrozumieniu wystarczającej liczby oddzielnych zjawisk. Zawartość niniejszej rozprawy przyczynia się do powstania takiej teorii dostarczając kolejnych cegieł. Główną z nich są badania nad koewolucją stanu wierzchołków i topologii sieci, jako jedną z kluczowych własności układów złożonych. Otrzymane wyniki nie tylko reprezentują postęp w badaniach nad poszczególnymi modelami, ale także mogą być postrzegane jako kolejny krok w kierunku teorii układów złożonych.