

Abstract

The analysis and modelling of small-scale turbulence in the atmosphere play a significant role in improving our understanding of cloud processes, thereby contributing to the development of better parameterization of climate models. Advancement in our understanding of turbulence can be fueled from a more in-depth study of small-scale turbulence, which is the subject of this thesis. Within this thesis, small scales are understood as turbulent structures affected by viscosity as well as scales from the high-wavenumber part of the inertial range which are of $\mathcal{O}(0.1m - 1m)$ typically neglected in numerical simulations of atmospheric turbulence.

This work is divided into two parts. In the first part, various approaches to estimate the turbulence kinetic energy (TKE) dissipation rate ϵ , from one-dimensional (1D) intersections that resemble experimental series, are tested using direct numerical simulation (DNS) of the stratocumulus cloud-top mixing layer and free convective boundary layer. Results of these estimates are compared with “true” DNS values of ϵ in buoyant and inhomogeneous atmospheric flows. This research focuses on recently proposed methods of the TKE dissipation-rate retrievals based on signal’s zero crossings and on recovering the missing part of the spectrum. The methods are tested on fully resolved turbulence fields and compared to standard retrievals from power spectra and structure functions. Anisotropy of turbulence due to buoyancy is shown to influence retrievals based on the vertical velocity component. TKE dissipation-rate estimates from the number of crossings correspond well to spectral estimates. As far as the recovery of the missing part of the spectrum is concerned, different models for the dissipation spectra was investigated, and the best one is chosen for further study. Results were improved when the Taylors’ microscale was used in the iterative method, instead of the Liepmann scale based on the number of signal’s zero crossings. This also allowed for the characterization of external intermittency by the Taylor-to-Liepmann scale ratio. It was shown that the new methods of TKE dissipation-rate retrieval from 1D series provide a valuable complement to standard approaches.

The second part of this study addresses the reconstruction of sub-grid scales in large eddy simulation (LES) of turbulent flows in stratocumulus cloud-top. The approach is based on the fractality assumption of the turbulent velocity field. The fractal model reconstructs sub-grid velocity fields from known filtered values on LES grid, using fractal interpolation, proposed by Scotti and Meneveau [Physica D 127, 198–232 1999]. The characteristics of the reconstructed signal depend on the stretching parameter d , which is related to the fractal dimension of the signal. In many previous studies, the stretching parameter values were assumed to be constant in space and time. To improve the fractal interpolation approach, the stretching parameter variability is accounted for. The local stretching parameter is calculated from DNS data with an algorithm proposed by Mazel and Hayes [IEEE Trans. Signal Process 40(7), 1724–1734, 1992], and its probability density function (PDF) is determined. It is found that the PDFs of d have a universal form when the velocity field is filtered to wave-numbers within the inertial range. The inertial-range PDFs of d in DNS and LES of stratocumulus cloud-top and experimental airborne data from physics of stratocumulus top (POST) research campaign were compared in order to investigate its Reynolds number (Re) dependence. Next, fractal reconstruction of the subgrid velocity is performed and energy spectra and statistics of velocity increments are compared with DNS data. It is assumed that the stretching parameter d is a random variable with the prescribed PDF. Moreover, the autocorrelation of d in time is examined. It was discovered that d decorrelates with the characteristic timescale of the order of the Kolmogorov’s time scale and hence can be chosen randomly after each time step in LES. This follows from the fact that the time steps used in LES are typically considerably larger than Kolmogorov’s timescale. The implemented fractal model gives good agreement with the DNS and physics of stratocumulus

cloud (POST) airborne data in terms of their spectra and PDFs of velocity increments. The error in mass conservation is smaller compared to the use of constant values of d . In conclusion, possible applications of the fractal model were addressed. A priori LES test shows that the fractal model can reconstruct the resolved stresses and residual kinetic energy. Also, based on the preliminary test, the fractal model can improve LES velocity fields used in the Lagrangian tracking of droplets for the simulation of cloud microphysics.

Both parts of the thesis are based on the assumptions of scale self-similarity of Kolmogorov and local isotropy, which may not be satisfied in real atmospheric conditions. Since the standard methods for TKE dissipation rate retrieval are derived from these assumptions, the level of discrepancy is investigated by comparing the actual value of ϵ from DNS with estimates from these methods. Also, in the case of the modelling of small (sub-grid) scales, the improved fractal model relies on scale-similarity. Range of scales, in which this assumption is sufficiently satisfied (i.e. inertial range scales) is reconstructed. Statistical tools from the Kolmogorov's similarity hypotheses is used to access the performance of the improved fractal model.

STRESZCZENIE

Analiza i modelowanie małych skal turbulencji atmosferycznej pozwala na głębsze poznanie procesów zachodzących w chmurach, umożliwiając tym samym lepsze parametryzacje chmur w modelach numerycznych służących prognozom pogody i klimatu. Przez pojęcie "małe skale" rozumiemy tu niewielkie przestrzenie i krótkotrwałe turbulencyjne fluktuacje prędkości przepływu, zarówno struktury wirowe z zakresu dyssypatywnego widma energii, jak również struktury z zakresu inercyjnego, o rozmiarach rzędu 0.1 m - 10 m, które zwykle pomijane są w symulacjach numerycznych turbulencji atmosferycznej metodą dużych wirów (*ang. Large Eddy Simulations - LES*).

Niniejsza praca podzielona jest na dwie części. W pierwszej testowane są różne metody oszacowań tempa dyssypacji energii kinetycznej turbulencji ε . Wykorzystuje się w niej jednowymiarowe (1D) horyzontalne profile pola prędkości przepływu w górnej części chmury stratocumulus oraz pola prędkości przepływu w atmosferycznej konwekcyjnej warstwie granicznej, otrzymane z eksperymentu numerycznego metodą Direct Numerical Simulations (DNS). Profile te przypominają dane eksperymentalne otrzymane podczas pomiarów lotniczych uzyskane z rozdzielczością w pełni odwzorowującą inercyjną część widma energii fluktuacji turbulencyjnych. Wyniki testowanych oszacowań wielkości ε porównywane są z odpowiednimi "prawdziwymi" wartościami obliczonymi z definicji tej wielkości. Rezultaty pokazują, że anizotropia turbulencji spowodowana obecnością sił wyporu ma istotny wpływ na oszacowania tempa dyssypacji otrzymane z analizy pionowej składowej prędkości. Odbiegają one od wartości dokładnych w stopniu większym, niż wyniki otrzymane z analizy składowych horyzontalnych.

Kolejnym elementem tej części pracy są testy zaproponowanych niedawno nowych metod szacowania tempa dyssypacji na podstawie liczby przecięć sygnału z poziomem zero oraz metody iteracyjnej, w której zakłada się pewną analityczną postać dyssypatywnej części widma energii kinetycznej turbulencji. Oszacowania tymi metodami porównano z wartościami ε oszacowanymi metodami standardowymi, czyli z wykorzystaniem widma energii oraz funkcji struktury w obszarze inercyjnym. Rezultaty pokazują satysfakcjonującą zgodność oszacowań. Dodatkowo, w przypadku metody iteracyjnej, przetestowane zostały różne modele widma w obszarze dyssypatywnym, a najlepszy z nich wybrano do dalszych badań. W ich efekcie zaproponowano modyfikację metody iteracyjnej polegającą na zastąpieniu występującej w niej skali Liepmanna, związanej z liczbą przecięć sygnału z poziomem zero przez odpowiednik mikroskali Taylora. W ten sposób poprawione zostały wyniki szacowania dyssypacji w obszarach, w których występuje zjawisko intermittenencji zewnętrznej, czyli naprzemiennego występowania obszarów laminarnych i turbulentnych. Pozwoliło to również na scharakteryzowanie intermittenencji zewnętrznej za pomocą stosunku skali Taylora do skali Liepmanna. Wykazano, że nowe metody szacowania tempa dyssypacji stanowią cenne uzupełnienie metod standardowych.

Druga część pracy dotyczy rekonstrukcji skal podsiatkowych w metodzie dużych wirów LES. Podejście to opiera się na założeniu fraktalności (sąpopodobieństwa) turbulentnego pola prędkości w obszarze inercyjnym. Model fraktalny rekonstruuje pole prędkości małych skal wirowych na podstawie znanego pola prędkości rozwiązywanego na siatce LES, wykorzystując interpolację fraktalną, zaproponowaną w pracy Scotti &

Meneveau [Physica D 127, 198-232 1999]. Charakterystyka zrekonstruowanego sygnału zależy od tzw. parametru rozciągania d , który jest powiązany z fraktalnym wymiarem sygnału. W większości poprzednich badań przyjęto, że wartości tego parametru są stałe w przestrzeni i czasie. W niniejszej pracy zaproponowano modyfikację metody fraktalnej uwzględniając zmienność parametru rozciągania. Lokalne wartości parametru d obliczone zostały najpierw na podstawie danych DNS za pomocą algorytmu zaproponowanego w pracy Mazel & Hayes [IEEE Trans. Signal Process 40(7), 1724-1734, 1992]. Następnie wyznaczono funkcję gęstości prawdopodobieństwa (ang. *probability density function* - PDF) tego parametru. Stwierdzono, że profile PDF wartości d mają postać uniwersalną gdy pole prędkości jest filtrowane do liczb falowych w zakresie bezwładnościowym widma. Porównano profile PDF wartości d otrzymane na podstawie pola DNS, pola LES chmury stratocumulus oraz na podstawie eksperymentalnych danych lotniczych z kampanii pomiarowej POST (ang. *Physics of Stratocumulus Top*), w celu zbadania zależności funkcji PDF od liczby Reynoldsa (Re).

W zaproponowanej w pracy modyfikacji metody fraktalnej rekonstrukcji założono, że parametr d nie jest stały, lecz jest zmienną losową o zadanej funkcji PDF. Na tej podstawie wykonano następnie fraktalne rekonstrukcje pola prędkości podsiatkowej oraz porównano widma energii i statystyki różnic prędkości z odpowiadającymi danymi DNS. Zbadano również funkcję autokorelacji d w czasie. Ponieważ otrzymana charakterystyczna skala czasowa autokorelacji jest rzędu skali Kołmogorowa, po każdym kroku czasowym w metodzie LES losowano nowe, niezależne wartości parametru d . Wynika to z faktu, że kroki czasowe stosowane w LES są zazwyczaj znacznie większe od skali czasowej Kołmogorowa.

Wyniki zaimplementowanego modelu fraktalnego zgadzają się dobrze z odpowiadającymi danymi DNS, LES i danymi pomiarowymi z POST. Dywergencja zrekonstruowanego pola prędkości przyjmować może w ogólności wartości niezerowe, jednak w pracy pokazano, że błąd zachowaniu masy jest mniejszy niż w przypadku metod zakładających stałe wartości d . Ostatnia część pracy dotyczy możliwych zastosowań modelu fraktalnego. Przeprowadzone testy pokazują, że za jego pomocą zrekonstruować można z dobrym przybliżeniem naprężenia podsiatkowe oraz podsiatkową energię kinetyczną. Ponadto model fraktalny może zostać zastosowany w symulacjach pola prędkości z poruszającymi się w nim cząstkami (np. kroplami chmurowymi).

Założenia wykorzystane w obydwu częściach pracy opierają się na hipotezach Kołmogorowa, szczególnie założeniu o lokalnej izotropii. Na ich podstawie wyprowadzono metody szacowania tempa dyssypacji energii kinetycznej. Model fraktalny przedstawiony w drugiej części pracy również opiera się na samopodobieństwie skali, która wynika z drugiej hipotezy Kołmogorowa. Odtworzone zostają struktury z tzw. zakresu bezwładnościowego widma. Hipotezy Kołmogorowa mogą jednak nie być spełnione w rzeczywistych warunkach atmosferycznych. W pracy przedyskutowany został poziom tych rozbieżności, zarówno dla szacunków tempa dyssypacji (przez porównanie ich z rzeczywistą wartością ϵ), jak również dla wyników naprężeń podsiatkowych obliczonych na podstawie rekonstrukcji fraktalnej.