ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Χάρης Γεωργίου (Α.Μ: Μ-177)

ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΑΙΡΟΥ

Εργασία στο μάθημα: Παράλληλοι Αλγόριθμοι
Διδάσκων: Ν. Μισυρλής, Φ. Τζαφέρης

Αθήνα 1999

Πρόβλεψη Καιρού

- Κλιματολογικές Μελέτες
- Μοντέλα Ρύπανσης Περιβάλλοντος
- Οικονομικό
- Κοινωνικό

Μέθοδοι πρόβλεψης καιρού

- Αριθμητικές
  - ✓ **HIRLAM**
  - ✓ ETA (SKIRON)
- Μη-αριθμητικές
  - ✓ ANNs
  - ✓ Chaos Dynamics
  - ✓ Expert Systems

Ανάγκη για μεγάλη υπολογιστική ισχύ

- Ακρίβεια πρόβλεψης (όγκος δεδομένων)
- Ταχύτητα επεξεργασίας και ολοκλήρωσης πρόβλεψης
- Κλιμάκωση ως προς το χρόνο ή/και ως προς το χώρο

Κριτήρια αξιολόγησης μεθόδων

- "Ποια η απαιτούμενη προσπάθεια για μια υλοποίηση χρήσιμη και αποδοτική;"
- "Ποια η αποτελεσματικότητα της λύσης ως προς το κόστος υλοποίησης;"
- "Ποια η δυνατότητα κλιμάκωσης του μοντέλου;"

Γενικά μοντέλα κίνησης ρευστών (circulation models)

↳ προσομοίωση φυσικών συστημάτων με μοντέλα ρευστομηχανικής

General Circulation Model Equations (Navier-Stokes prim.eq.):

$$\frac{du}{dt} - \frac{uv\tan\phi}{\alpha} - fv = -\frac{1}{\rho\alpha\cos\phi}\frac{\partial p}{\partial\lambda} + F_\lambda \qquad (1)$$ (momentum equation)

$$\frac{dv}{dt} - \frac{u^2\tan\phi}{\alpha} - fu = -\frac{1}{\rho\alpha}\frac{\partial p}{\partial\phi} + F_\phi \qquad (2)$$ (momentum equation)

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \qquad (3)$$ (hydrostatic equation)

$$\frac{1}{\alpha\cos\phi}\left[\frac{\partial u}{\partial\lambda} + \frac{\partial(v\cos\phi)}{\partial\phi}\right] + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad (4)$$ (continuity equation)

$$\rho = \rho(T, p, ...) \qquad (5)$$ (equation of state)

$$\frac{dT}{dt} = f(T, ...) \qquad (6)$$ (thermodynamic equation)

$$\frac{d}{dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{\alpha\cos\phi}\frac{\partial}{\partial\lambda} + \frac{v}{\alpha}\frac{\partial}{\partial\phi} + w\frac{\partial}{\partial z} \qquad (D)$$

- Μοντέλα ατμόσφαιρας ⇔ Μοντέλα ωκεανών
- Μοντέλα ατμόσφαιρας + Μοντέλα ωκεανών ⇨ Μοντέλα κλίματος

- Ατμόσφαιρα → περισσότερες φυσικές διαδικασίες (cloud physics)

Κλίμακες	Χώρου	Χρόνου
ατμοσφ. μοντέλα	O(10) - O(1000) km	1 day - 1 year
ωκεαν. μοντέλα	O(100) - O(1000) km	1 week - 1 century

Επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων

FDM - Finite difference methods

SM - Spectral methods

FEM - Finite element methods

HIRLAM - **Hi**gh **R**esolution **L**imited **A**rea **M**odel

HIRLAM Circulation Model Equations:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = (f+\xi)v - \eta\frac{\partial u}{\partial \eta} - \frac{R_d T_v}{\alpha\cos\theta}\frac{\partial \ln p}{\partial \lambda} - \frac{1}{\alpha\cos\theta}\frac{\partial}{\partial\lambda}(\phi+E) + P_u + K_u \qquad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -(f+\xi)u - \eta\frac{\partial v}{\partial \eta} - \frac{R_d T_v}{\alpha}\frac{\partial \ln p}{\partial \theta} - \frac{1}{\alpha}\frac{\partial}{\partial\theta}(\phi+E) + P_v + K_v \qquad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \eta} = -\frac{R_d T_v}{p}\frac{\partial p}{\partial \eta} \qquad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{u}{\alpha\cos\theta}\frac{\partial T}{\partial\lambda} - \frac{v}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial\theta} - \eta\frac{\partial T}{\partial\eta} + \frac{\kappa T_v \omega}{(1+(\delta-1)q)p} + P_T + K_T \qquad (4)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{u}{\alpha\cos\theta}\frac{\partial q}{\partial\lambda} - \frac{u}{\alpha}\frac{\partial q}{\partial\theta} - \eta\frac{\partial q}{\partial\eta} + P_q + K_q \qquad (5)$$ (moisture eq.)

$$\frac{\partial}{\partial\eta}\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla\left(\vec{v}_h\frac{\partial p}{\partial\eta}\right) + \frac{\partial}{\partial\eta}\left(\eta\frac{\partial p}{\partial\eta}\right) = 0 \qquad (6)$$

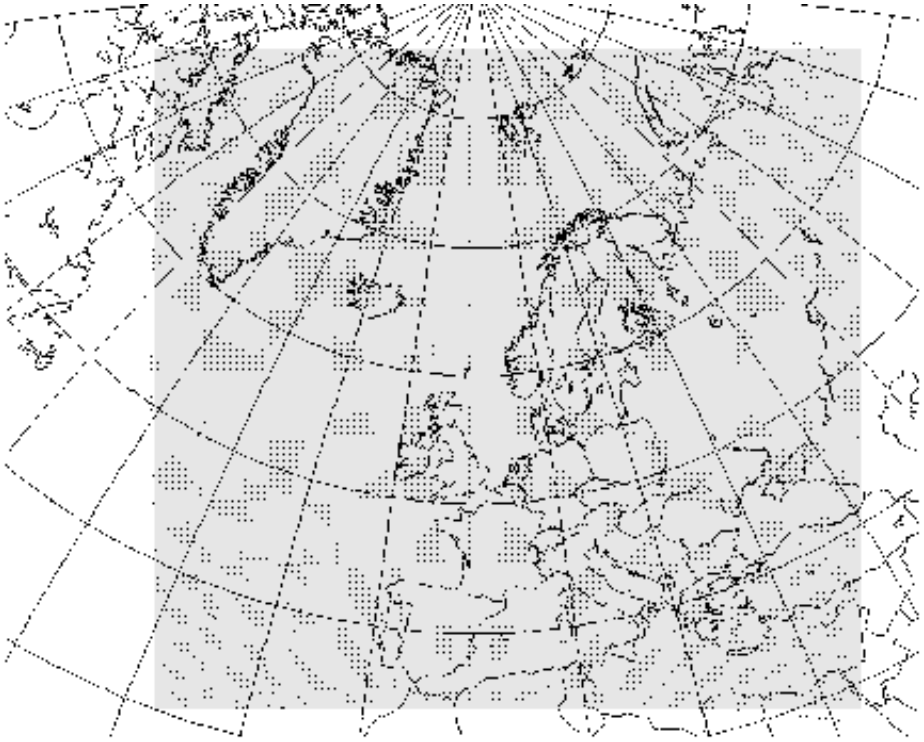
$$\xi = \frac{1}{\alpha\cos\theta}\left(\frac{\partial v}{\partial\lambda} - \frac{\partial}{\partial\theta}[\cos\theta\, u]\right) \quad , \quad E = \tfrac{1}{2}\left(u^2+v^2\right) \qquad (D)$$

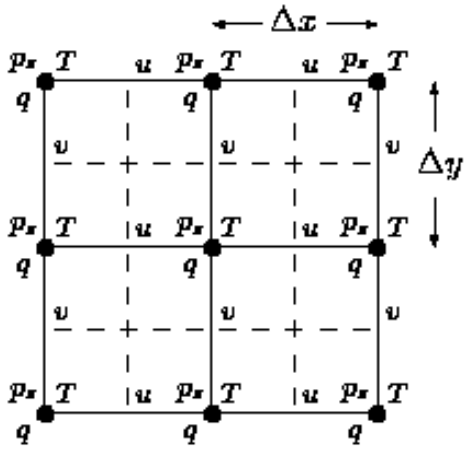
Discrete HIRLAM model

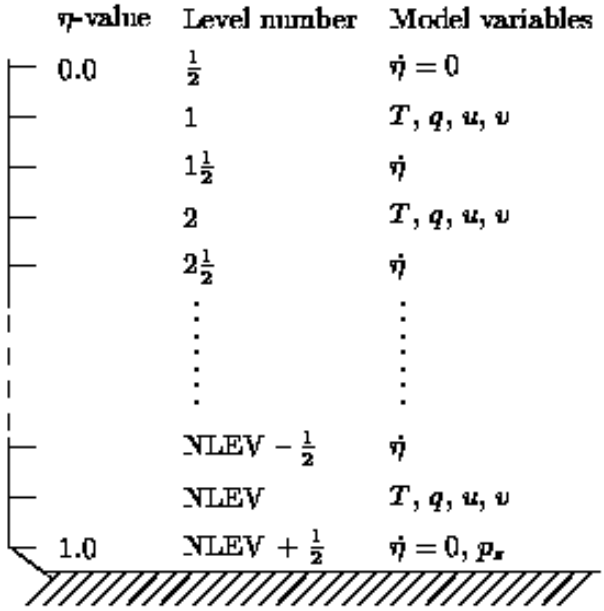
- Κατάτμηση της περιοχής μελέτης σε διακριτά "σημεία" (gridpoints)
- Επίλυση του συστήματος εξισώσεων του μοντέλου (προσομοίωση)

Shallow water model → απλοποιημένο μοντέλο

- Επίπεδο στρώμα ρευστού ενός επιπέδου (1-layer) με σταθερή και ομοιόμορφη πυκνότητα.
- Σύστημα 3 διαφορικών εξισώσεων 1ου βαθμού.
- Χρησιμοποιείται κυρίως ως benchmark απόδοσης.







Subgrid processes

- ↳ φυσικές διεργασίες που δεν καλύπτει το διακριτό μοντέλο
  - εξελίσσονται σε διαστήματα μικρότερα του gridpoint Dx
  - εξελίσσονται σε χρόνο μικρότερο του διαστήματος Dt

Προσεγγιστική επίλυση: "Parameterization assumption"

- ↳ Παραμετρική προσέγγιση σε μεγαλύτερη (υπό μελέτη) κλίμακα

Γενικό σχήμα επεξεργασίας

- Dynamics (DYN): time step solving (30%) ⇨ οριζόντια εξάρτηση δεδ.
- Physical (PHYS): subgrid processes (70%) ⇨ κατακόρυφη εξάρτηση δεδ.

```
Program HIRLAM ;
Read data ;
Initialization ;
For each time step
    DYN ;  {dynamical part}
    PHYS ;  {physics part}
    6 hourly input of new boundary data
End For ;
Output results.
```

Κατάτμηση δεδομένων ⇨ "οριζόντια"

↳ Ελαχιστοποίηση επικοινωνιών στην PHYS, μεγιστοποίηση στην DYN

↳ Απεικόνιση αρχικού 3D-plane σε 2D-grid (stacked)

ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Explicit Eurelian

Απλή μέθοδος Euler επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων με διακριτό time step.

☑ απλότητα υλοποίησης

☒ μικρό time step (gravity waves)

Semi-implicit Eulerian

(Ημι-)Έμμεση μέθοδος Euler επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων με διακριτό time step.

☑ απλότητα υλοποίησης

☑ μεγαλύτερο time step από τις explicit μεθόδους (x5)

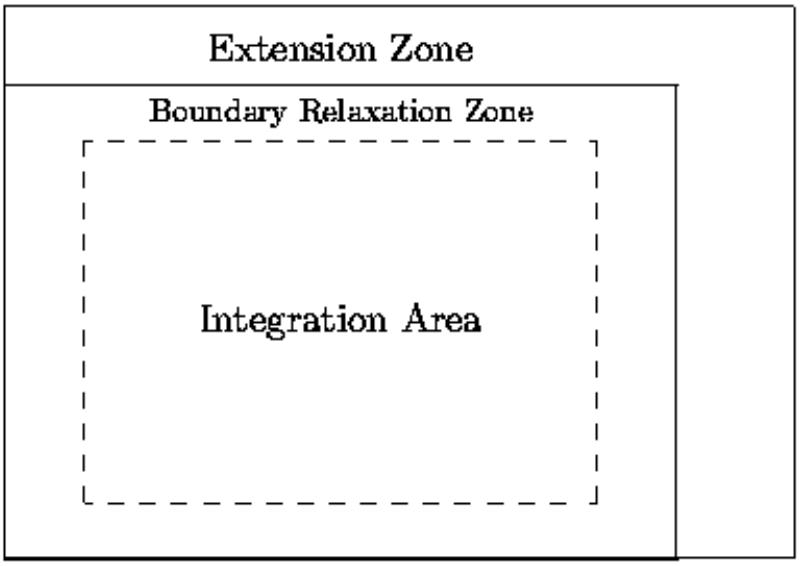
☒ πολυπλοκότητα επίλυσης (Helmholtz eq. set solver)

Spectral: φασματική ανάλυση

❶Ευθύς μετασχηματισμός Fourier (parallel FFT): gridpoints→frequencies

❷Άμεση επίλυση μοντέλου στο πεδίο των συχνοτήτων

❸Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier: frequencies→gridpoints



☑ απόδοση καλύτερη από της explicit, ανάλογη της semi-implicit

☑ ακρίβεια & απόδοση επίλυσης διαφορικών εξισώσεων

☑ έλεγχος φάσματος για τα δεδομένα (απόρριψη θορύβου)

☒ επέκταση της περιοχής μελέτης (≈2 φορές περισσότερα gridpoints)

☒ απόδοση εξαρτώμενη από την υλοποίηση των parallel FFTs

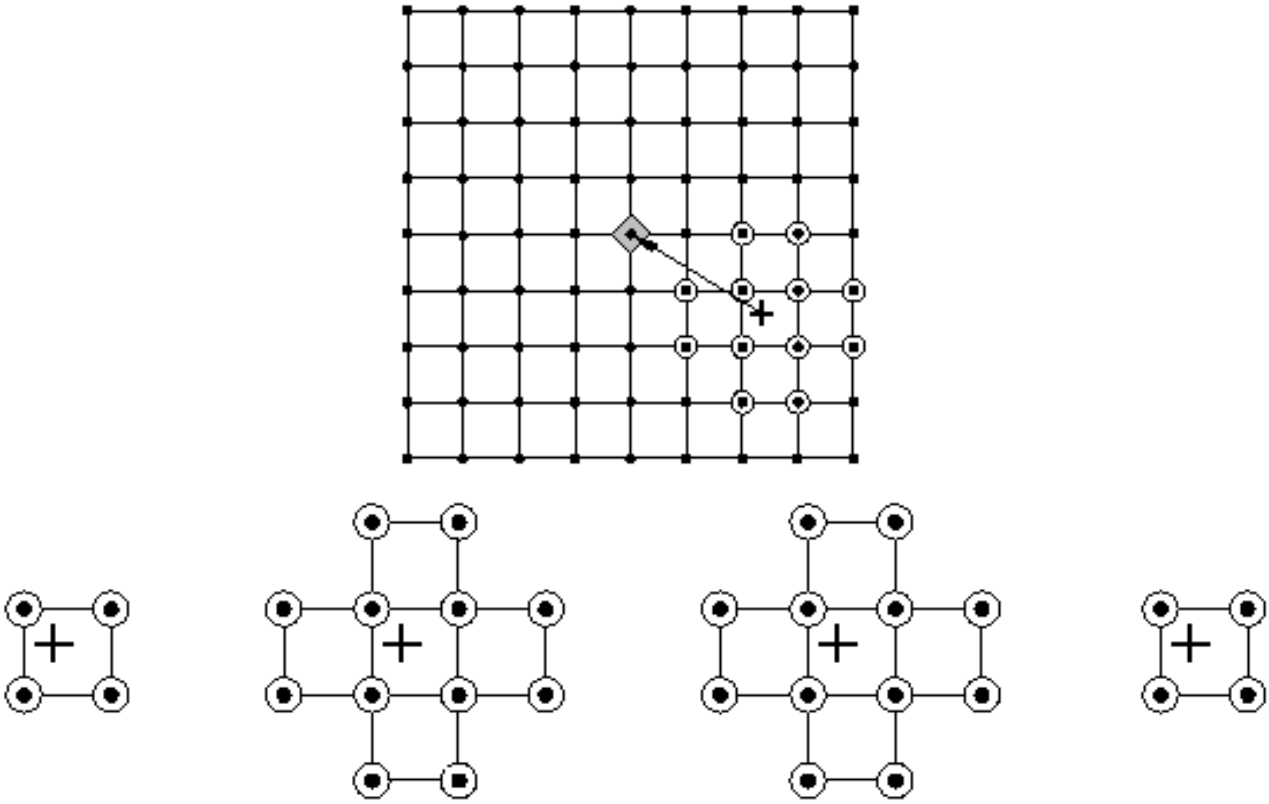
Semi-Lagrangian

Γενική ιδέα: υπολογισμός τροχιών στοιχειωδών σωματιδίων και προσαρμογή στα gridpoints.

❶Υπολογισμός τροχιάς στοιχειωδών σωματιδίων

❷Προσεγγιστική εκτίμηση παραμέτρων αρχικών συνθηκών

❸Ενημέρωση παραμέτρων στην τελική κατάσταση



☑ ακρίβεια & απόδοση επίλυσης (μερική μόνο δέσμευση στα gridpoints)

☑ μεγαλύτερο time step από τις implicit μεθόδους

☑ μεγαλύτερο time step (x3) από τις Eulerian μεθόδους (γενικά)

☒ πολυπλοκότητα επίλυσης

☒ ανομοιόμορφες επικοινωνίες μεταξύ gridpoints

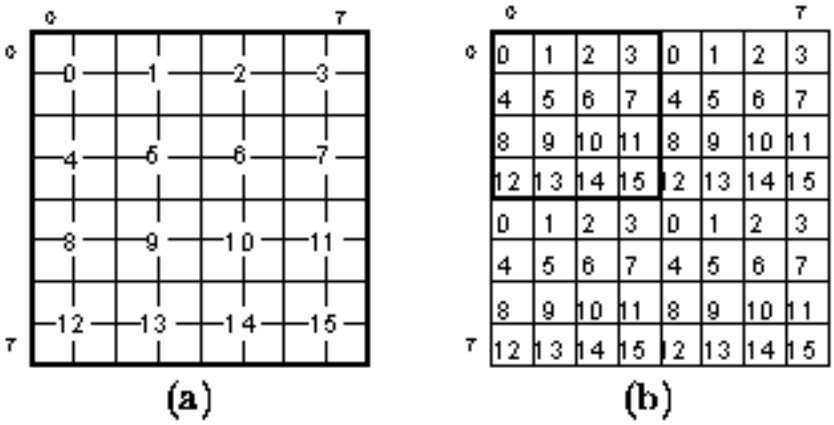
ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ & ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ

Αναπαράσταση & Αποθήκευση Δεδομένων

- Matrix: αποθήκευση του 2D-gridspace σε 2D-πίνακα
- Vector: αποθήκευση του 2D-gridspace σε γραμμικό πίνακα

Κατανομή Δεδομένων στους Επεξεργαστές

- Blocked: ανάθεση διαδοχικών gridpoints σε κάθε επεξεργαστή
- Scattered: ανάθεση gridpoints σε διαδοχικούς επεξεργαστές



Κατανομή δεδομένων σε μήτρα επεξεργαστών: blocked (a) και scattered (b)

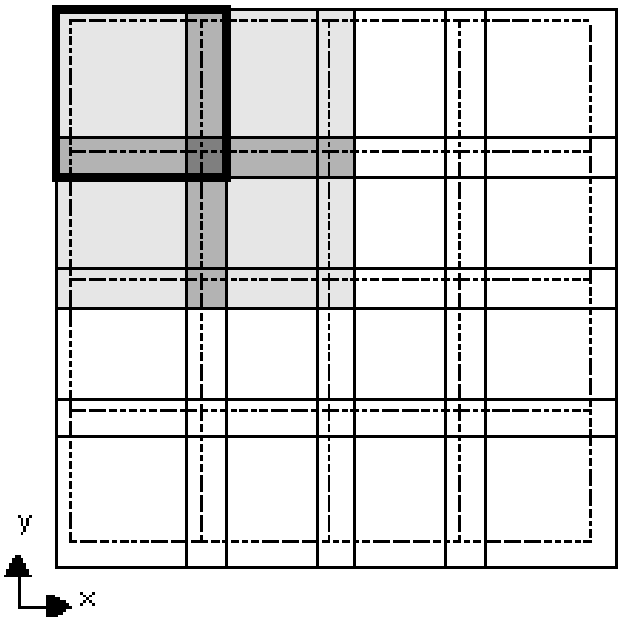
Υλοποίηση Παράλληλου Κώδικα

- Data-parallel: παράλληλος ως προς τα δεδομένα
- Work-sharing: παράλληλος ως προς την εργασία

Sequential code	Data-parallel code	Work-sharing code
DO 10 J=2,N-2 DO 20 I=2,M-2 B(I,J)=(A(I+1,J)-A(I,J)) + *(A(I,J+1)-A(I,J)) 20 CONTINUE 10 CONTINUE	B(2:M-2,2:N-2)=(A(3:M-1,2:N-2) + -A(2:M-2,2:M-2) + *(A(2:M-2,3:N-1) + -A(2:N-2,2:N-2))	CDIR$DOSHARED (J,I) ON B(I,J) DO J=2,N-2 DO I=2,M-2 B(I,J)=(A(I+1,J)-A(I,J) + *(A(I,J+1)-A(I,J)) END DO END DO

Διαχωρισμός Πεδίου (Sub-Domain Splitting)

- Κατάτμηση ολόκληρου του πεδίου σε υπο-περιοχές επεξεργασίας
- Ιδανικό για μηχανές MIMD
- Ελάχιστες τροποποιήσεις στην ίδια τη μέθοδο



☑ Ανεξάρτητη επεξεργασία σε κάθε PE (MIMD)

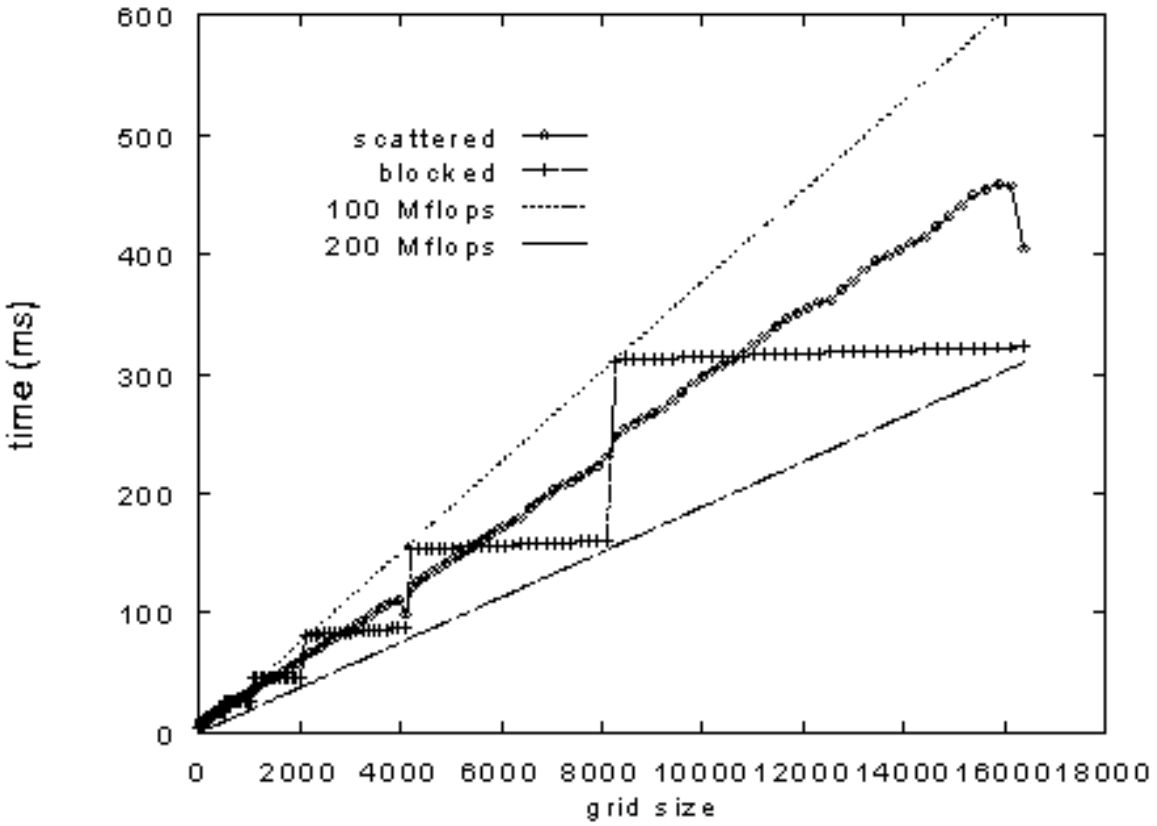
☑ Ελαχιστοποίηση επικοινωνιών

☑ Λίγες μετατροπές & εύκολη συντήρηση (παράλληλου) κώδικα

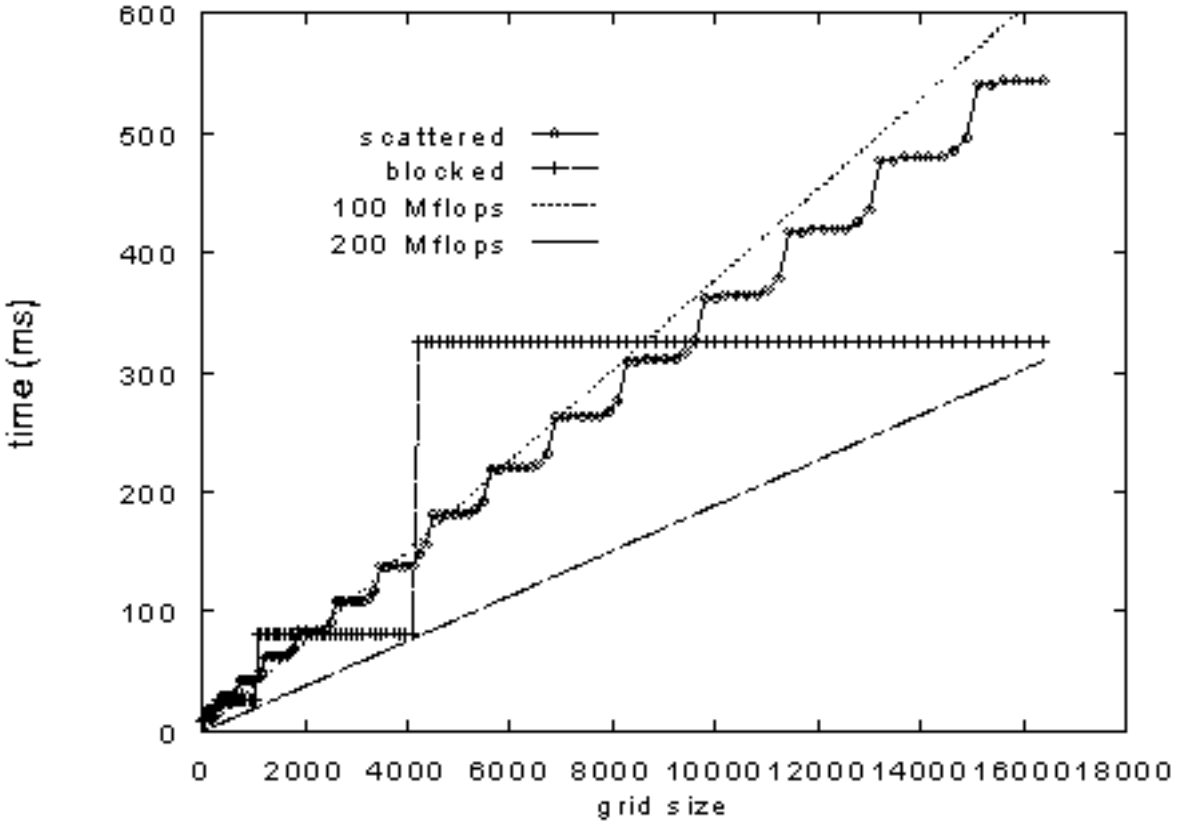
☒ Ακατάλληλο για data-parallel (SIMD) μηχανές

Explicit Message Passing

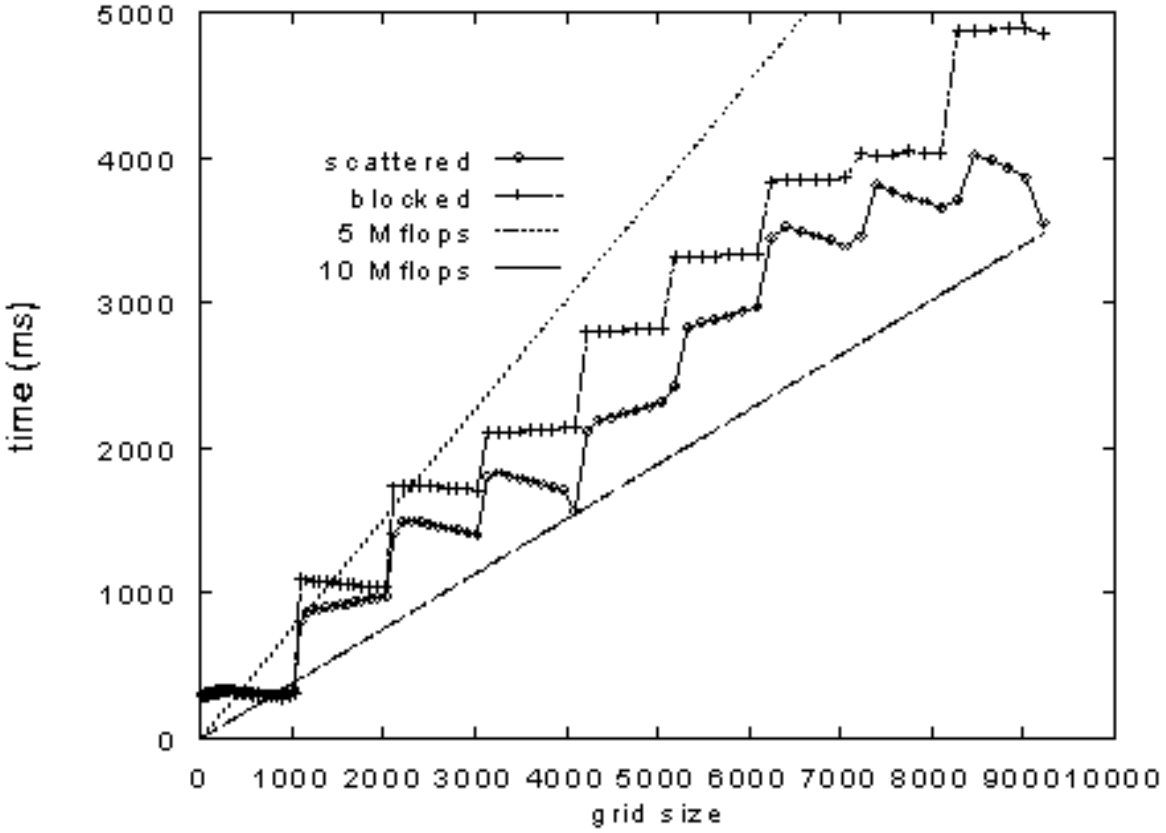
- Σύγχρονες επικοινωνίες: blocked send/receive message passing (PVM)
  - ☑ Συμβατότητα με πολλές αρχιτεκτονικές
  - ☒ Μεγάλο overhead επικοινωνιών (λόγω handshake)
- Ασύγχρονες επικοινωνίες: shared memory management (Cray T3D)
  - ☑ Μεγάλη ταχύτητα εκτέλεσης
  - ☒ Μεγάλο overhead σε 'put' (λόγω cache invalidate)
  - ☒ Δέσμευση αρχιτεκτονικής (Cray T3D)



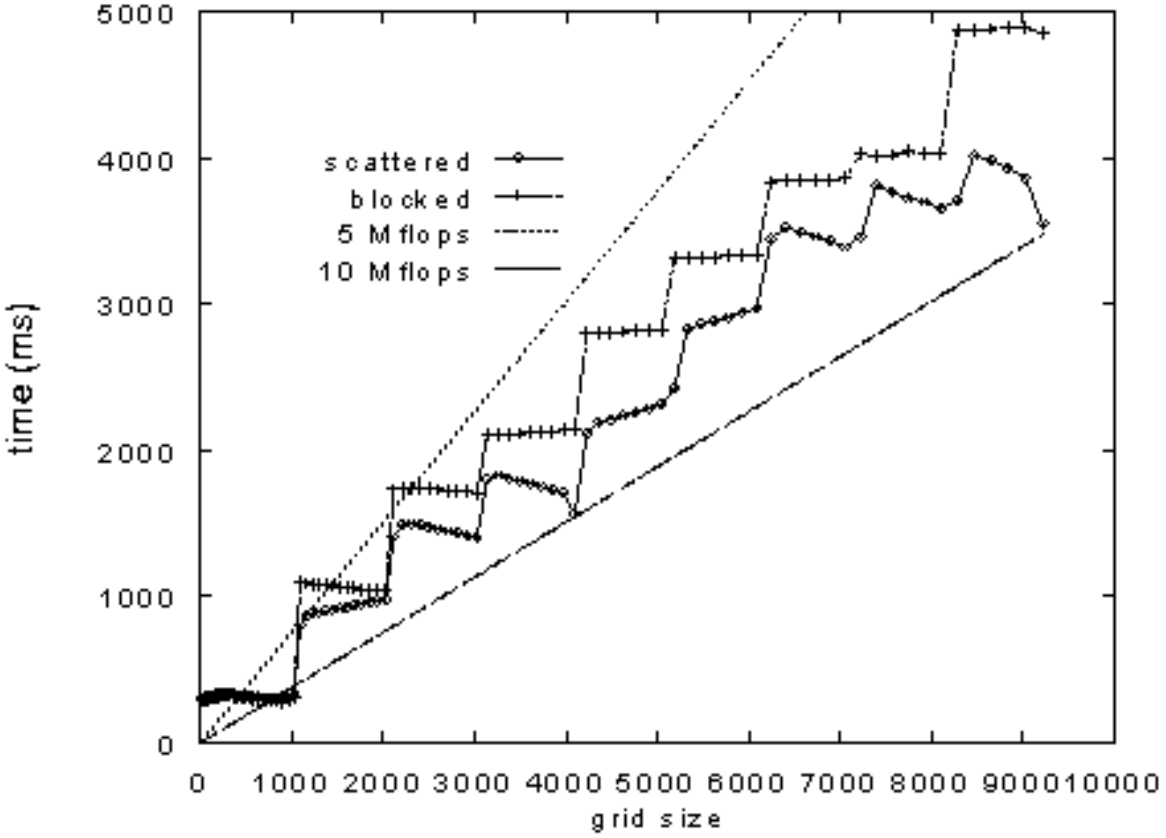
CRAY T3D (64 PEs): vector (1D), blocked & scattered data decomp.



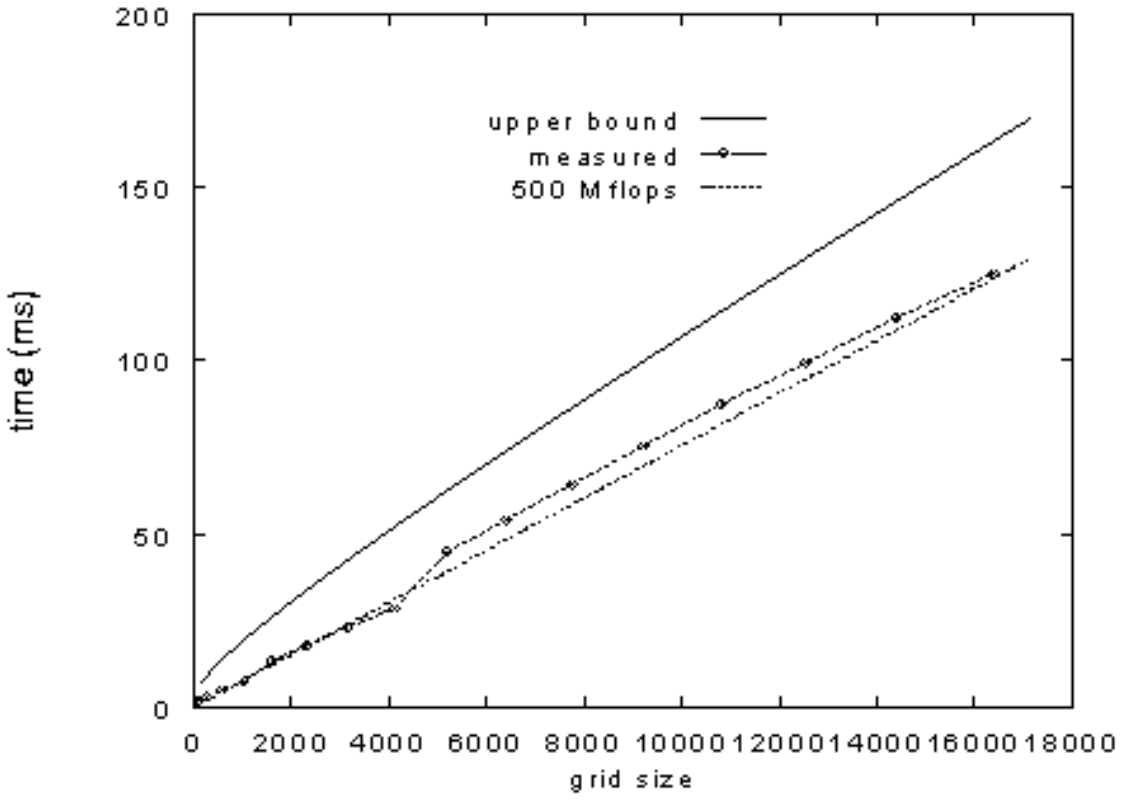
CRAY T3D (64 PEs): matrix (2D), blocked & scattered data decomp.



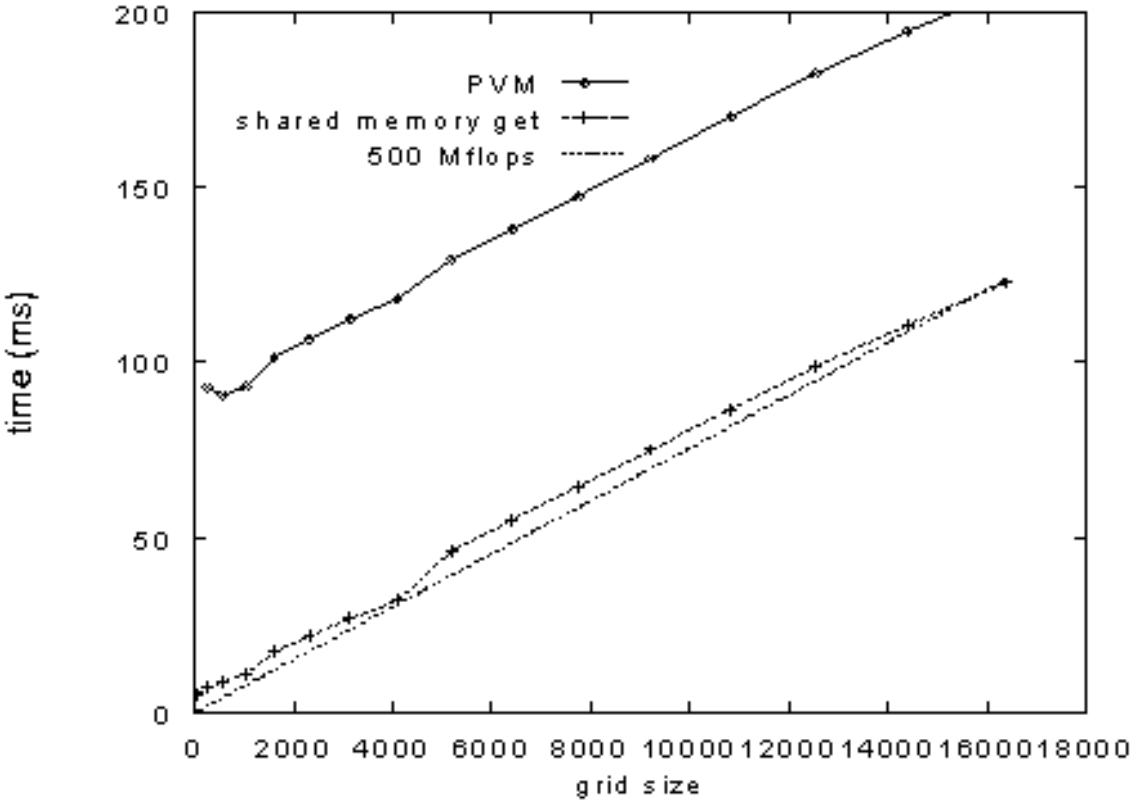
MP-1 MasPar (1K PEs): vector (1D), blocked & scattered data decomp.



MP-1 MasPar (1K PEs): matrix (2D), blocked & scattered data decomp.



CRAY T3D (64 PEs): sub-domain splitting (upper bound & measured)



CRAY T3D (64 PEs): PVM & shared memory explicit communications

MasPar MP-1: SIMD array machine

PE-Array: 1K to 16K PEs, each 16K to 64K RAM, 32/64-bit FPU

Array Control Unit (ACU): scalar RISC CPU, 12 MIPS

Data Parallel Unit (DPU): front-end typical workstation (Dec 5000)

Peak Performance for full 16K system: 26K MIPS, 1200/550 MFLOPS.

Communications: Xnet, Router.

MasPar MP-2: SIMD array machine

PE-Array: 1K to 16K PEs (32-bit), each 16K to 64K RAM, 32/64-bit FPU

Peak Performance for full 16K system: 68K MIPS, 6300/2400 MFLOPS.

Cray T3D: MIMD scalable machine (multi-computer)

PE pool: 32 to 2048 PEs in 3D torus (DEC-21064 Alpha CPU), 64-bit FPU.

Peak Performance per PE: 150 MFLOPS

Peak Performance (total): 4.8 (32 PEs) to 300 (2048 PEs) GFLOPS.

Communications: physically distributed, logically shared memory.

ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

- Μετατροπή αρχικού κώδικα (Fortran77) σε παράλληλες εκδόσεις της Fortran90.
- Τροποποίηση κώδικα για εκμετάλλευση της εκάστοτε αρχιτεκτονικής.
- Βελτιστοποίηση τελικού κώδικα από τους compilers και τα εργαλεία κάθε περιβάλλοντος.
- Εκτέλεση παράλληλου κώδικα σε συστήματα με συμβατικές μονάδες I/O.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

✓ Μοντέλα NWF (HIRLAM) ⇨ μπορούν να επιλυθούν ικανοποιητικά σε παράλληλες μηχανές, είτε SIMD (data-parallel) είτε MIMD (work-sharing), με αρκετά καλό βαθμό κλιμάκωσης.

✓ Αποδοτικότερες υλοποιήσεις ⇨ semi-implicit Eulerian FDM, spectral (SM).
✓ Σημαντικός ρόλος του data I/O πριν και μετά την κύρια επεξεργασία.
✓ Σημαντικός ο ρόλος των σειριακών τμημάτων του κώδικα.

✓ Spectral
- ↳αποδοτική, αν και έχει μεγάλο επικοινωνιακό κόστος.
- ↳η κλιμάκωση εξαρτάται αποκλειστικά από τους parallel FFTs.

✓ Semi-implicit
- ↳αποδοτική (τουλάχιστον όσο και οι SM)
- ↳καλύτερη κλιμάκωση από τις SM.

✓ Multi-computer (Cray T3D) αρχιτεκτονικές
- ☑ Ταχύτητα επεξεργασίας σε sequential & parallel code.
- ☒ Υψηλός βαθμός κόστους προς απόδοση.

✓ Massively Parallel (MP-x) αρχιτεκτονικές
- ☑ Χαμηλός βαθμός κόστους προς απόδοση.
- ☒ Ευαισθησία σε σειριακές διεργασίες (κώδικα ή επικοινωνιών).

✓ Σχεδίαση & Ανάπτυξη Λογισμικού
- Δυσκολία υλοποίησης εν γένει (λόγω της φύσης του προβλήματος).
- Δυσκολία μεταφοράς κώδικα λόγω κακής υλοποίησης (μη-δομημένη).
- Μη αποδοτικοί compilers σε παράλληλες μηχανές (directives, overheads).
- Υψηλή εξάρτηση κώδικα από την εκάστοτε αρχιτεκτονική.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] "Atmosphere and Ocean Circulation Simulation on Massively Parallel Computers" - TR92-15 (14p), Lex Wolters

[2] "A Parallel Implementation of the HIRLAM model" - TR92-29 (15p), Lex Wolters, Gerard Cats

[3] "Finite Difference and Spectral Models for Numerical Weather Forecasting on a Massively Parallel Computer" - TR93-07 (14p), Gerard Cats, Nils Gustafsson, Lex Wolters

[4] "A Data Parallel HIRLAM Forecast Model" - TR94-47 (14p), Lex Wolters, Robert van Engelen, Gerard Cats, Nils Gustafsson, Tomas Wilhelmsson

[5] "Data-Parallel Numerical Methods in a Weather Forecast Model" - TR94-48 (12p), Lex Wolters, Gerard Cats, Nils Gustafsson, Tomas Wilhelmsson

[6] "Data-Parallel Numerical Weather Forecasting" - TR94-49 (15p), Lex Wolters, Gerard Cats, Nils Gustafsson

[7] "Dataparallel Semi-Lagrangian Numerical Weather Forecasting" - TR94-50 (7p), Lex Wolters, Gerard Cats, Nils Gustafsson, Tomas Wilhelmsson

[8] "A Comparison of Parallel Programming Paradigms and Data Distributions for a Limited Area Numerical Weather Forecast Routine" - TR95-10 (8p), Robert van Engelen, Lex Wolters

[9] "Proceedings of the Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments" - References on ETA model and SKIRON system

Informatics & Physics Depts, University of Athens (1997)

⌦ High Performance Computing Division, Computer Science Dept., Leiden Univ. (NL)

http://www.wi.leidenuniv.nl/TechRep/

⌦ SKIRON - Weather Prediction System for the Mediterranean Region

http://skiron.di.uoa.gr/