

Bestimmung der Bahnelemente von extrasolaren Planeten aufgrund von Radialgeschwindigkeitsmessdaten mittels Evolutionären Algorithmen

Magister-Studium:
Computational Intelligence

Andreas M. Chwatal

Technische Universität Wien
Institut für Computergrafik und Algorithmen
Arbeitsbereich Algorithmen und Datenstrukturen
Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Günther Raidl

Radialgeschwindigkeitsmethode

- Planet und Stern bewegen sich um gemeinsamen Schwerpunkt
- Bewegung des Sternes gibt somit die Eigenschaften der Planetenbahn wieder
- Dopplereffekt bewirkt Verschiebung der Spektrallinien des Sternes
- Messung der Radialgeschwindigkeit durch hochauflösende Spektroskopie

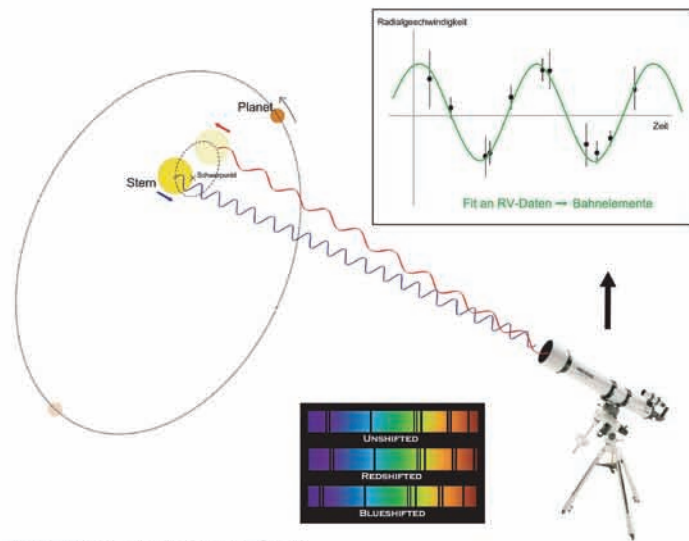


Abb. 1: Die Radialgeschwindigkeitsmethode im Überblick

Gängige Methoden der Datenreduktion

- Fourieranalyse zur Bestimmung der Umlauffrequenzen der Planeten
- Sinusfit → Keplerfit (mittels Gradientenverfahren o.ä.)
- Genetische Algorithmen in Kombination mit Levenberg-Marquard Verfahren

Nachteile Genetischer Algorithmen

- Binäre Darstellung → schlechte Konvergenzeigenschaften
- Genetische Operatoren von Standard-GAs operieren wenig problemspezifisch
- brauchbare Ergebnisse nur in Kombination mit Levenberg-Marquard Algorithmus

Evolutionstrategien

- Repräsentation mittels kontinuierlicher Parameter
- Individuen überleben jeweils nur eine Generation (verringert Superindividueffekt)
- Selbstadaptierung der Strategieparameter

Parameter

- Form der Kepler-Bahn: a, e, ω, ι ;
- i, Ω bei RV-Methode nicht bestimmt
- Planetenmassen m
- Radialgeschwindigkeitsanteil der Raumbewegung des Sternes

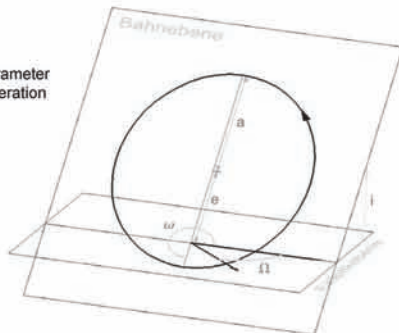


Abb. 2: Kepler-Planetenbahn in unserem Sonnensystem. Anstelle der Ekliptikebene tritt bei Exoplaneten die Tangentialebene an die Himmelskugel als Referenzebene.

Evolutionstrategie zur Planetensuche

- jedes Individuum (=Planetensystem) enthält eine vorgegebene Anzahl an Planeten
- Reihenfolge der Planeten (gegeben durch die grosse Halbachse) wird fixiert
- Hill-Stabilitätskriterium zum Ausschluss instabiler und damit unplausibler Lösungen
- Mutation (primärer Operator) wird jeweils für einen zufällig gewählten Planeten durchgeführt
- Anpassung von t nach Mutation von ω und a
- Berücksichtigung des Hill-Stabilitätskriteriums bei der Mutation
- Intermediate Recombination der Strategieparameter
- weitere Rekombination: Zusammenfügen einzelner Planeten verschiedener Individuen
- Selektion ermöglicht längeres Überleben von Individuen die durch Hill-Mutation gravierende Änderungen erfahren haben (z.B. Änderung der Position eines Planeten). Evolution des Subsystems "neuer Planet" ermöglicht effizientes Verlassen eines lokalen Minimums.

Ergebnisse

- Tests mit selbst generierten Systemen durchgeführt
 - Anwendung auf reale Daten gut untersuchter Systeme
 - Untersuchung bislang nicht publizierter Datensätzen unklarer Systeme
- Im Folgenden sind exemplarisch einige gefundene Lösungen dargestellt

55 Cancri

Quelle der Daten: [3]. Die gefundene Lösung stimmt weitestgehend mit der in [3] publizierten Lösung überein. Die Phasenplots sind optisch nicht von jenen in [3] zu unterscheiden, die Residuen der Radialgeschwindigkeit fallen etwas höher aus ($rms=9,1$ statt $rms=8,5$). Der Bereich um das lokale Optimum wurde somit eindeutig gefunden, der Fit kann durch die einmalige Anwendung eines gradientenbasierenden Verfahrens (z.B. Levenberg-Marquard) verbessert werden. Aufgrund weiterer (unveröffentlichter) Messdaten wurde mittlerweile ein vierter Planet in diesem System entdeckt.

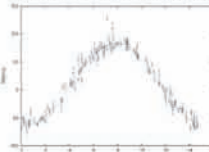


Abb. 3: Planet bei 0.115 AE

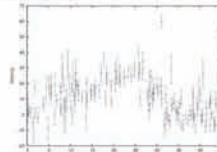


Abb. 4: Planet bei 0.24 AE

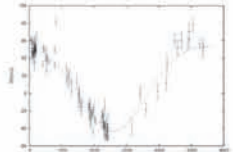


Abb. 5: Planet bei 5.9 AE

u Andromedae

Quelle der Daten: [1]. Auch in diesem Fall wurde der Bereich des globalen Optimums erreicht.

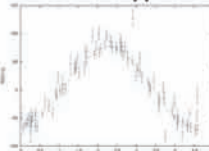


Abb. 6: Planet bei 0.059 AE

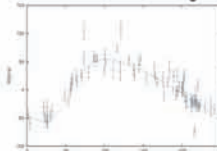


Abb. 7: Planet bei 0.829 AE

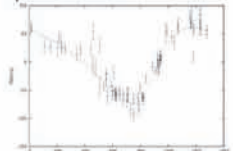


Abb. 8: Planet bei 2.5 AE

Barnards Pfeilstern

Die Beobachtungsdaten wurden von Martin Kürster (Principle Investigator des Planetensuchprogrammes bei M-Sternen mit dem ESO-Coude-Spektrometer auf La Silla) zur Verfügung gestellt. Mittels der ES wurden verbesserte 2-Planeten-Kepler-Modelle gefunden, die am plausibelsten erscheinende Lösung ist in den Abbildungen 9-11 dargestellt. Die astronomische Interpretation ist noch unklar, jedoch können durch gezielte weitere Beobachtungen bestimmte Modelle ausgeschlossen, bzw. bestätigt werden.

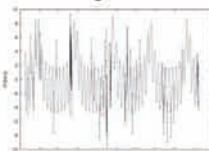


Abb. 9: Gesamtfit

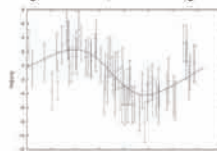


Abb. 10: Lösung Planet 1

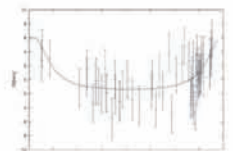


Abb. 11: Lösung Planet 2

Zusammenfassung

- ES findet in in der Praxis sehr häufig Lösung im Konvergenzradius um globales Minimum
- Verbesserte Kepler-Modelle zu potentiellen Mehrplanetensystemen gefunden
- keine vollständige Periode im Datensignal zur Erkennung der Bahnparameter notwendig
- keine Verwendung zeitaufwändiger lokaler Methoden (z.B. Levenberg-Marquard)
- vielversprechender Ansatz zur Lösung komplexerer Systeme
- effizientes Verfahren zur Datenauswertung mit hohem Automatisierungsgrad

Referenzen

- [1] R.P. Butler, G.W. Marcy, D.A. Fischer, T.M. Brown, A.R. Contos, S.G. Korzennik, P. Niesenson und R.W. Noyes. Evidence for Multiple Companions to u Andromedae, *Astrophysical Journal*, 526.916-927, Dezember 1999.
- [2] G. Laughlin und J.E. Chambers. Short-Term Dynamical Interactions among Extrasolar Planets. *The Astrophysical Journal*, 551.L109-L113, 2001
- [3] G.W. Marcy, R.P. Butler, D.A. Fischer, G. Laughlin, S.S. Vogt, G.W. Henry und D. Pourbaix. A Planet at 5 AU around 55 Cancri. *Astrophysical Journal* 581:1375-1388, Dezember 2002
- [4] K. Gozdziewski, M. Konacki und A.J. Maciejewski. Where is the Second Planet in the HD 160691 Planetary System? *Astrophysical Journal*, 594.1019-1032, September 2003.

Kontakt

Andreas M. Chwatal
Heinrich Collinstraße 8-14/9/21
A-1140 Wien
Tel: +43 (0) 664 / 541 55 27
Email: andy.chwatal@gmx.at