

大気擾乱中を通る星の光のスペックル観測処理
Reduction System of Stellar Speckle Observation
under Atmospheric Turbulence

磯部 瑋三¹⁾、平山 智啓¹⁾、馬場 直志²⁾

Syuzo ISOBE¹⁾, Tomohiro HIRAYAMA¹⁾, and Naoshi BABA²⁾

国立天文台¹⁾、北海道大学・工学部²⁾

National Astronomical Observatory¹⁾

Hokkaido University · Faculty of Engineering²⁾

Abstract

A stellar image is affected by atmospheric turbulence, and therefore it is difficult to have an angular resolution defined by a diffraction limit of the telescope primary mirror. To overcome this difficulty, there are several proposed deconvolution techniques which are shortly introduced.

We developed a reduction system called as the Labeyrie method for stellar speckle images, and show some evaluations for the system.

1. はじめに

地上から望遠鏡で天体を観測する場合、大気ゆらぎのため天体像が乱れ、主鏡の大きさによって決まる理想的な回折限界像を得ることは難しい。大気ゆらぎを克服して回折限界情報を得る技術に天体干渉法がある。天体干渉法を2つに大別すると、像面干渉法と瞳面干渉法となる。像面干渉法とはスペックル干渉法¹⁾のことで、大気による位相ゆらぎのため像面上でランダムに干渉する結果現れる斑点状模様すなわちスペックルパターンを解析し、天体像情報を得ようとする方法である。瞳面干渉法^{2,3)}は鏡面上に入射した天体からの波面を干渉させて、干渉縞パターンから波面情報を得ようとする方法である。いずれの方法においても、大気の時間的ゆらぎを凍結するように、1/30秒～1/100秒の短時間露光が行われ、また時間的コヒーレンスを確保するように狭帯域(干渉)フィルターが使われる。

現在、天体の高解像情報を得る手段として最もよく用いられているのはスペックル干渉法である。我々は、可視天体スペックルデータから天体の高解像再生の実験を行い、そのシステムの評価を行った。

2. 像再生法

天体スペックルデータの解析法には種々の方法が提案されているが、基礎となるのは、Labeyrie法である。ここでは、まずLabeyrie法¹⁾について述べ、次に実像再生が可能なShift-and-add⁴⁾法とSpeckle masking法^{5,6)}について概説する。我々が行った解析は、これらの方法に依っている。

2-1 Labeyrie法

天体の強度分布を $O(x, y)$ 、ある時点におけるPSF(Point Spread Function)を $P_n(x, y)$ とすると、観測される強度分布すなわちスペックル像 $I_n(x, y)$ は、

$$I_n(x, y) = O(x, y) * P_n(x, y) \quad (1)$$

となる。ここで、 $*$ はコンボリューションを表す。(1)式の両辺をフーリエ変換すると、

$$\tilde{I}_n(u, v) = \tilde{O}(u, v) \cdot \tilde{P}_n(u, v) \quad (2)$$

となり、両辺の絶対値の2乗の集合平均を求めると、

$$\langle |\tilde{T}_n(u, v)|^2 \rangle = |\tilde{O}(u, v)|^2 \langle |\tilde{P}_n(u, v)|^2 \rangle \quad (3)$$

が得られる。 $\tilde{T}_n(u, v)$ には大気ゆらぎによる位相乱れが、 $\tilde{P}_n(u, v)$ を通して含まれているため、これの集合平均をとると、高空間周波数領域で零となり高解像情報が失われてしまう。Labeyrieは、 $\tilde{T}_n(u, v)$ の絶対値の2乗平均をとるということで、高空間周波数情報を保持するようにした。(3)式における $\langle |\tilde{P}_n(u, v)|^2 \rangle$ は、被観測天体の近くにある点状星のデータから推定される。これによって、天体のフーリエスペクトルの振幅 $|\tilde{O}(u, v)|$ が求まる。

しかしながら、Labeyrie法では天体のフーリエスペクトルの振幅は求まるが、フーリエスペクトル位相は失われてしまうため、実像再生は可能でない。ただし、天体のフーリエスペクトルの振幅から、点状星とは異なる構造の発見に威力を発揮するため、データのスクリーニング等で非常に基本的かつ重要な方法と言える。

2-2 Shift-and-add (SAA) 法

天体スペckルデータから実像再生可能な方法のうちで、最も簡単なのがSAA法である。観測されるスペckル像には、望遠鏡による天体の回折限界像が歪められた形として個々のスペckルに現れていると考えられる。SAA法とは、撮像される多数フレームの各スペckル像中において、強度が最大となる点を見いだし、その点を像再生フレームの中心へもっていき(Shift)重ね合わせる(add)という方法である。

いま、 n 番目のスペckルフレームの最大強度位置を (α_n, β_n) とすると、SAA像 $S(x, y)$ は、

$$S(x, y) = \sum_{n=1}^N I_n(x - \alpha_n, y - \beta_n) = O(x, y) * [\sum_{n=1}^N P_n(x - \alpha_n, y - \beta_n)] \quad (4)$$

と表せる。SAA法による再生像には、シーイングに起因する大きなバックグラウンド成分が出現するが、これを適切に除去することで良好な再生像が得られる。

SAA法は高速な像再生法であるが、光子計数モードのスペckル像には適用できず、また天体強度分布中に特に強度の強い箇所がない場合、本方法の有効性は失われる。

2-3 Speckle masking 法

スペckル像から天体のフーリエスペckトル位相を回復する方法として、従来からよく知られている方法にKnox-Thompson (K-T)法⁷⁾がある。これは、スペckル像の2次の相関量から位相推定を行う方法である。これに対し、Speckle masking法は3次の相関量から位相推定を行う。このため、triple correlation法と呼ばれたり、またこれのフーリエ変換であるbispectrum解析法とも呼ばれる。K-T法と比較すると、雑音に強く望遠鏡の収差の影響を受けずに位相回復が可能であり優れている。また、開口合成型天体干渉法の場合でも位相回復できることが示され、現在も有望視されている像再生法といえる。

スペckル像の3次相関を、

$$\langle I_n(\vec{x}, \vec{x}') \rangle = \langle \int I_n(\vec{x}'') I_n(\vec{x}'' + \vec{x}) I_n(\vec{x}'' + \vec{x}') d\vec{x}'' \rangle \quad (5)$$

と表す。ここで、 $\vec{x} = (x, y)$ とした。(5)式をフーリエ変換すると、

$$\begin{aligned}
(3) \\
\langle I_n(u, v) \rangle &= \langle \tilde{I}_n(u) \tilde{I}_n(v) \tilde{I}_n(-u-v) \rangle \\
&= \tilde{O}(u) \tilde{O}(v) \tilde{O}(-u-v) \langle \tilde{P}_n(u) \tilde{P}_n(v) \tilde{P}_n(-u-v) \rangle \\
&= \tilde{O}^{(3)}(u, v) \cdot \langle \tilde{P}_n^{(3)}(u, v) \rangle
\end{aligned}
\tag{6}$$

となる。ここで、 $\tilde{O}^{(3)}(u, v)$ を天体強度分布の bispectrum と呼ぶ。 $\tilde{I}^{(3)}(u, v)$ の位相を τ_{uv} とすると、 $u+v$ における天体強度分布のフーリエ位相 ϕ_{u+v} は次の recursive アルゴリズムから求められる。

$$\exp(i\phi_{u+v}) = \text{const} \cdot \sum_{0 < v < (u+v)/2} \exp(-i(\phi_u + \phi_v - \tau_{uv}))
\tag{7}$$

本方法による位相推定の際、 $\langle \tilde{P}_n^{(3)}(u, v) \rangle$ の位相項が邪魔するように見えるが、phase closure を形成する場合を除いて、平均化操作で零となる。また、phase closure の時望遠鏡収差、大気による位相乱れの成分は打ち消し合うので、天体強度分布のフーリエスペクトル位相を正確に求めることができる。(8)

Speckle masking 法の最大の短所は、像再生のための計算時間が長いということである。これは、2次元のスペックル像に対し3次相関を求めると、4次元量となるためである。

3. 可視光スペックルデータの解析

可視光スペックル観測には、浜松ホトニクス社が開発したD-IMOS TU カメラとICCD TU カメラを用い、スペックル画像をUマティックビデオテープに記録した。ビデオテープに記録した画像は、オフライン処理でコンピュータにデジタル画像として転送される。

Labeyrie 法によるスペックルデータ解析の例を以下に示す。ここで解析したスペックルデータは、1987年6月にメキシコ国立天文台 San Pedro Mártir 2.12m 望遠鏡で得られたものである。図1(a)は ADS12973 のスペックル画像200フレームから得られたパワースペクトルである。図1(b)は ADS12973 の近くにある点状星 HR7574 のスペックル画像202フレームから求められたパワースペクトルで、これが(3)式における、 $\langle |\tilde{P}_n(u, v)|^2 \rangle$ に相当する。図1(c)は、(a)のパワースペクトルを(b)のパワースペクトルで割ったもので、これよりADS12973の $|\tilde{O}(u, v)|^2$ が求められたことになる。図1(c)のフリンジパターンの間隔と方向より、2重星ADS12973の角分離距離と方位角がわかる。

図2にはいろいろの角距離の二重星の例を示してある。星のテレビ画像を Fourier 変換し、その後100画面加算したものである。Fourier 面上で角距離に対応した Fringe がはっきりと見られる。このシステムでの限界等級は12.5等級程度である。

このように Labeyrie 法では次々と結果が得られるようになったが、他の方法の結果も、徐々に得られつつあり、大気ゆらぎの影響は徐々に克服されてきている。

references

1. A.Labeyrie, Astron. Astrophys. 6(1970)85
2. J.E.Baldwin, C.A.Hanitt, C.D.Mackay and P.J.Warner, Nature 320(1986)595
3. F.Roddiar and C.Roddiar, Opt. Commun. 60(1986)350
4. R.H.T.Bates and F.M.Cady, Opt. Commun. 32(1980)365
5. G.Weigelt, Opt. Commun. 21(1977)55
6. A.W.Lohman, G.Weigelt and B.Wirnitzer, Appl. Opt. 22(1983)4028
7. K.T.Knox and B.J.Thompson, Astrophys. J. 193(1974)L45

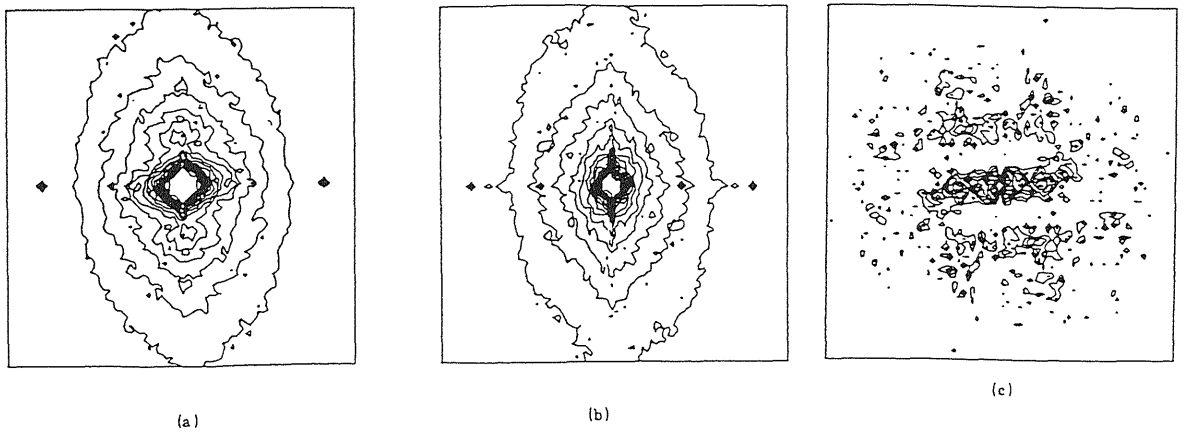


Fig 1. An example of speckle data analysis by Labeyrie method. a) Power spectrum of a binary star, ADS 12973. b) of reference single star, HR 7574. and c) of the reduced result.

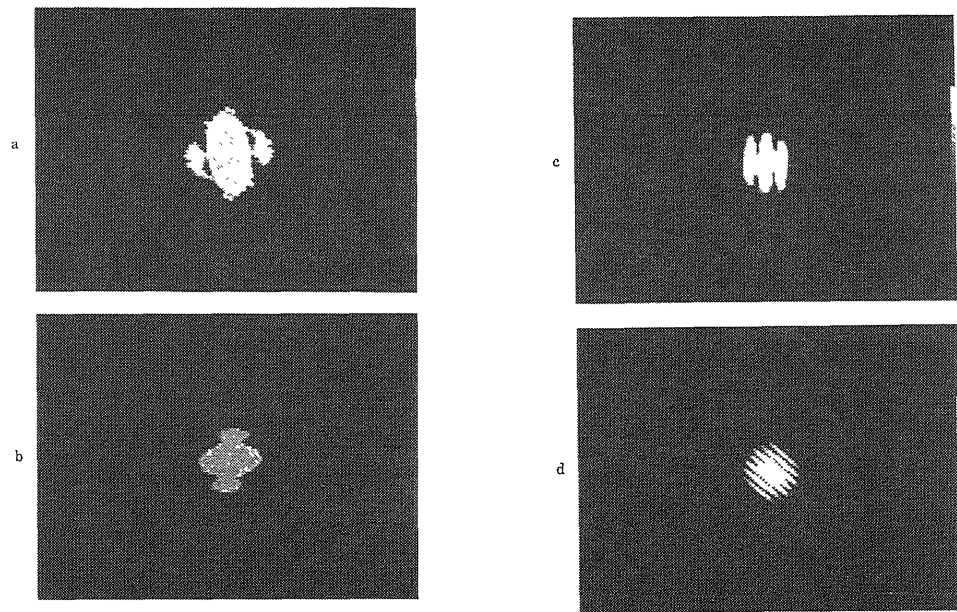


Fig. 2. Some examples of power spectrum for 4 visual binaries with angular separation and position angle of
 a. ADS 15281 ($m_1=4.7$, $m_2=5.0$, F51U), ($0''.25$, 14°),
 b. ADS 161 ($m_1=6.7$, $m_2=7.5$, G0III, F21U), ($0''.33$, 88°),
 c. ADS 16836 ($m_1=5.7$, $m_2=5.8$, K3IIIb), ($0''.53$, 88°),
 d. ADS 5871 ($m_1=7.2$, $m_2=7.2$), ($1''.2$, 317°).

references (continued)

8. F. Roddier, Opt. Commun. 60(1986)145

9. 本多康幸、「三重相関法による天体像再生」 北海道大学工学部卒業論文(1988)