

Изследвания на плазма с помощта на надлъжни изображения

Ролф Вернер

Институт за космически изследвания, БАН

Създаването и усъвършенстването на методите за формиране, възстановяване и подобряване на изображения успоредно с бурното развитие на компютърната техника дават импулси за разработка на нови изследователски методи. Едни от тях се основават на приемане, регистрация, запаметяване и възстановяване на надлъжни изображения (longitudinal images), например сканираща (в дълбочина) микроскопия. Преди да бъдат разгледани възможностите за приложение на метода на надлъжните изображения в областта на плазмените изследвания, е необходимо кратко изложение на същността и принципите им.

Както е известно от фотографията, обектът, който се снима, първо се фокусира върху филмовата равнина. При това е в сила основният закон на оптичното изображение (закон на Гаус за $f' = f$)

$$(1) \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2},$$

където f е фокусното разстояние на обектива, с който се построява изображението на обект, намиращ се на разстояние z_1 , в равнината (т. нар. „Гаусова равнина на изображение“) с дистанция z_2 зад него.

Разделителната способност на всяка оптична система е ограничена чрез дифракция. По приблизителен начин, както се изчислява разпределението на интензивността в Гаусовата равнина на един точков монохроматичен източник, може да се изчисли и разпределението му, надлъжно на оптичната ос в пространството на изображение. В приближение на Фраунхофе и при малки фазови разлики на вълнови фронтове за надлъжното разпределение на интензивността на източника, който се намира на разстояние z от обектива с фокус f и радиус r (съответстващ на входната апаратура) [1, 2], се получава

$$(2) \quad s(z', z) = \frac{\pi r_0^2}{z^2} \left[\operatorname{sinc} \left(\frac{\pi b r_0^2}{2\lambda f^2} \right) \right],$$

$$\frac{1}{f} = -\frac{z-z'}{z z'}.$$

Параметърът b в уравнение (2) е свързан с фазовите разлики, но има и друго важно значение, което ще се дискутира. Ако източникът има произволно надлъжно разпределение $o(z')$, тогава неговото изображение е

$$(3) \quad i(z) = \int_{-\infty}^{\infty} o(z') s(z', z) dz'.$$

Това уравнение с езика на фотографията може да се интерпретира по следния начин: снимайки един обект с достатъчно голям брой различни фокуси, се получава надлъжно разпределение $i(z)$ в пространството на изображението. Решаването на интегралното уравнение (3) позволява да се възстанови оригиналното надлъжно разпределение на обекта. Чрез изложеното дотук става ясно, че методът на надлъжните изображения дава възможност за възстановяване и на тримерни обекти, когато този метод се комбинира с метода на „обикновеното“ двумерно възстановяване на изображението. При това $s(z', z)$ представлява надлъжната компонента на функцията на разсейване.

Разликата с томографията се състои в това, че при нея пространствената информация се получава чрез регистрация на множество проекции на обекта при различни ъгли, а при метода на надлъжните изображения тя се получава чрез сканиране в дълбочина.

От уравнение (2) може да се направи още един много важен извод. Както е известно, функцията $\sin(x)$ приема при $\pm \pi$ първия си минимум. За b се получава

$$(4) \quad b = 2\lambda \left(\frac{f}{r_0} \right)^2,$$

една характерна величина, определяща надлъжната разделителна способност. Ако разстоянието на максимумите на два точкови източника е $|\Delta z| \geq b$, тогава изображенията им се проявяват като разделени. Съответно на теорията на Nyquist $R = \frac{1}{b}$ представлява граничната пространствена честота на една система с ограничена честотна лента. По-точното разглеждане [3] показва, че $R = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{r_0}{z} \right)^2$ и не зависи само от r_0 , а и от мястото z в пространството на изображение.

За какви изследвания може да се използва описаният метод в областта на плазмената физика? В оптично отношение плазмата представлява в по-голяма или в по-малка степен прозрачен обект. Собственото оптично излъчване би могло да се регистрира със сканираща в дълбочина камера. Затова е необходима временна стабилност на излъчване в интервал на събирането на множеството изображение $i(x, y, z)$. От възстановеното разпределение $o(x, y, z)$ могат да се направят важни изводи за разпределението на масовата концентрация на неутралните или мозирираните плазмени компоненти.

Трябва да се подчертае, че за разлика от сканиращия микроскоп тук обективът се намира на разстояние, по-голямо от f , заради което изследванията трябва да се провеждат с телескопични системи. От уравнение (4) следва, че надлъжната разделителна способност расте, т. е. относителното отворстие $f/2 r_0$ трябва да е малко, което не противоречи на условието за получаване на добра трансверзално-разделителна способност.

Ако обектът има определени свойства, може да се избегне механично сканиране в дълбочина. Изследва се примерно собствено излъчване на плазма, което се изменя в дълбочина (по оптичната ос) и в някакво направление,

перпендикулярно към нея. Тогава изображението е двумерно и може да бъде регистрирано с помощта на двумерни детектори. В случай, че излъчването е едномерно само по оптичната ос, достатъчно е изображението да се регистрира с линеен детектор. При дългофокусни обективи в Гаусовата равнина може да се позиционира входният процеп на един спектрометър. При такава постановка сканирането в дълбочина позволява едновременно да се определят не само разпределенията на някои плазмени компоненти, но и изменението на температурата като важен плазмен параметър по оптичната ос. С помощта на двумерен детектор могат да се регистрират множество спектри (успоредно към равнината на дисперсия), съответстващи на излъчващи области, намиращи се на различни разстояния от обектива.

За изложените предложения за използване метода на надлъжното изображение при плазмени изследвания са нужни по-нататъшна експериментална проверка и теоретичен анализ, за да се намерят ограничителните условия при практическото му приложение.

Литература

1. H a f e r k o r n, H. Optik, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1984
2. H u, Y., B. R. F r i e d e n. Restoration of longitudinal images. — Applied Optics 27, 1988, No 2, 414-418.
3. F r i e d e n, B. R. Longitudinal image formation. — J. Opt. Soc. Am., 56, 1966, p. 1495.

Постъпила на 18. I. 1990 г.

Plasma studies by the help of longitudinal images

Rolf Verner

(S u m m a r y)

The extensive development of longitudinal images dates since 1965. The obtained results are applied in technics. An illustrative example of this is scanner microscopy. In the exposition the fundamentals of this theory are briefly reported and the opportunities for the theory's application in plasma experiments as well are discussed. Suggestions are made for its use in the study of plasma characteristics and their change with space depth.