

射电源法拉第旋率观测效应的模拟研究*

徐 钧^{1,2†} 韩金林¹

(1 中国科学院国家天文台 北京 100012)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 由于受射电望远镜分辨率的限制, 观测视线方向上可能有多源重叠现象. 观测目标源的法拉第旋率 (rotation measure, RM) 及偏振角 (polarization angle, PA) 的测量值就会受到方向束内其它背景射电源的影响. 通过模拟研究发现, 背景射电源对目标源偏振参量测量的干扰形式与干扰源的 RM 值有关. 只运用两三个波长的偏振观测数据拟合所得的 RM 结果并不可靠. 正确测量目标源 RM 需要对多波段 Stokes 参量 Q 和 U 的测量值进行拟合.

关键词 望远镜, 辐射机制: 非热, 偏振, 星际介质: 磁场

中图分类号: P 161; **文献标识码:** A

1 引言

宇宙中大多数射电源的辐射是偏振的, 这与辐射区域的磁场有密切关系. 射电天文观测的一个重要目的是测量射电源的偏振情况. 射电偏振观测能同时得到 4 个 Stokes 参量值, 进而得出射电源的强度、偏振度、偏振方向等物理量. 通过观测偏振辐射, 可获取辐射区域磁场的信息. 当偏振辐射穿过磁等离子体时, 偏振面会发生旋转, 这就是所谓的法拉第旋转效应. 偏振方向旋转的角度 $\Delta\phi = RM\lambda^2$. 这里法拉第旋率 $RM = 0.81 \int_0^d B_{\parallel} n_e dl$, 单位是 $\text{rad} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中 B_{\parallel} 是平行于视线方向的磁场分量, 单位是 μG , n_e 是电子密度, 单位是 cm^{-3} , d 是视线方向的距离, 单位是 pc, dl 是路径微元, 单位是 pc. 因为法拉第旋转效应, 实际观测到的偏振方向就不是射电源的内禀偏振方向. 偏振方向旋转的角度与波长的平方成正比. 将不同波长的偏振角 $\phi(\lambda)$ 的观测资料利用 $\phi(\lambda) = \phi_0 + RM\lambda^2$ 公式进行拟合, 就可求得射电源的 RM 和内禀的偏振角 ϕ_0 . 通过研究大量射电源的 RM 分布, 可探测星际空间的磁场特征^[1-3]. 偏振观测成了探测银河系及星系际磁场的重要手段.

对射电源进行偏振观测时, 不同射电望远镜因为角分辨率不同对同一个射电源进行偏振观测的结果可能会不同. 高分辨率的观测可以分辨各个辐射区域的细节, 低分辨率的观测得到的是方向束内不同辐射区域信号的混合. 如果多个区域的辐射是高度偏振的,

2010-10-27 收到原稿, 2010-12-05 收到修改稿

* 国家自然科学基金 (10821061 和 10833003) 和国家科技部 973 项目 (2007CB815403) 资助

† xujun@bao.ac.cn

但偏振方向不同, 低分辨率的方向束平均效应会使不同的偏振信号相互抵消, 使总辐射的偏振特性随观测分辨率发生变化. 因此, 方向束平均效应的存在, 使得偏振观测的准确度降低, 进而影响射电源 RM 的测量.

本文进行模拟研究. 考虑在望远镜的一个观测方向束内, 因为背景射电源有偏振辐射, 检验其对所观测目标射电源偏振测量的影响, 进而讨论对目标射电源 RM 的单天线测量所需要考虑的因素.

我们的模拟工作需要考虑几个方面的问题. 首先是观测的目标. 天文研究中目标有太阳、超新星遗迹、星系和星系核喷流等面源, 也有脉冲星、射电星系核等点源. 我们在模拟时假定观测目标源为点源, 其他的背景射电源分为点源和展源两种情况. 其次是射电望远镜的方向束. 单天线和天线阵的观测方向束有圆形和椭圆形等不同情况. 考虑比较理想的情形, 我们假设望远镜正对射电源进行观测, 观测方向束呈圆形. 第三是我们所测量的 RM 值的属性. 观测到的 RM 包括射电源的本征 RM 和前景 RM, 我们这里只考虑前景 RM, 不考虑本征 RM. 第四, 射电源的偏振特征. 一般的射电源是部分偏振的. 我们用线偏振度来表示相应的偏振情况. 各种射电源的偏振度在 $0 \sim 100\%$ 之间^[4]. 低偏振度的射电源相对较多. 我们在模拟中使用 10% 左右的偏振度. 另外, 考虑到同步辐射是射电源辐射的主要机制, 射电源一般具有幂律形式的非热辐射谱, 平均谱指数不妨设为 $-0.7^{[4-5]}$. 在模拟时, 我们还假定目标源的流量强度要高于其他背景射电源总和的 3 倍以上, 且所有射电源的流量都在观测望远镜极限灵敏度之上.

2 点源模型分析

在目标射电源视线方向附近的一个观测方向束内, 可能有多个射电源. 这些射电源可能是偏振的. 本节将分析背景射电源是点源情况下对目标射电源 RM 观测的影响程度. 我们选择 L 波段观测进行模拟, 频率范围 $1.24 \sim 1.70$ GHz, 波长范围 $17.6 \sim 24.3$ cm. 利用假定的各个射电源的强度 I 、线偏振度 Π 、内禀偏振角 ϕ_0 和法拉第旋率 RM , 通过公式 $\phi(\lambda) = \phi_0 + RM\lambda^2$ 求得每个源的观测偏振角, 然后依据 $Q = \sum I_i \Pi_i \cos 2\phi_i(\lambda)$ 、 $U = \sum I_i \Pi_i \sin 2\phi_i(\lambda)$ 模拟观测到的 Stokes 参量 Q 、 U 及偏振强度 $I_L = \sqrt{Q^2 + U^2}$ 和偏振角 $\tan 2\phi = U/Q$. 下面分别就单个背景射电源和多个背景射电源两种情况分别进行讨论.

2.1 单个背景射电源模拟

一般射电源已测到 RM 在几十 $\text{rad}\cdot\text{m}^{-2}$ 到几百 $\text{rad}\cdot\text{m}^{-2}$, 也有个别到上千 $\text{rad}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[6]. 我们在模拟中设定目标射电源的 RM 为 $50 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-2}$. 方向束内的背景射电源相对较弱, 我们在模拟时考虑其 RM 从 -600 到 $+600 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-2}$ 的多种情形. 我们检验它对目标射电源的 Q 、 U 测量值随频率的影响, 以及对 RM 和 PA 测量值的影响. 模拟结果如图 1 所示. 第 1 列图表示射电源的偏振强度 (polarized intensity, PI) 及其 RM 值, 背景射电源的 PI 比目标射电源小, (a) ~ (f) 分别表示背景射电源 RM 值不同的情形. 第 2 列图是观测到的 Stokes 参量 Q 和 U 随不同频率的变化. 第 3 列图表示测到的 PI 与 Λ (这里 $\Lambda = 180\lambda^2/\pi$) 的关系. 第 4 列图表示测量的 PA 和 Λ 的关系. 图中实线是有背景射电源

时的测量值, 虚线是没有背景射电源时目标射电源有关参数的理想值. 第 4 列图中虚线是偏振角的理想值, 其斜率为 50, 即目标源 $RM = 50 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-2}$. 如果在后两列图中只取两三个频率点的测量值拟合目标射电源参数, 所得目标射电源的各种测量值可能会明显与真实值有较大偏差.

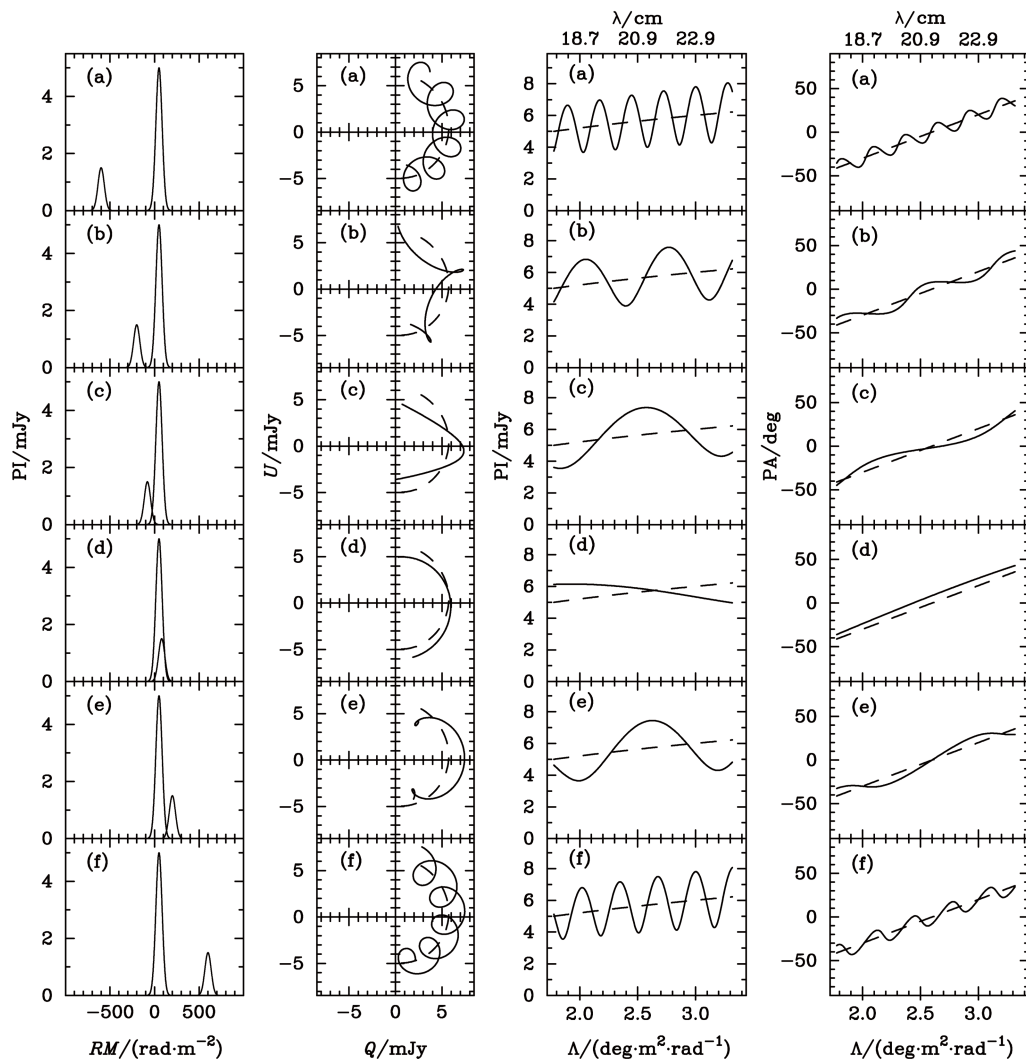


图 1 目标射电源周围只有一个背景射电源的偏振观测模拟结果

Fig. 1 Simulation results of polarization observations for an object with one background radio source in the observation beam

从图 1 中可以看出, 背景射电点源的偏振辐射对目标射电源偏振参量的测量产生了干扰. 具体干扰形式与背景源的 RM 值有关. 当背景射电源的 RM 从 -600 到 $600 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-2}$ 变化时, 所观测的 Stokes 参量 Q 和 U 、 PI 、 PA 都在目标射电源的理想值附近波动. 背景射电源的 RM 值越大, 波动随观测频率或波长的变化周期越短, 波纹越密集. 当背

景射电源 RM 值较小时, 在有限的观测波长范围, 测量值的浮动不明显, 主要是因为干扰形式变化周期太长. 因为背景射电源偏振信号的影响, 如果在给定波长范围内进行几个频率点观测, 所得目标射电源 RM 的误差会较大. 只有利用很多波段的数据才能准确拟合出目标射电源的 RM 和 PA. 当背景射电源 RM 值较大时, 在多个波动范围内如果有许多频率点的观测, 平均效果可趋近于目标射电源的理想值.

在现实观测中, 过去不可能做到在多个波段上进行偏振观测. 通常情况下只有在少数波段上观测. 如果在望远镜的一个方向束内不能区分是否有背景射电源, 它们是否有偏振辐射, 并且只有几个频率点的数据被用于拟合观测, 在受到背景射电源的影响下, 测量结果可能有很大的误差, Q 和 U 、 PI 、 PA 都会偏离目标射电源的理想值. 所以, 两三个观测波段数据不能很好地确定目标射电源 RM 和 PA 的数值. 但如果对 $Q-U$ 图中一个宽频带上的多个频段数据进行拟合, 如第 2 列图中的实线所示, 可以通过拟合分离出目标射电源的 RM 和干扰背景源的 RM, 而且这样所得的 RM 值才会非常准确. 在 $Q-U$ 图中如果目标射电源与背景射电源的 RM 值符号相反, 则弧边朝内; RM 值符号相同, 则弧边朝外. 这一规律就可以判定目标射电源与背景射电源 RM 值的符号是否相同.

2.2 多个背景射电源的情形

在观测目标射电源偏振参数时, 如果在望远镜的一个方向束内有多个背景射电源, 它们的偏振流量会叠加在一起, 影响目标射电源的观测. 我们在模拟中假设有 3 个背景射电源, 偏振参数和其它模拟条件与单个背景射电源模拟的情形类似. 图 2 是模拟结果. 因为 3 个背景射电源具有不同的 RM, 它们的偏振流量叠加的效果使目标射电源偏振测量值的浮动没有规律, 这增大了测量值与没有背景射电源时的目标射电源理想偏振参数值间的不确定性. 实际观测中, 如果有多个背景射电源情况下, 只有对很多个频率点上观测所得到的 Q 和 U 数据同时拟合多个 RM 和 PA 的值, 所得的结果可信度才比较高.

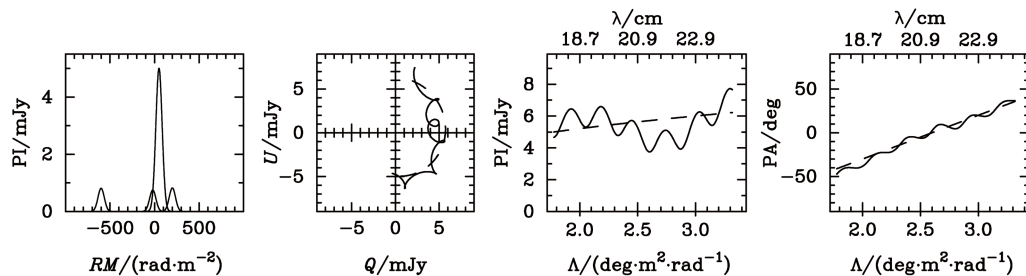


图 2 与图 1 类似, 但这里是目标射电源周围有 3 个背景射电源的偏振观测模拟结果

Fig. 2 Similar to Fig.1, but for simulation results of polarization observations for an object with three background radio sources

3 展源模型分析

在观测目标射电源时, 在射电望远镜方向束内可能有一个延展的背景射电源 (即展源). 这个展源可能是偏振的, 对目标射电源的偏振观测也会产生很大的影响. 本节通过模拟, 研究展源对偏振参数观测的影响程度. 本节的展源模型可以看成是上节的点源模型的扩展, 将连续多点源的求和转变成积分, 即 $Q = \int \int_{\text{beam}} w(r, \theta) I(r, \theta) \Pi(r, \theta) \cos 2\phi(r, \theta) (\lambda) d\sigma$, $U = \int \int_{\text{beam}} w(r, \theta) I(r, \theta) \Pi(r, \theta) \sin 2\phi(r, \theta) (\lambda) d\sigma$, 其中 $w(r, \theta)$ 是强度权重因子, $d\sigma$ 是面元. 然后通过相互关系可分别求得 PI 和 PA.

实际的展源很复杂, 流量大小、偏振方向、偏振度都表现得没有什么规律. 超新星遗迹是展源的一个很好的例子. 典型的超新星遗迹因超新星爆发时的气体强烈冲击压缩周围气体而具有环形的磁场^[7-8]. 我们在模拟时用理想的超新星遗迹作为展源, 射电辐射的偏振方向垂直于磁场, 呈发散状. 观测到的超新星遗迹的尺度通常在几十角分到几度之间, 是几个角分大小的望远镜方向束的数十倍. 因此我们在模拟中假设望远镜一个方向束内观测的展源背景是超新星遗迹的壳形区域的一小部分, 它的射电辐射强度均匀, 射电辐射的偏振方向近似呈均匀分布, 偏振度一致. 我们在模拟中采用了二维高斯型的方向束. 其他的模拟参数和射电源模拟方式与上节的点源模型相同. 模拟结果如图 3.

从图 3 中可以看出, 延展背景射电展源的偏振辐射对目标射电源的偏振测量的干扰形式也与背景射电源的 RM 值有关. 浮动值随着波长变长在变大, 主要是因为望远镜在不同频率上的方向束大小不同, 与波长成正比. 因为方向束随波长变大, 观测到的展源范围就变大, 进入方向束内的超新星遗迹辐射流量变大. 我们发现其他特征如 $Q-U$ 图弧边朝向同单个背景射电源模拟类似. 因此, 在展源背景下, 通过几个频率点对 PA 图的拟合所得目标射电源的 RM 结果误差比较大. 如果对 $Q-U$ 图中的多个频段数据进行拟合, 如第 2 列图中的实线所示, 可以通过拟合分离出目标射电源的 RM 和干扰背景源的 RM, 这样所得的 RM 值相对准确.

4 讨论和结论

点源和展源的混合模型情况更复杂. 混合的背景射电源会增大目标射电源偏振参数测量值的不确定性. 近年来, 已有人利用综合孔径的多频道 (128) 的偏振数据发展出 RM 合成^[9]方法, 来还原出一个方向束的视线方向上的各种不同 RM 的射电源, 主要的测量数据是多个射电源合成的多频率上的 Q 和 U 值. 利用单天线多通道的 RM 合成方法^[10]试验仍在进行中.

通过本文的模拟, 我们演示了因为射电望远镜的分辨率限制, 如果在一个目标射电源周围有背景射电源时, 对目标射电源的偏振参数观测产生了很大影响. 如果背景射电源为单个背景射电点源或单个背景射电展源时, 所观测的 Stokes 参量 Q 和 U 、 PI 、 PA 都在目标射电源的理想值附近波动, 具体波动形式与背景源的 RM 值有关. 如果方向束内有多背景射电源或射电点源和展源混合的情况时, 偏振观测值的波动没有规律. 如果只有两三个频率点的测量数据, 对于目标射电源的 RM 和 PA 求解有很大的不确定

性. 因此, 实际观测测量中, 正确测量目标射电源偏振及 RM 需要对多波段的 Stokes 参量 Q 和 U 进行拟合.

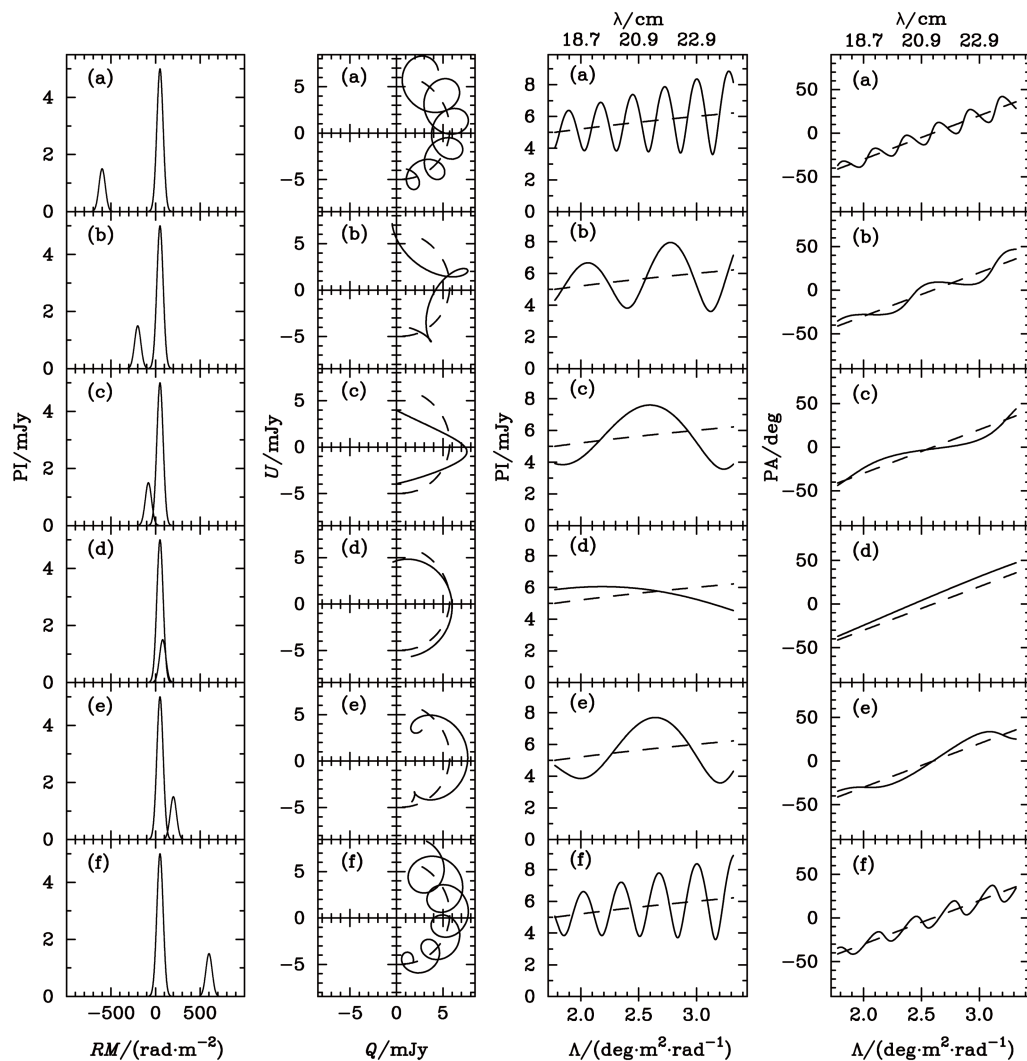


图 3 与图 1 相似, 但这里目标射电源周围的背景射电源是展源

Fig. 3 Similar to Fig.1, but for simulation results of polarization observations for an object with an extended background radio source

参 考 文 献

- [1] Kronberg P P. RPPH, 1994, 57: 325
- [2] Han J L, Wielebinski R. ChJAA, 2002, 2: 293
- [3] Widrow L M. RvMP, 2002, 74: 775
- [4] Grant J K, Taylor A R, Stil J M, et al. ApJ, 2010, 714: 1689

- [5] 尤峻汉. 天体物理中的辐射机制. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 1998: 196-197
- [6] Taylor A R, Stil J M, Sunstrum C. ApJ, 2009, 702: 1230
- [7] Xu J W, Han J L, Sun X H, et al. A&A, 2007, 470: 969
- [8] Harvey-Smith L, Gaensler B M, Kothes R, et al. ApJ, 2010, 712: 1157
- [9] Brentjens M A, de Bruyn A G. A&A, 2005, 441: 1217
- [10] Wolleben M, Landecker T L, Hovey G J, et al. AJ, 2010, 139: 1681

Simulation Studies on Faraday Rotation Measure Observations of Radio Sources

XU Jun^{1,2} HAN Jin-lin¹

(1 *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT In the beam of a radio telescope, background radio sources may appear around a target radio source. The polarized radio emission of these background radio sources will influence the polarization measurements of the target source. Through simulation studies on the cases of a single and multiple polarized background radio sources, it is found that if we only measure the polarization parameters at two or three frequencies, the derived rotation measures (RMs) and other polarization parameters of the target radio sources are not reliable. The proper approach is to measure the Stokes parameters Q and U in multiple bands, and then make RM synthesis to get all RMs of the target radio sources.

Key words telescopes, radiation mechanisms: non-thermal, polarization, ISM: magnetic fields