

АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

**Видимые движения внегалактических источников
и угловой спектр этого движения**М. В. Сажин^{1,a}, М. Н. Сиверский², Т. А. Калинина¹, Н. В. Шмелева²¹ Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ).
Россия, 119991, Москва, Университетский пр-т, д. 13.² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра небесной механики, астрометрии и гравиметрии.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.E-mail: ^a moimaitre@mail.ru

Статья поступила 03.09.2012, подписана в печать 19.12.2012.

Рассмотрены случайные видимые движения источников ICRF. Проведено компьютерное моделирование таких движений в предположении, что видимые угловые скорости источников являются случайными и некоррелированными, а позиционный угол скорости каждого источника равномерно распределен по окружности. Вычислены амплитуды векторных сферических гармоник и показано, что они имеют спектр вида «белого шума». Обсуждены опубликованные наблюдательные данные, вычислен угловой спектр данных и сделаны предварительные выводы о природе наблюдаемых мультипольных гармоник углового спектра скоростей.

Ключевые слова: внегалактические радиоисточники, небесная система координат, РСДБ.

УДК: 521.9; 520.274. PACS: 95.10.Jk.

Введение

Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) представляет собой сеть радиотелескопов, и измерения положения радиоисточников на них являются самыми высокоточными измерениями в астрометрии [1–3]. Наблюдения в оптическом диапазоне с Земли и в космосе отстают от точности РСДБ. Сеть радиотелескопов РСДБ наблюдала внегалактические радиоисточники, которые входили в список ICRF (International Celestial Reference Frame) [1, 4], в течение 30 лет с целью установления небесной системы координат. При создании ICRF использовался кинематический принцип построения систем отсчета [5], а именно считалось, что собственные движения и параллаксы этих объектов пренебрежимо малы.

Современные наблюдения показали, что это не так [6]. Квазары и другие объекты, определяющие ICRF, имеют большие угловые скорости, так что видимые линейные скорости движения источников оказываются иногда даже больше скорости света.

Существует несколько причин для объяснения таких видимых движений. Одна из причин заключается в том, что астрономы наблюдают так называемый эффект «солнечного зайчика» — проекцию радиоджета квазара (или джета из ядра активной галактики), которая движется с видимой скоростью, значительно превышающей скорость света [7, 8].

Следующая причина заключается в том, что траектория луча света от далекого квазара может не являться прямой линией, а представлять собой искривленную траекторию из-за нестационарности пространства–времени. Такая нестационарность может быть вызвана, например, космологическими гравитационными полями различной природы. Среди них могут быть как космоло-

гические гравитационные волны, так и гравитационные поля скалярной и векторной природы, которые также могут создавать ахроматический коэффициент преломления лучей света на пути от источника к наблюдателю [9–13]. Естественно, что при наблюдениях на РСДБ такой эффект приводил бы к изменению видимого положения источника на небесной сфере.

Первая причина является локальной. Два радиоисточника, разделенные несколькими угловыми градусами являются независимыми. Поэтому видимые движения (из-за эффекта Блэндфорда–Риса) в таких двух источниках являются некоррелированными. Вторая причина является глобальной. Два радиоисточника, разделенные даже несколькими десятками угловых градусов, изменяют свое положение под воздействием одной физической причины — гравитационного возмущения с длиной волны порядка космологического горизонта частиц. Поэтому их движения являются коррелированными. Хорошим индикатором таких крупномасштабных корреляций являются мультипольные гармоники с низким значением мультипольного числа l .

Одна гармоника таких видимых движений является выделенной. Это дипольная гармоника. Вклад в самую низкую мультипольную гармонику — дипольную — дает ускорение по направлению к центру нашей Галактики [14–18].

Добавим также, что искривлять траекторию луча света могут не только космологические гравитационные волны, но также и гравитационные поля скалярной и векторной природы. Поэтому одной из возможных причин видимого перемещения источников ICRF может быть слабое микролинзирование этих источников звездами и темными телами нашей Галактики [19–22]. При этом движения радиоисточников, разнесенных на боль-

шие углы, также не будут коррелированы, поскольку значимое влияние эффекта слабого микролинзирования происходит на угловых расстояниях порядка ста размеров конуса Эйнштейна.

Несмотря на то что в случае, когда причина видимых движений — эффект Блэндфорда–Риса и угловые скорости источников ICRF являются некоррелированными, амплитуды мультипольных гармоник отличны от нуля. Спектр таких угловых движений представляет собой спектр типа «белого шума» в радиоэлектронике [23].

В настоящей работе мы провели численное моделирование спектра углового движения внегалактических радиоисточников, движения в которых происходит от внутренних причин, а также работали с наблюдениями РСДБ, подготовленными к такой обработке О.Титовым, который любезно дал нам свои преобразованные данные. Эти же данные О. Титов использовал для того, чтобы найти ускорение нашей Солнечной системы, направленное к центру Галактики [24]. Данные О. Титова были проанализированы вплоть до мультипольной гармоники $l = 6$.

1. Численное моделирование

Разложение функций, заданных на сфере, нужно проводить по функциям, инвариантным относительно вращений. Это обобщенные сферические функции или векторные сферические гармоники. Существует несколько наборов векторных сферических гармоник. Они преобразуются друг в друга линейными преобразованиями. Здесь мы будем рассматривать только один набор векторных гармоник, гармоники вида $\mathbf{Y}_{lm}^E(\varphi, \theta)$, $\mathbf{Y}_{lm}^M(\varphi, \theta)$. Физический смысл этих гармоник и их формальное определение обсуждаются в статьях [13, 23]. Здесь стоит подчеркнуть, что скалярные возмущения гравитационного поля возбуждают только E -гармоники видимого движения внегалактических источников, а космологические гравитационные волны возбуждают как E -, так и M -моды видимых движений.

Вначале посвятим несколько слов схеме пикселизации HEALPix, которую мы использовали для вычислений [25]. HEALPix — аббревиатура от слов (the Hierarchical Equal Area iso-Latitude Pixelization) является схемой разбиения сферы на множество пикселей. Существует шесть основных разбиений сферы на такие пиксели. Такое разбиение характеризуется двумя параметрами: N_θ — число поясов от северного до южного полюса, N_ϕ — число разбиений по меридиану. Полное число основных пикселей $N_{bp} = N_\theta \cdot N_\phi$, а площадь одного базового пикселя составляет $\Omega_p = 4\pi/N_\theta/N_\phi$. Метод заключается в разделении сферы на криволинейные четырехугольники, которые формируют базовые пиксели на поверхности. При этом на сфере существуют один северный и один южный пояса пикселей, которые покрывают соответствующие полюса. Остальная поверхность сферы покрывается экваториальными поясами пикселей, число которых есть $N_\theta - 2$. В системе HEALPix выбрано разбиение сферы на $N_\theta = 3$, $N_\phi = 4$ пикселей.

Поэтому в данной схеме используется разбиение сферы на 12 базовых пикселей. Каждый из базовых пикселей делится на n^2 частей равной площади,

здесь n — число разбиений их сторон, однако для обеспечения иерархичного хранения большого объема данных выбирают $n = 2^k$, k — неотрицательное целое число. Под иерархичностью понимается такая структура хранения данных, которая обеспечивает близость элементов в дереве структуры базы данных при их близости в конфигурационном пространстве (в нашем случае на сфере). Кроме того, иерархичность позволяет корректно переходить к меньшему разрешению, что актуально в случае больших массивов информации, обработка которых непосредственно может быть весьма затруднительна. Величину n обычно обозначают как N_{side} . Всего же пикселей на сфере $12 \cdot N_{\text{side}}^2$. Угловой размер каждого пикселя, полученного при разбиении сферы с параметром k , равен

$$\theta_p = \sqrt{\Omega_p} = \sqrt{\frac{\pi}{3}} \frac{1}{N_{\text{side}}}.$$

Эта удобная схема позволяет сравнивать карты с различным разрешением единым способом. Это особенно важно при сравнении карт небесной сферы, сделанных на различных частотах. Поэтому данная схема является стандартной схемой в исследованиях по анизотропии реликтового излучения. Мы также применяем эту схему, так как для нее разработаны хорошие математические библиотеки. Более подробно о схеме пикселизации и ее свойствах можно прочитать в процитированной статье К. Горского.

Рассмотрим несколько примеров векторных гармоник. Вначале рассмотрим векторные сферические функции $\mathbf{Y}_{1,0}^{E,M}$ с использованием схемы пикселизации HEALPix. На рис. 1 показано распределение поля скоростей на сфере, если это поле описывается гармоникой $\mathbf{Y}_{1,0}^E$. Видно, что поле скоростей формирует линии «стока» из северного полюса в южный. Если мы посмотрим на рис. 2, на котором изображается гармоника $\mathbf{Y}_{1,0}^M$, то увидим, что поле скоростей на сфере является полем вращения.

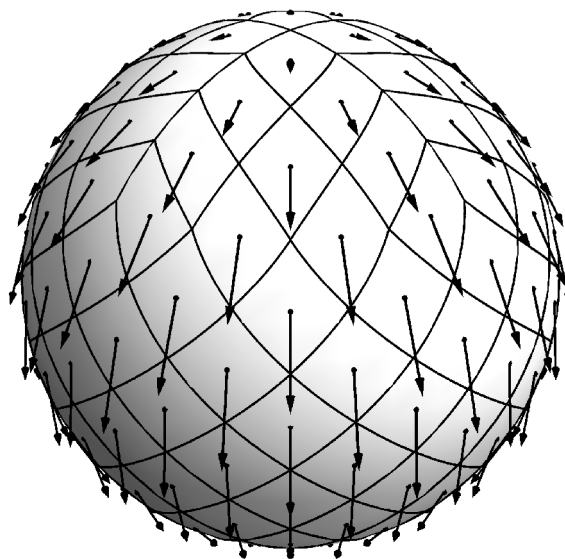


Рис. 1. Распределение векторного поля по сфере. В качестве поля выбрана дипольная гармоника электрического типа $l = 1$, $m = 0$

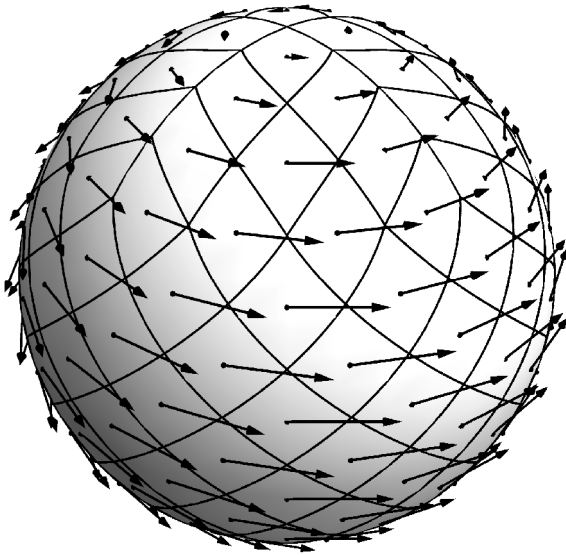


Рис. 2. Распределение векторного поля по сфере. В качестве поля выбрана дипольная гармоника магнитного типа $l = 1, m = 0$

Далее мы анализируем более сложное распределение поля скоростей. Скорость состоит из суммы двух членов. Первый — регулярная часть поля, которая представлена сферической векторной гармоникой $Y_{1,0}^E$. Второй член в этой сумме представляет собой случайное поле скоростей, обладающее равномерным распределением. Отношение квадрата амплитуды регулярного поля к дисперсии случайного поля составляет 0.2. Угловой спектр такого случайного поля скоростей, т.е. вращательно-инвариантные амплитуды C_l^E , показан на рис. 3. Было построено 500 реализаций поля случайных скоростей на сфере. Значения поля скоростей каждой реализации сворачивались с векторными сферическими гармониками, вычислялись вращательно-инвариантные амплитуды для вклада каждой гармоники в это поле и строился угловой спектр. Спектр представлен в виде диаграмм «ящик с усами». Значения амплитуды с мультипольным числом l для каждой реализации поля скоростей лежит внутри «ящика с усами». Черная жирная горизонтальная линия внутри «ящика» — медианное значение амплитуды. Прямоугольник, формирующий «ящик» вокруг медианного значения, содержит все значения величины амплитуды на уровне вероятности 0.7. «Усы», проложенные вверх и вниз от «ящика», — значения величины амплитуды мультипольной гармоники на уровне вероятности 0.95. Необходимо отметить, что несмотря на то что в регулярном распределении поля на сфере отлична от нуля только гармоника $Y_{1,0}^E(\varphi, \theta)$, в спектре присутствуют все гармоники, вплоть до $l_{\max} = 6$. Максимальная гармоника была выбрана так, чтобы число пикселей было больше числа степеней свободы векторных гармоник.

На рис. 4 показано распределение действительной части векторного поля, которое является реализацией стохастического векторного поля. На рис. 5, 6 показаны спектры мод E и M такого векторного поля. Из рисунков видно, что спектр, полученный в результате математического моделирования, хорошо соответствует теоретическому спектру, аналитически полученному в [23].

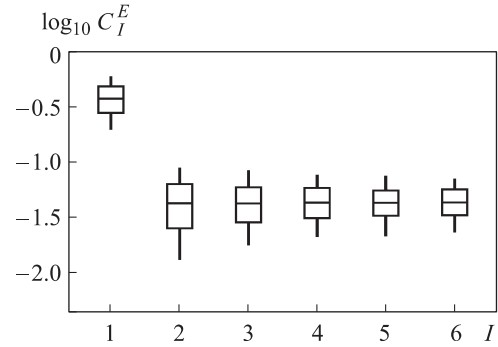


Рис. 3. Угловой спектр величины C_l^E распределения векторного поля по сфере, сформированного суммой гармоники $Y_{1,0}^E$ и случайного векторного поля с равномерным распределением. Спектр показан в логарифмическом масштабе

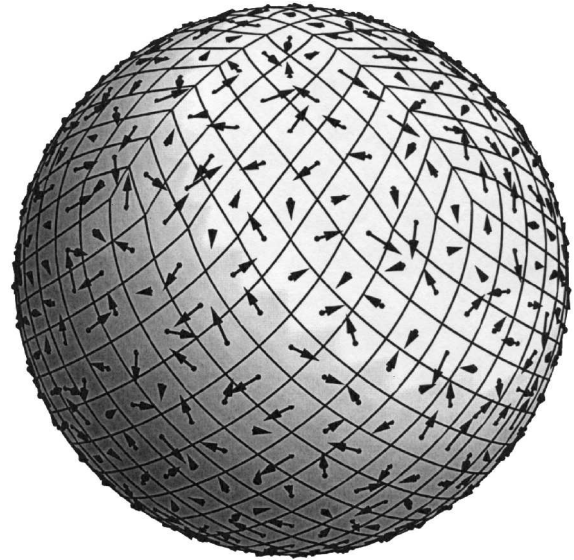


Рис. 4. Распределение векторного поля по сфере. В качестве поля выбрана стохастическое распределение векторов по сфере. Показано только распределение действительной части векторного поля

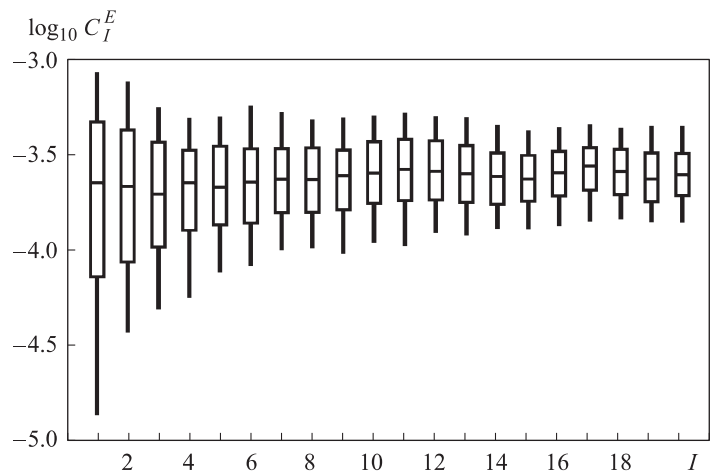


Рис. 5. Угловой спектр величины C_l^E распределения стохастического векторного поля по сфере. Спектр показан в логарифмическом масштабе

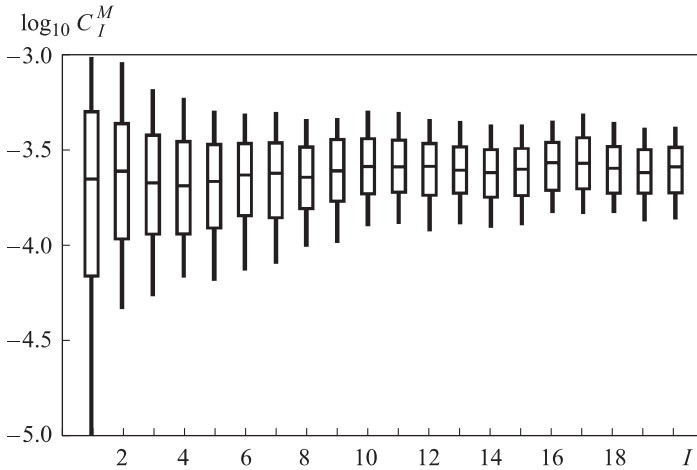


Рис. 6. Угловой спектр величины C_I^M распределения стохастического векторного поля по сфере. Спектр показан в логарифмическом масштабе

2. Анализ наблюдательных данных

Мы проанализировали видимые движения внегалактических источников из списка ICRF, который был любезно предоставлен О. Титовым. Данные включали в себя каталог видимых движений 555 источников.

При разбиении небесной сферы на пиксели мы взяли $N_{\text{side}} = 4$, т. е. провели разбиение небесной сферы на 192 пиксела. Число пустых пикселов, в которые не попадает ни один источник, составляет 18. Размер пиксела при этом равен 14.7° . Вектор, описывающий поле видимых движений в каждом пикселе, вычисляется как средневзвешенное собственных движений источников, которые попали внутрь этого пиксела. Поскольку данные вычисления носят методический характер, мы не учитывали статистический вес каждого источника, а следовательно, не вычисляли вес каждого пиксела. Это, конечно, изменит результаты окончательных расчетов, поскольку данные видимых движений обладают сильной неравномерностью.

Были вычислены амплитуды E и M векторных гармоник вплоть до мультипольного числа $l_{\text{max}} = 6$, что соответствует угловому масштабу примерно 25° . На рис. 7, 8 в логарифмическом масштабе показаны полученные спектры. Из рисунков видно, что значимо выделяется дипольная компонента спектра C_I^E , которая описывает ускорение к центру нашей Галактики. Амплитуды остальных мультипольных гармоник значительно (в 2–3 раза) меньше амплитуды дипольной гармоники. Распределение по мультипольным числам соответствует распределению типа «белый шум». Это означает, что данные гармоники либо являются проявлением ошибок измерений, либо эффектом Блэндфорда–Риса. Если при росте точности измерений спектр мультипольных гармоник не изменится, это также может означать, что темная энергия в нашей Вселенной — проявление новой фундаментальной постоянной — лямбда-члена.

Несколько слов необходимо написать о магнитных модах. На рис. 8 видно, что дипольная магнитная мода превосходит вклад остальных мультиполей в несколько раз. Дипольная магнитная мода показывает общее вращение, в частности вращение нашей Вселенной как целого. Однако в данном случае нельзя ассоциировать

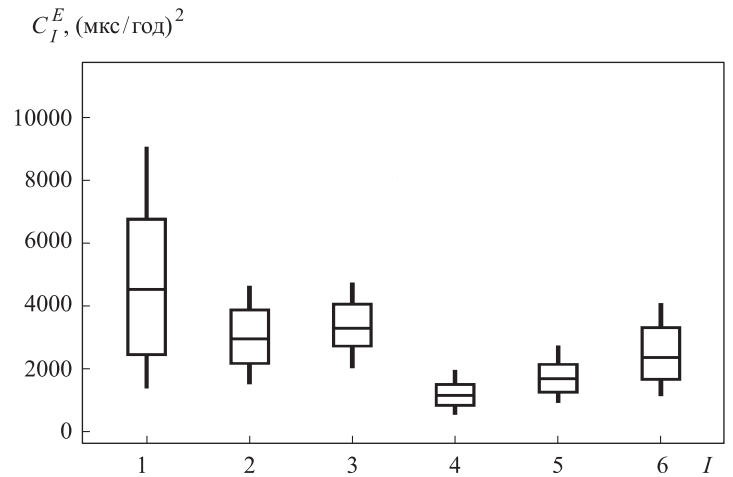


Рис. 7. Угловой спектр величины C_I^E распределения видимых движений внегалактических источников из списка ICRF. Спектр показан в логарифмическом масштабе

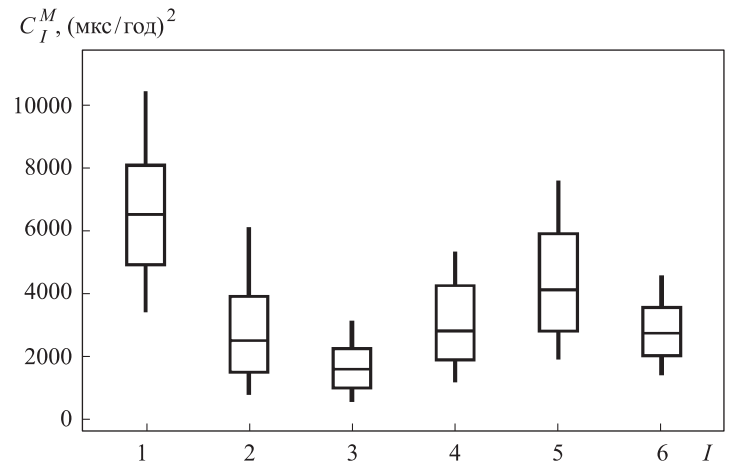


Рис. 8. Угловой спектр величины C_I^M распределения видимых движений внегалактических источников из списка ICRF. Спектр показан в логарифмическом масштабе

дипольную магнитную моду с вращением Вселенной как целого. Здесь необходимо помнить, что положения и видимые движения внегалактических источников находятся при условии «no net rotation», которое накладывается при решении систем линейных уравнений [2]. Вычеркивание нескольких источников из списка приводит к тому, что система теряет свойство «no net rotation», что генерирует дипольную гармонику магнитной моды.

Дипольную гармонику магнитной моды можно редуцировать до нуля, если совершить вращение, которое не влияет на остальные гармоники.

Анализ карты видимых движений источников из списка ICRF показал, что, несмотря на то что мультипольные гармоники таких движений выделяются на низком уровне достоверности, тем не менее присутствуют гармоники как электрического, так и магнитного типа. Резко выделяется дипольная гармоника, которая связана с динамическими эффектами в нашей Галактике. Величина этой гармоники несколько больше, чем та, что предсказывается теоретическими оценками. Она возникает как следствие ускорения солнечной системы

по направлению к центру Галактики. Ее величина зависит от распределения полной массы (включая темную материю) в нашей Галактике. Пока ее величина определена с большими случайными ошибками.

Поэтому из полученных измерений преждевременно делать достоверный вывод о распределении темной массы в нашей Галактике.

На основании анализа амплитуд более высоких мультиполей ($1 < l \leq 6$) также нельзя сделать определенных выводов, поскольку ошибки измерений сравнимы с величиной амплитуд мультипольных коэффициентов.

Заключение

Был проведен мультипольный анализ карты видимых движений источников из списка ICRF. Этот анализ показал, что гармоники выделяются на низком уровне достоверности, но тем не менее присутствуют гармоники как электрического, так и магнитного типа. Резко выделяется дипольная гармоника, которая связана с динамическими эффектами в нашей Галактике. Величина этой гармоники примерно в полтора раза больше, чем та, что предсказывается теоретическими оценками. Однако измерительные ошибки не позволяют сделать достоверный вывод о распределении темной массы в нашей Галактике.

Гармоники с более высоким мультипольным числом ($1 < l \leq 6$) обладают следующими свойствами: амплитуды электрических и магнитных типов гармоник не равны друг другу, но различия не являются статистически значимыми. По пяти гармоникам невозможно достоверно установить вид спектра. Поэтому нельзя сделать выбор между воздействием космологических гравитационных волн и стохастическими внутренними движениями в радиоисточниках. Можно сделать предварительные выводы о природе видимых движений радиоисточников: это внутренние нестационарные движения в радиоисточниках. Для более детального вывода следует собрать большее количество материала, который начал накапливаться с 2010 г. в виде наблюдений источников списка ICRF-2. Когда количество наблюдаемых источников превысит 1500, а количество наблюдений каждого источника будет более 10 наблюдений, можно будет в 3 раза уменьшить ошибки определения параметров и, следовательно, сделать достоверные выводы о различии электрических и магнитных гармоник видимых движений.

Авторы благодарны доктору физ.-мат. наук О. А. Титову за предоставление данных о видимых скоростях внегалактических источников из списка ICRF и про-

фессору В. Е. Жарову за многочисленные полезные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 10-02-00961а) и Минобрнауки РФ (проект № 14.740.11.0085).

Список литературы

1. *Жаров В.Е.* Сферическая астрономия. Фрязино, 2006.
2. *Жаров В.Е.* Основы радиоастрометрии. М., 2011.
3. *Kopeikin S., Efroimsky M., Kaplan G.* Relativistic Celestial Mechanics of the Solar System. Wiley-VCH, 2011.
4. *Ma C., Arias E.F., Eubanks T.M.* et al. // *Astron. J.* 1998. **116**. P. 516.
5. *Ковалевский Ж.* Современная астрометрия. Фрязино, 2004.
6. *MacMillan D.C.* // The 10th Anniversary of the VLBI ASP Conference series / Ed. by J.D. Romney, M. J. Reid. 2003.
7. *Blandford R.D., Königl A.* // *Astrophys. J.* 1979. **232**. P. 34.
8. *Begelman M.C., Blandford R.D., Rees M.J.* // *Rev. Mod. Phys.* 1984. **56**. P. 255.
9. *Sazhin M.V., Blair D.G., Jones S.K.* Gravitational Radiation Detection by VLBI Radio Astronomy // Marcel Grossman Proc. Perth. 1990. P. 1829.
10. *Pyne T., Gwinn C.R., Birkinshaw M.* et al. // *Astrophys. J.* 1996. **465**. P. 566.
11. *Titov O.* Proper motion of radio sources. e-ArXive: 0804.1403, 2008.
12. *Titov O.* Proper motion of radio sources. e-ArXive: 0805.1099, 2008.
13. *Маракулин А.О., Сажина О.С., Сажин М.В.* // *ЖЭТФ.* 2012. **42**. С. 95.
14. *Gwinn C.R., Eubanks T.M., Pyne T.* et al. // *Astron. J.* 1997. **485**. P. 87.
15. *Sovers O.J., Fanselow J.L., Jacobs C.S.* // *Rev. Mod. Phys.* 1998. **70**. P. 1393.
16. *Kovalevsky J.* // *Astron. Astrophys.* 2003. **404**. P. 743.
17. *Klioner S.* // *Astron. Astrophys.* 2003. **125**. P. 1580.
18. *Kopeikin S.M., Makarov V.V.* // *Astron. J.* 2006. **131**. P. 1471.
19. *Сажин М.В.* // Письма в Астрон. журн. 1996. **22**. С. 643.
20. *Sazhin M.V., Zharov V.E., Volynkin A.V., Kalinina T.A.* // *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 1998. **300**. P. 287.
21. *Sazhin M.V., Zharov V.E., Kalinina T.A.* // *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 2001. **323**. С.952.
22. *Сажин М.В., Жаров В.Е., Куимов К.В.* и др. // Космический астрометрический эксперимент ОЗИРИС / Под ред. Л. В. Рыхловой, К. В. Куимова. Фрязино, 2005. Гл. 3.
23. *Сажин М.В., Сажина О.С., Маракулин А.О.* // *Астрон. журн.* 2011. **88**. С. 1027.
24. *Titov O., Lambert S.B., Gontier A.-M.* // VLBI measurement of the secular aberration drift. arXiv:1009.3698v4. 12 Apr 2011.
25. *Gorski K.M., Hivon E., Banday A.J.* et al. // *Astrophys. J.* 2005. **622**. P. 759.

Apparent motion of extragalactic sources and its angular spectrum**M. V. Sazhin**^{1,a}, **M. N. Siversky**², **T. A. Kalinina**¹, **N. V. Shmeleva**²¹*P. K. Sternberg State Institute of Astronomy, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119191, Russia.*²*Department of Celestial Mechanics, Astrometry and Gravimetry, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail:* ^a*moimaitre@mail.ru.*

Apparent motion of extragalactic ICRF sources are considered. We made computer simulation in suggestion that apparent motions are stochastic and uncorrelated, and position angle of each source velocity has uniform distribution. We calculated harmonic vectorial amplitudes and demonstrate that the spectrum is «white noise» spectrum. We discuss the published observational data, obtain spectrum of observational apparent motions.

Keywords: extragalactic radio sources, celestial coordinate system, VLBI.

PACS: 95.10.Jk.

*Received 3 September 2012.*English version: *Moscow University Physics Bulletin* 2(2013).**Сведения об авторах**

1. Сажин Михаил Васильевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-50-06, e-mail: moimaitre@mail.ru.
2. Сиверский Михаил Николаевич — студент; тел.: (495) 939-50-06, e-mail: siverskiy.mihail@physics.msu.ru.
3. Калинина Татьяна Александровна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-19-70, e-mail: tanka_astro@bk.ru.
4. Шмелева Наталья Викторовна — студентка; тел.: (495) 939-50-06, e-mail: shmeleva@f4c.ru.