

АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

**Программа для расчета эффекта Доплера
в спектрах космических радиисточников Dopplex**

П. Р. Запевалин,^а Т. А. Сячина,^б А. Р. Шайхутдинов, В. И. Костенко
Астрокосмический центр Физического института имени П. Н. Лебедева РАН.
Россия, 117997, Москва, ГСП-7, Профсоюзная, 84/32.

Поступила в редакцию 08.11.2019, после доработки 23.12.2019, принята к публикации 30.12.2019.

Представлен программный продукт Dopplex, используемый для расчета эффекта Доплера в спектрах космических радиисточников. Приводятся теоретические основы расчета астрономического эффекта Доплера. Представлены результаты сравнения расчетов с другими программами.

Ключевые слова: эффект Доплера, спектральная линия, локальный стандарт покоя.
УДК: 520.88. **PACS:** 95.90.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с успешной работой международной орбитальной астрофизической обсерватории «Радио-Астрон» (проект «Спектр-Р»), а также созданием новой обсерватории «Миллиметрон» (проект «Спектр-М»), предназначенной для исследования различных объектов Вселенной в миллиметровом и инфракрасном диапазоне длин волн, возникает задача корректной обработки спектров различных источников излучения. Трудности отождествления линий в спектрах неизбежно обусловлены сдвигом спектральных линий за счет эффекта Доплера. На сегодняшний день существует несколько онлайн-ресурсов и программ обработки астрономических данных, в которых предусмотрен расчет этого эффекта. Авторами создано новое программное обеспечение Dopplex, сочетающее в себе точные расчеты и удобство пользования.

Dopplex предназначен для решения двух задач: прямой и обратной. Прямая задача заключается в нахождении частоты, на которую необходимо настроить приемник перед проведением наблюдений. Обратная задача заключается в нахождении радиальной скорости источника относительно локального стандарта покоя (ЛСП) по наблюдаемым смещениям частот спектральных линий, определенных стандартными значениями, приводимыми в документах Международного бюро мер и весов. В рамках настоящей работы решение прямой и обратной задач будет просто называться расчетом эффекта Доплера. Программа позволяет выбрать в качестве наблюдателя как наземную станцию (при этом дополнительно рассчитываются координаты источника в горизонтальной системе координат), так и космический аппарат (КА). Также можно произвести вычисления для геоцентра.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Значение скорости барицентра Солнечной системы (БСС) относительно ЛСП принимается равным 20 ± 0.5 км/с в направлении $+18h$, $+30^\circ$

в экваториальной системе координат на эпоху B1900.0. Это так называемое кинематическое определение ЛСП, основанное на анализе движения звезд в окрестности Солнца. В Dopplex для расчетов используются значения скорости БСС на эпоху J2000. В экваториальной системе координат они принимаются равными (0.289958364187889; -17.3172660702676 ; 10.0014109003979) [1].

В радиоастрономии эффект Доплера в нерелятивистском случае выражается с помощью формулы

$$U_{\text{obs}}^{\text{src}} = -\frac{(\nu - \nu_0)c}{\nu_0}.$$

Здесь $U_{\text{obs}}^{\text{src}}$ — радиальная компонента скорости источника относительно наблюдателя, ν_0 — несмещенная (лабораторная) частота спектральной линии, ν — смещенная (наблюдаемая) частота спектральной линии, c — скорость света в вакууме. Здесь и далее все скорости задаются относительно невращающейся небесной системы координат (НСК).

Таким образом, зная $U_{\text{obs}}^{\text{src}}$, можно найти наблюдаемую частоту спектральной линии ν . Обратная задача заключается в том, что если есть наблюдаемая частота спектральной линии, то можно найти радиальную компоненту скорости источника относительно наблюдателя $U_{\text{obs}}^{\text{src}}$.

**2. РАСЧЕТ РАДИАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ
ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ**

Радиальную компоненту скорости источника относительно наблюдателя можно рассчитать по следующей формуле:

$$U_{\text{obs}}^{\text{src}} = \mathbf{V}_{\text{obs}}^{\text{src}} \mathbf{n} = \left(\mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{src}} - \mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{obs}} \right) \mathbf{n} = U_{\text{lsr}}^{\text{src}} - \mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{obs}} \mathbf{n}, \quad (1)$$

где $\mathbf{V}_{\text{obs}}^{\text{src}}$ — вектор скорости источника относительно наблюдателя,

\mathbf{n} — единичный вектор направления от наблюдателя к источнику,

$\mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{src}}$ — скорость источника относительно ЛСП,

$\mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{obs}}$ — скорость наблюдателя относительно ЛСП,

$U_{\text{lsr}}^{\text{src}}$ — радиальная компонента скорости источника относительно ЛСП.

Для расчета эффекта Доплера всегда необходимо рассчитать векторы \mathbf{n} и $\mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{obs}}$.

^а E-mail: zapevalin@asc.rssi.ru

^б E-mail: syachina@asc.rssi.ru

Табл. 1. Вклад различных эффектов в точность расчета скорости на интервале времени 1900–2100 гг. «Р» в графе «интервал времени» означает, что ошибка имеет периодический характер

Эффект	Значение	Интервал времени	Макс. ошибка, м/с
Собственное движение телескопов	< 1 м/год	200 лет	10^{-5}
Приливные деформации земной коры	< 1 м	Р	10^{-9}
Движение полюса Земли	< 1''	Р	10^{-6}
Разница UT1–UTC	< 1 с	Р	10^{-7}
Параллакс	< 1''	Р	10^{-6}
Собственное движение источника	< 1''/год	200 лет	0.3
Суточная абберация	< 0.3''	Р	10^{-7}
Годичная абберация	< 20''	Р	0.3
Отклонение света в гравитационном поле Солнца	< 5 μ as	Р	10^{-17}

В прямой задаче $U_{\text{lsr}}^{\text{src}}$ считается известной и берется из каталога. В обратной задаче она вычисляется по формуле $U_{\text{lsr}}^{\text{src}} = U_{\text{obs}}^{\text{src}} + \mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{obs}} \mathbf{n} = -\frac{(\nu - \nu_0)c}{\nu_0} + \mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{obs}} \mathbf{n}$, по наблюдаемой частоте линии ν .

Рассмотрим подробнее, как рассчитать $\mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{obs}}$ и \mathbf{n} .

Скорость наблюдателя относительно ЛСП определяется по следующей формуле:

$$\mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{obs}} = \mathbf{V}_{\text{gc}}^{\text{obs}} + \mathbf{V}_{\text{ssb}}^{\text{gc}} + \mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{ssb}}.$$

Здесь $\mathbf{V}_{\text{gc}}^{\text{obs}}$ — скорость наблюдателя относительно геоцентра, $\mathbf{V}_{\text{ssb}}^{\text{gc}}$ — скорость геоцентра относительно БСС, $\mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{ssb}}$ — скорость БСС относительно ЛСП.

Если в качестве наблюдателя берется наземный радиотелескоп, его скорость относительно геоцентра в системе ICRF можно рассчитать следующим образом:

$$\mathbf{V}_{\text{gc}}^{\text{obs}} = C \boldsymbol{\Omega}_{\oplus} \mathbf{R}_{\oplus}. \quad (2)$$

Здесь $\boldsymbol{\Omega}_{\oplus}$ — вектор угловой скорости вращения Земли, \mathbf{R}_{\oplus} — координаты телескопа в земной системе координат (ЗСК), C — матрица поворота от ЗСК к НСК.

В Dopplex не учитываются собственное движение телескопов и изменение их координат из-за приливов, потому что вклад этих эффектов крайне мал.

Матрица поворота C включает в себя прецессию, нутацию, собственное вращение Земли и движение полюсов. Для расчета этой матрицы используется библиотека Международного астрономического союза SOFA [2], в которой прецессия и нутация рассчитывается по теории МНВ2000 [3]. Движение полюса, а также разница между шкалами времени UT1 и UTC не учитываются, так как пренебрежение этими эффектами не приводит к потере точности. По этой же причине не учитывается и неравномерность вращения Земли, следовательно, угловая скорость вращения Земли принимается равной постоянному значению Ω ($7.292115 \cdot 10^{-5}$ рад/с).

Влияние всех эффектов, которые не учитываются в расчетах, описано в табл. 1.

В случае если наблюдателем является космический радиотелескоп, то его скорость относительно GCRF $\mathbf{V}_{\text{gc}}^{\text{obs}}$ рассчитывается сразу из эфемерид. Dopplex использует международный формат эфемерид CCSDS OEM. Эфемериды рассчитываются небесной геоцентрической системе координат или в экваториальной системе эпохи J2000.0.

Вектор единичного направления на источник \mathbf{n} рассчитывается из данных каталога, при этом учитывается только годичная абберация. Ошибка, которая получается из-за пренебрежения остальными эффектами, меньше, чем ошибка определения ЛСП. Что касается вековой абберации (связанной с движением БСС), то она имеет постоянную величину и в расчетах не учитывается [4].

Вектор $\mathbf{V}_{\text{ssb}}^{\text{gc}}$ рассчитывается с помощью библиотеки SOFA, где используется теория VSOP2000 [5]. Точность на интервале 1900–2100 гг. — не хуже 5 мм/с.

3. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТОВ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА СКОРОСТИ

Оценка точности расчета $U_{\text{obs}}^{\text{src}}$ основана на формуле (1). Максимальное возможное значение $|\mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{obs}}|$ составляет 50 км/с. Максимальная допустимая ошибка, связанная с неточностью расчета \mathbf{n} :

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{V}_{\text{max}}^{(n)} &= 50 \text{ км/с} \cdot (1 - \cos(\alpha)) = \\ &= 100 \text{ км/с} \cdot \sin^2(\alpha/2) \underset{\alpha \rightarrow 0}{\approx} 25 \cdot \alpha^2 \text{ км/с}, \quad (3) \end{aligned}$$

где α — максимальный угол между истинным и рассчитанным направлением на источник. Для оценки влияния точности расчета $\mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{obs}}$ будем полагать, что $\mathbf{V}_{\text{ssb}}^{\text{gc}}$ и $\mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{ssb}}$ считаются точно, т.к. ошибка $\mathbf{V}_{\text{ssb}}^{\text{gc}}$ крайне мала, а $\mathbf{V}_{\text{lsr}}^{\text{ssb}}$ известна. Используя формулы (1), (2) и (3), можно получить оценки (табл. 1).

Отметим, что эффекты, связанные с вращением Земли, влияют как на точность определения направления на источник \mathbf{n} , так и на точность расчета вектора скорости $\mathbf{V}_{\text{gc}}^{\text{obs}}$. В этом случае они нивелируются и остаются только ошибки, связанные с другими компонентами скорости.

4. СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТОВ

Программа Dopplex реализована на языке C++/CLI. На рис. [рисунок](#) изображено рабочее окно пользователя. Программа тестировалась в режимах прямой и обратной задач.

При тестировании работы программы Dopplex было проведено сравнение расчетов с онлайн ресурсом организации ATNF (Australia Telescope National Facility) [6] и с программным пакетом AIPS (Astronomical Image Processing System) [7].

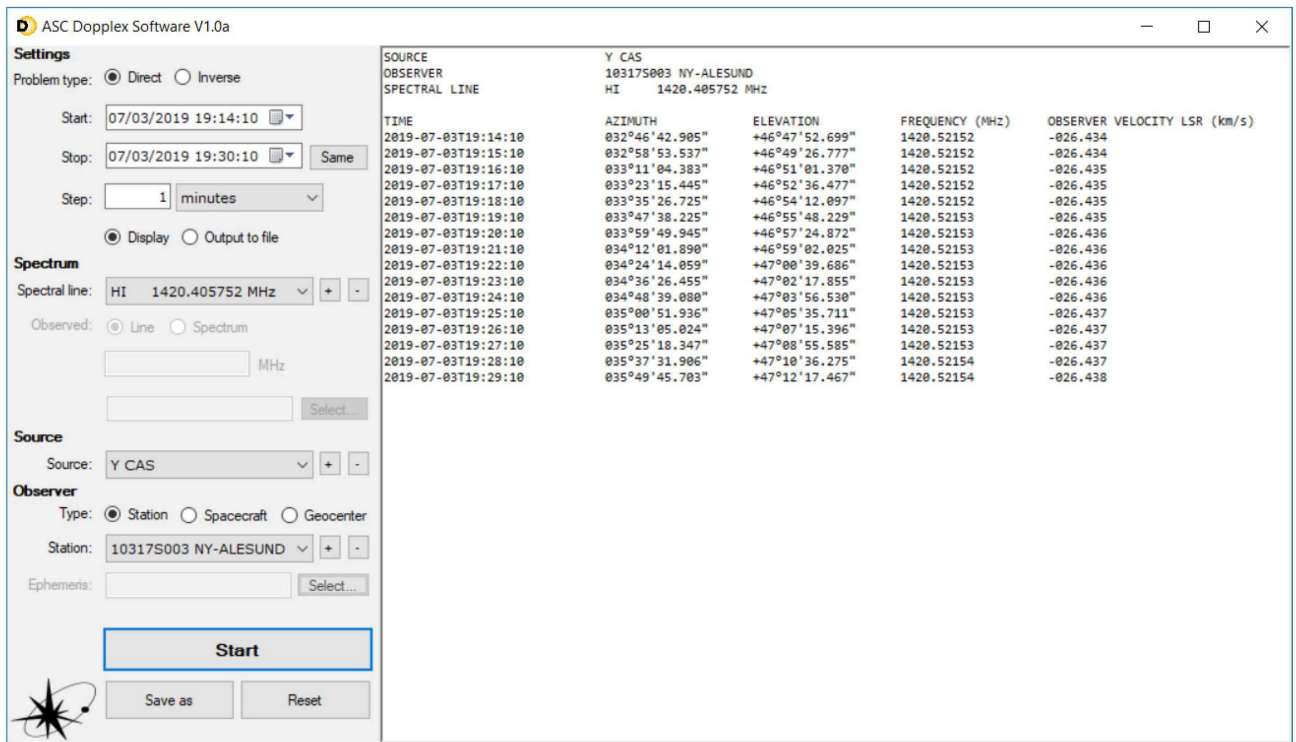


Рисунок. Главное окно программы Dopplex

В режиме прямой задачи проводилось сравнение радиальной скорости наблюдателя относительно ЛСП. Расчет скорости для наблюдений с радиотелескопа Parkes был произведен по выборке из тринадцати моментов времени на интервале 40 лет для 6 различных источников. В результате было определено стандартное отклонение невязки (разницы между скоростью наблюдателя, рассчитанной программой Dopplex, и скоростью, рассчитанной онлайн-ресурсом организации ATNF), которое составило 8 м/с. Несколько рассчитанных невязок приведены в табл. 2. Эти невязки можно объяснить тем, что в онлайн-ресурсе ATNF могло использоваться другое константное обеспечение. К примеру, могли быть взяты иные значения компонент вектора скорости БСС относительно ЛСП. Однако и этот результат можно считать приемлемым, поскольку требуемая точность для решения научных задач, указанная в техническом задании на составление данной программы, составляет ± 50 м/с.

В режиме обратной задачи проводилось сравнение радиальной скорости источника относительно ЛСП. В качестве опорных значений для трех источников использовались данные, рассчитанные программным пакетом AIPS, предназначенным для обработки и анализа данных, полученных в результате радио-

Табл. 2. Сравнение расчетов в прямой задаче

Время	Источник	Невязка, м/с
14-06-2000 16:34:00.0	S SCL	8
14-01-2010 16:34:00.0	S SCL	1
14-06-2013 16:34:00.0	S SCL	-7
14-06-2000 16:34:00.0	Y CAS	-2
14-01-2010 16:34:00.0	Y CAS	9
14-06-2013 16:34:00.0	Y CAS	-7

Табл. 3. Сравнение расчетов в обратной задаче

Время	Станция	Источник	Невязка, м/с
2013-11-29 01:34:47.0	Yebees	ORION_A	6
2012-10-05 12:34:45.5	Effelsberg	CEPA_HW2	-2
2012-11-27 02:04:45.5	Zelenchukskaya	W3IRS5	0

астрономических наблюдений. Наблюдения каждого из трех источников проводились на разный момент времени и на разных телескопах. В табл. 3 приведены результаты сравнения — невязки между радиальной скоростью, рассчитанной программой Dopplex, и скоростью, полученной программным пакетом AIPS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была разработана программа Dopplex, позволяющая вычислять астрономический эффект Доплера для космических радиисточников. Функциональность программы позволяет определять смещение частоты наблюдаемой спектральной линии (прямая задача) и радиальную (лучевую) скорость источника по наблюдаемому смещению частоты (обратная задача). Реализована возможность обработки спектров.

Программа предназначена для широкого круга пользователей, обладает удобным графическим интерфейсом и широким набором настроек, а также сопровождается подробным описанием логической структуры, классов и методов. В руководстве пользователя приводятся теоретические основы и подробно описываются способы решения задач, выполняемых программой.

Сравнение работы программы с существующими аналогами показали приемлемую точность расчетов (см. табл. 2 и 3).

Программу и ее описание можно найти на веб-странице [8].

Авторы выражают благодарность И. Д. Литовченко за полезные замечания и предоставленные данные для тестирования программы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Blaauw A., Schmidt M.* // Galactic Structure. University of Chicago Press. 1965.
2. The SOFA software libraries. International Astronomical Union. 2018.
3. *Cappola V., Seago J.H., Vallado D.A.* // American Astronomical Society. 2016. **134**. P. 919.
4. *Жаров В. Е.* // Сферическая астрономия. 2006.
5. *Moisson X., Bretagnon P.* // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. 2001. **80**. P. 205.
6. Australia Telescope National Facility, Frequency calculator <https://www.narrabri.atnf.csiro.au/observing/obstools/velo.html>
7. Astronomical Image Processing System <http://www.aips.nrao.edu/index.shtml>
8. ASC Dopplex Software <http://asc-lebedev.ru/index.php?dep=6&page=7>

The Program for Calculating the Doppler Effect in the Spectra of Cosmic Radio Sources: «Dopplex»

P. R. Zapevalin^a, T. A. Syachina^b, A. R. Shaykhutdinov, V. I. Kostenko

Astro Space Center of Lebedev Physics Institute. Moscow 117997, Russia.

E-mail: ^azapevalin@asc.rssi.ru, ^bsyachina@asc.rssi.ru.

In this work, we discuss the theoretical background for calculating the Doppler effect for distant cosmic radio sources. For this approach, we developed a user-friendly efficient software based on the IAU SOFA astrometric library. Comparison with other software and services confirms its acceptable accuracy.

Keywords: Doppler effect, spectral line, local standard of rest.

PACS: 95.90.

Received 08 November 2019.

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2020. 75, No. 2. Pp. 163–166.*

Сведения об авторах

1. Запевалин Павел Романович — инженер-исследователь; тел.: (495) 333-15-55, e-mail: zapevalin@asc.rssi.ru.
2. Сячина Татьяна Александровна — инженер-исследователь; тел.: (495) 333-15-55, e-mail: syachina@asc.rssi.ru.
3. Шайхутдинов Альберт Рузалевиич — инженер-исследователь; тел.: (495) 333-15-55, e-mail: shaykhutdinov@asc.rssi.ru.
4. Костенко Владимир Иванович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (499) 334-47-91, e-mail: kostenko@asc.rssi.ru.