

УДК 550.81:523.42

ДВУХПОЗИЦИОННАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

А. Г. Павельев, А. И. Кучерявенков

Рассмотрены перспективы применения корреляционной радиоастрономии с использованием космических источников излучения, предложенной ранее в [1]. Показано, что корреляционный метод позволяет осуществить измерение высоты рельефа планет, а также производить дистанционное зондирование их грунта с целью выявления его слоистости. Указанным методом может также осуществляться исследование распределения космического излучения по небесной сфере. Особый интерес представляет применение предложенного метода в низкочастотном диапазоне, где глубина проникновения радиоволн в грунт планет достигает нескольких километров.

Вопрос о локации планет с помощью космического радиоизлучения был рассмотрен в работах [1–3]. В [3] были проведены расчеты коэффициента отражения излучения распределенного космического фона от поверхности Луны. В этой работе было показано, что в диапазоне 100–400 МГц приращение эффективной температуры излучения Луны, связанное с отражением излучения космического фона, не превышает 20–30 К. В [2] изложены полученные впервые результаты измерений интенсивности космического радиоизлучения диапазона 50 МГц, отраженного от поверхности Луны. Согласно данным [2], эффективная температура излучения Луны на длине волны $\lambda = 6$ м достигала 600–900 К, что в два–три раза превышает температуру собственного излучения. В результате измерений в [2] была определена средняя диэлектрическая проницаемость видимой с Земли части Луны $\epsilon = 3,7$. В [1] был предложен корреляционный метод локации планет с помощью космического радиоизлучения. Суть этого метода состоит в получении корреляционной функции сигнала космического излучения, облучающего поверхность, и отраженного сигнала, с целью определения расстояния антенна — поверхность планеты, измерения плотности грунта, выявления его слоистости и решения других задач. Предварительный анализ, проведенный в [1], позволил выявить зависимость углового размера части источника, используемой для локации, от длины волны и расстояния до планеты. Отсюда в косвенной форме следует возможность определения с помощью корреляционного метода распределения интенсивности излучения по небесной сфере, что особенно актуально в низкочастотном диапазоне. С этой точки зрения предлагаемый метод близок к идее лунного интерферометра работы [4]. Однако схема измерений [1] является более общей, поскольку включает случай размещения антенны на спутнике.

Из предварительного рассмотрения следует плодотворность развития в [1] подхода к проблеме использования источников естественного излучения. Идеи, развитые в [1], могут быть положены в основу нового направления исследований — корреляционной радиолокации с помощью космического радиоизлучения. В связи с этим представляется необходимой их дальнейшая разработка и развитие.

Цель данной работы состоит в доказательстве перспективности корреляционного метода локации с использованием космического радиоизлучения для исследования грунта и формы небесных тел, а также для измерения распределения космического фона по небесной сфере.

1. Корреляционный метод локации. На рис. 1 изображена схема локации планеты с помощью космического радиоизлучения. В точке O находится центр планеты, в точке A расположена приемная антенна (малонаправленная). Эта антенна принимает как сигнал космического источника E , условно обозначенного овалом на рис. 1, так и отраженный сигнал. В принципе, для приема облучающего поверхность (опорного) и отраженного сигналов можно использовать разные антенны. Раздельный прием отраженного и опорного сигналов имеет преимущество с разных точек зрения, в том числе и с точки зрения увеличения энергетического потенциала локации, но более сложен.

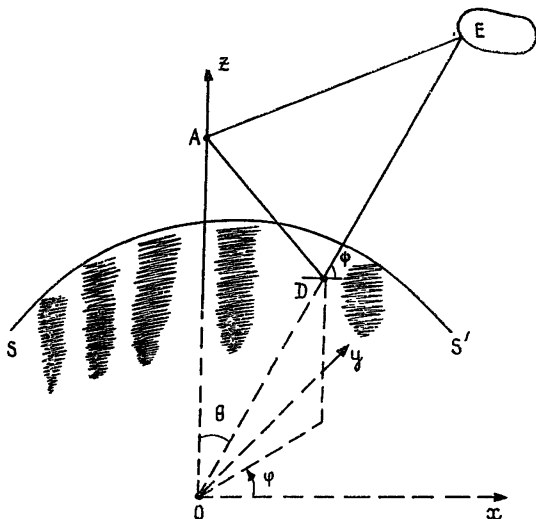


Рис. 1.

Информация в структуре исследуемой поверхности в предлагаемом методе получается путем анализа корреляционной функции опорного и отраженного сигналов. Для получения выражения для корреляционной функции рассмотрим часть источника излучения, расположенную в телесном угле $d\Omega$, излучающую в диапазоне частот $d\omega$ с интенсивностью $I(\omega, \Omega)$. В комплексном представлении сигнал, излучаемый этой частью, имеет вид

$$dS(t) = U \exp j[\omega t - kR + \varphi(\omega)], \quad (1)$$

где R — расстояние до источника, U — комплексная амплитуда, φ — фаза, $\omega = 2\pi f$, f — частота, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число. Величина U зависит от размеров телесного угла $d\Omega$ и интервала частот $d\omega$.

Сигнал от всего источника $S_{\Pi}(t)$ есть сумма сигналов от его элементов:

$$S_{\Pi}(t) = \sum U \exp j[\omega t - kR + \varphi(\omega)]. \quad (2)$$

Отраженный от поверхности планеты сигнал также может быть представлен в виде суммы сигналов, соответствующих отдельным частям источника излучения:

$$S_{\text{отр}}(t) = \sum \rho U \exp j[\omega t - kR_{\text{отр}} + \varphi(\omega)], \quad (3)$$

где ρ — комплексный коэффициент отражения по амплитуде, зависящий от свойств грунта, поляризации волн, облучающих планету, и поляризационной характеристики приемной антенны, $R_{\text{отр}}$ — длина пути распространения радиоволн, излучаемых достаточно малой частью источника, равная сумме расстояний DE и AD , где точка D является точкой зеркального отражения от поверхности.

Отраженный и опорный сигналы от источника излучения поступают на выход приемной антенны A и затем в процессе усиления и преобразования частоты суммируются с собственными шумами

приемника $S_{\text{ш}}(t)$. Поэтому напряжение на выходе приемника $U(t)$ может быть представлено в виде суммы

$$U(t) = S_{\text{н}}(t) + S_{\text{отр}}(t) + S_{\text{ш}}(t). \quad (4)$$

Как было показано в [1], полезная информация содержится в автокорреляционной функции сигнала $W_{\text{к}}(\tau)$:

$$W_{\text{к}}(\tau) = \overline{U(t_1)U^*(t_2)} = T_1 [R_{\text{ш}}(t_1, t_2) + R_{\text{с}}(t_1, t_2)], \quad (5)$$

$$R_{\text{с}}(t_1, t_2) = R_{\text{н.о}}(t_1, t_2) + R_{\text{о.н}}(t_1, t_2), \quad \tau = t_1 - t_2,$$

где T — время интегрирования корреляционного произведения, $R_{\text{ш}}(t_1, t_2)$ — корреляционная функция шума, зависящая от интенсивности собственных шумов приемника, интенсивности сигнала источника излучения, принятого антенной A , и отраженного сигнала. Черта сверху в (5) обозначает усреднение по ансамблю. Функция $R_{\text{ш}}(t_1, t_2)$ может быть представлена в виде

$$R_{\text{ш}}(t_1, t_2) = \overline{S_{\text{н}}(t_1)S_{\text{н}}^*(t_2)} + \overline{S_{\text{отр}}(t_1)S_{\text{отр}}^*(t_2)} + \overline{S_{\text{ш}}(t_1)S_{\text{ш}}^*(t_2)}. \quad (6)$$

Необходимо отметить, что функция $R_{\text{ш}}(t_1, t_2)$ не равна нулю даже в том случае, когда равны нулю собственные шумы приемника, поскольку в случае приема отраженного и опорного сигналов на одну антенну к собственным шумам приемника добавляются в качестве шума принятый сигнал источника излучения, а также отраженный сигнал. Этот недостаток может быть исключен, если для приема опорного сигнала использовать отдельную антенну.

Функции $R_{\text{н.о}}(t_1, t_2)$ и $R_{\text{о.н}}(t_1, t_2)$ являются корреляционными функциями опорного и отраженного сигналов:

$$R_{\text{н.о}}(t_1, t_2) = \overline{S_{\text{н}}(t_1)S_{\text{отр}}^*(t_2)}, \quad R_{\text{о.н}}(t_1, t_2) = \overline{S_{\text{н}}^*(t_2)S_{\text{отр}}(t_1)}. \quad (7)$$

Указанные функции содержат полезную информацию о свойствах грунта и о рельефе поверхности планеты, а также об источнике космического излучения.

Согласно (5) автокорреляционная функция $W_{\text{к}}(t_1, t_2)$ есть сумма корреляционных функций сигнала и шума $R_{\text{ш}}(t_1, t_2)$. Выявление функции $R_{\text{с}}(t_1, t_2)$ на фоне функции $R_{\text{ш}}(t_1, t_2)$ возможно в связи с тем, что максимумы указанных функций наблюдаются при разных значениях разности $\tau = t_1 - t_2$. Корреляционная функция шума $R_{\text{ш}}(t_1, t_2)$ достигает максимального значения при $\tau = 0$, а корреляционная функция опорного и отраженного сигналов — при $\tau = \Delta/c$, где c — скорость распространения радиоволн, а Δ есть величина пространственного запаздывания отраженного сигнала относительно опорного. Для достаточно малой части источника излучения $d\Omega$ величина Δ может быть представлена формулой

$$\Delta = R_{\text{отр}} - R_{\text{н}}, \quad (8)$$

где $R_{\text{отр}}$ — путь, проходимый радиоволной на трассе EDA , D — точка зеркального отражения радиоволн от гладкой поверхности планеты. Ширина максимума корреляционной функции сигнала и шума зависит от полосы приемного устройства ΔF , а также (в случае корреляционной функции сигнала) — от размеров источника. Кроме того, условия обнаружения корреляционного максимума, соответствующего отраженному сигналу, зависят от коэффициента отражения и интенсивности шума.

Для анализа условий обнаружения отраженного сигнала и особенностей локации с помощью протяженных источников излучения рассмотрим конкретные представления корреляционных функций сигнала и шума. При этом для простоты рассмотрим вместо функции $R_{\text{с}}(t_1, t_2)$ одну из функций $R_{\text{н.о}}(t_1, t_2)$.

В связи с независимостью сигналов от различных частей источника излучения можно считать, что

$$\overline{UU^*} = I(\omega, \Omega) d\Omega d\omega. \quad (9)$$

Поэтому для корреляционной функции $R_{\text{и.о}}(t_1, t_2)$ находим

$$R_{\text{и.о}}(t_1, t_2) = \int d\omega \Phi(\omega) \Phi^*(\omega) \exp\{[j(\omega - \omega_r)\tau] Q_{\text{и}}(\omega)\}, \quad (10)$$

$$Q_{\text{и}}(\omega) = \int d\Omega I(\Omega, \omega) H_{\text{а}}(\Omega) H_{\text{а}}^*(\Omega_1) \rho^*(\epsilon, \theta) \exp(jk\Delta),$$

где $Q_{\text{и}}(\omega)$ — характеристика источника излучения, $H_{\text{а}}(\Omega)$, $H_{\text{а}}(\Omega_1)$ — соответственно нормированная диаграмма направленности по полю в направлении на источник и на точку зеркального отражения от поверхности, $\rho(\epsilon, \theta)$ — коэффициент отражения от поверхности, зависящий от диэлектрической проницаемости грунта ϵ , Δ — пространственное запаздывание отраженного сигнала относительно опорного, $\Phi(\omega)$ — функция, описывающая зависимость коэффициента передачи в приемном устройстве от частоты, $\omega_r = 2\pi f_r$, f_r — частота гетеродина, $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны.

Для корреляционной функции шумов $R_{\text{ш}}(t_1, t_2)$ аналогично получим, пренебрегая влиянием отраженного сигнала на уровень шума,

$$R_{\text{ш}}(t_1, t_2) = \int d\omega \Phi(\omega) \Phi^*(\omega) [W_{\text{ш}}(\omega) + W_{\text{и}}(\omega)] \exp j(\omega - \omega_r)\tau, \quad (11)$$

$$W_{\text{и}}(\omega) = \int d\Omega I(\omega, \Omega) G_{\text{а}}(\Omega),$$

где $G_{\text{а}}(\Omega)$ — усиление антенны в направлении на источник излучения, $W_{\text{ш}}(\omega)$ — спектральная плотность мощности собственных шумов приемника.

Величина $Q_{\text{и}}(\omega)$ в (10) в сильной степени зависит от свойств источника излучения и положения антенны относительно отражающей поверхности. В некотором смысле она аналогична комплексной функции различимости, используемой в теории радиоинтерферометров [5]. Отличие состоит, во-первых, в зависимости $Q_{\text{и}}(\omega)$ от характеристики приемной антенны, во-вторых, своеобразной зависимости пространственного запаздывания Δ от положения источника, связанной с тем, что второй «антенной» интерферометра в данном случае является отражающая поверхность, в-третьих, в том, что в случае локации грунта распределение яркости в пределах источника предполагается известным. В этом, в частности, состоит отличие постановки задачи исследования грунта от задачи исследования распределения излучения по небесной сфере.

Корреляционная функция шума (11) отличается от корреляционной функции сигнала отсутствием множителя $\exp(jk\Delta)$, зависящим от запаздывания отраженного сигнала, и есть фурье-преобразование от произведения частотной характеристики фильтра приемника на спектральную плотность мощности шума.

Соотношение (10) является основным в корреляционном методе исследования планет и распределения космического излучения, по небесной сфере. Корреляционная функция (10) является фурье-преобразованием произведения $I(\omega, \Omega)\Phi(\omega)\rho(\epsilon, \theta)$. Обращение этого преобразования является решением обратной задачи: по измеренной в эксперименте функции $R_{\text{с}}(t_1, t_2)$ восстановить зависимость $I(\omega, \Omega)$ и $\rho(\epsilon, \theta)$ от ω, θ . Общую схему восстановления сначала целесообразно обсудить с качественной точки зрения, введя понятие когерентной области.

2. Когерентная область и возможность измерения координат и угловых размеров источников излучения. Введем понятие когерентной области, соответствующей данному положению антенны и поверхности. В неявной форме это понятие рассматривалось в [1]. Согласно [1], существует такое положение источника излучения, приемной антенны

и точки зеркального отражения на поверхности, при котором корреляционный отклик максимален. Это положение соответствует экстремальным значениям фактора Δ в (10), выраженного в виде функции пространственных координат. Условие экстремума с физической точки зрения означает, что источник, зеркальная точка и антенна должны находиться на одной прямой. В случае гладкой поверхности это значит, что продолжение нормали к поверхности в зеркальной точке должно проходить через антенну и источник, т. е. источник должен находиться в зените. Угловой размер когерентной области согласно [1] равен $\sqrt{2\lambda/h}$, где h — высота антенны над поверхностью. Если источник излучения находится вне когерентной области, то корреляционный отклик уменьшается. Причина уменьшения состоит в том, что возникает декорреляция между сигналом источника, принимаемым антенной, и сигналом, отраженным от поверхности. Известно, что радиус пространственной корреляции l излучения источника с угловым размером $\Delta\theta_n$ равен $\lambda/\Delta\theta_n$. С другой стороны, расстояние d между траекториями прямой и отраженной волн для источника, имеющего зенитный угол θ_0 , есть $2h \sin \theta_0$. Для существования заметной корреляции должно выполняться условие

$$d \leq A l, \quad 2h \sin \theta_0 \leq A \lambda / \Delta\theta_0, \quad (12)$$

где A — безразмерный множитель, определяющий степень корреляции. Это условие накладывает ограничение на зенитное расстояние компактного источника θ_0 с угловым размером $\Delta\theta_n$.

Для протяженных источников когерентная область, как правило, находится в пределах источника. Часть источника, находящаяся вне когерентной области, практически не дает вклада в корреляционный отклик. Отсюда следует возможность измерения распределения интенсивности излучения по небесной сфере при перемещении спутника. Разрешающая способность по угловым координатам $\Delta\theta$ при этом равна размеру когерентной области и может быть найдена из соотношения

$$\Delta\theta = \sqrt{2\lambda/h}. \quad (13)$$

Согласно (13) разрешающая способность возрастает при увеличении высоты над отражающей поверхностью. Например, в низкочастотном диапазоне величина $\Delta\theta$ при $h=100\div 1000$ км и $\lambda=1$ км достигает значений $0,3\div 0,8^\circ$. Такие значения разрешающей способности в этом диапазоне другими методами получить трудно.

Необходимо также отметить, что для компактных источников имеется возможность определения угловых координат с помощью измерения запаздывания отраженного сигнала. Точность измерений угловой координаты определяется шириной полосы регистрации и зенитным углом θ_0 и может быть найдена из соотношения

$$\delta\theta = c/2h\Delta F \sin \theta_0. \quad (14)$$

Согласно (14) точность измерений угловой координаты компактного источника $\delta\theta$ возрастает при увеличении высоты h и полосы ΔF .

Приведенные выше утверждения носят качественный характер. Однако они могут быть подтверждены и более строгим математическим рассмотрением корреляционной функции.

3. Энергетический потенциал. Практическая значимость перечисленных выше возможностей исследования зависит от ожидаемого соотношения сигнал/шум. Согласно [1] отношение полезного сигнала (в максимуме корреляционной функции) к флуктуациям шума на выходе коррелятора (по мощности) определяется выражением

$$N = 2T \Delta F p_1 p_2, \quad p_1, p_2 < 1, \quad (15)$$

где T — время когерентной обработки, ΔF — полоса частот приемника, p_1, p_2 — соотношение сигнал/шум для опорного и отраженного сигнала.

лов соответственно. Величины ρ_1 и ρ_2 зависят от размеров когерентной области, используемой для локации, $\Omega_{\text{н}}$ и температуры шумов приемника $T_{\text{н}}$. Если обозначить $T_{\text{н}}$ среднюю в полосе частот ΔF и в телесном угле $\Omega_{\text{н}}$ температуру излучения, $T_{\text{ф}}$ — усредненную по небесной сфере температуру фона, то для ρ_1 и ρ_2 получим

$$\rho_1 = \Omega_{\text{н}} T_{\text{н}} / [4\pi(T_{\text{ф}} + T_{\text{н}})], \quad \rho_2 = |\rho^2| \rho_1. \quad (16)$$

Из (16) видно, что параметры ρ_1 и ρ_2 при $T_{\text{ф}} = T_{\text{н}}$ и $T_{\text{н}} = 0$ не зависят от температуры космического фона и определяются отношением размеров используемой для локации области космического излучения к телесному углу, занятому небесной сферой, равному 4π . При $T_{\text{н}} = 0$, $T_{\text{ф}} = T_{\text{н}}$ из (15), (16) находим

$$N = T \Delta F \rho^2 \Omega_{\text{н}}^2 / 8\pi^2. \quad (17)$$

Величина N из (17) растет пропорционально квадрату телесного угла $\Omega_{\text{н}}$, занятому когерентной областью. Этот размер определяется в случае, когда полоса приемника соизмерима с центральной частотой F_0 соотношением

$$\Omega_{\text{н}} = c/h\Delta F. \quad (18)$$

При достаточно широкой полосе в этом случае $\Omega_{\text{н}}$ может быть соизмерим с 2π . Например, из (18) следует, что при $\Delta F \sim c/2\pi h$ $\Omega_{\text{н}} \sim 2\pi$. Подстановка (18) в (17) дает

$$N = T \rho^2 c^2 / 8\pi^2 h^2 \Delta F. \quad (19)$$

В этом случае N убывает обратно пропорционально полосе частот ΔF и квадрату высоты спутника h . В обратном случае $\Delta F \ll F_0$, практически наиболее часто реализуемом, подстановка соответствующего выражения для $\Omega_{\text{н}}$ в (17) дает

$$N = T \Delta F \rho^2 \lambda^2 / (8\pi^2 h^2)^{-1}. \quad (20)$$

Согласно (20) величина N возрастает пропорционально отношению квадрата длины волны λ к высоте антенны h . Отсюда следует, что для локации грунта является перспективным низкочастотный диапазон, в котором высота антенны соизмерима с длиной волны. Корреляционный метод также эффективен в случае, когда $T_{\text{н}} \gg T_{\text{ф}}$. Этому условию удовлетворяет километровое излучение Земли, эффективная мощность которого достигает одного миллиона киловатт [6], а также некоторые другие источники космического излучения, в частности излучение Юпитера, Сатурна, Солнца.

Из проведенного рассмотрения следует, что возможность применения корреляционного метода определяется отношением высоты антенны к средней длине волны излучения h/λ , а также используемой полосой частот ΔF и размерами источника. При значениях h/λ порядка 1—100 для локации планет может быть использовано распределенное космическое излучение, при $h/\lambda \sim 1000$ и более — излучение компактных источников, в том числе излучение Земли в километровом и гектометровом диапазонах. Разрешающая способность при определении яркости протяженных источников предложенным методом составляет величину порядка $\sqrt{2\lambda/h}$, а при определении угловых размеров компактных источников используются выражения, аналогичные данным в [4].

Корреляционный метод локации с помощью космического излучения (как компактных, так и протяженных источников) является перспективным средством зондирования верхнего покрова планет. Этот метод может быть использован также для определения распределения яркости в пределах источников космического излучения и для определения координат компактных источников. Для исследования грунта планет оптимальным является низкочастотный диапазон, где глубина проникновения радиоволн в верхний слой максимальна.

В дальнейшем предлагаемый метод может быть применен и для исследования Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучерявенков А. И., Павельев А. Г. — Радиотехника и электроника, 1982, 27, № 5, с. 914.
2. Хегфорс Т. В кн.: Физика Луны и планет. — М.: Наука, 1972, с. 421.
3. Стародубцев А. М. — Изв. вузов — Радиофизика, 1964, 7, № 3, с. 399.
4. Артюх А. В., Шишов В. И. — Астрон. журнал, 1982, 59, № 1, с. 121.
5. Краус Д. Д. Радиоастрономия — М.: Сов. радио, 1973.
6. Gurnett G. A. — J. Geophys. Res., 1974, 79, № 28, p. 4227.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР

Поступила в редакцию
3 июня 1985 г.,
после доработки
24 декабря 1985 г.

TWO-POSITION RADIOLOCATION BY COSMIC RADIO EMISSION

A. G. Pavel'ev, A. I. Kucheryavenkov

A new method — the correlation radioastronomy is considered. This method was suggested in [1]. Using this method one may provide measurements of the relief height and the soil density of planets in the depth range from one meter to some kilometers in the decametric and low-frequency wave range. The distribution of cosmic radio emission in the low-frequency range may be also investigated.

ИНФОРМАЦИЯ

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, т. 63, вып. 1, 1986 г.

Аннотации статей, представляющих интерес для читателей «Радиофизики»

Губанов А. Г. Радионезлучение эйбловских скоплений галактик с красными смещениями от 0,02 до 0,075 на 102,5 МГц. III. Локальная функция радиосветимости скоплений.

Построена локальная функция радиосветимости эйбловских скоплений галактик в диапазоне мощности излучения на 102,5 МГц от $\sim 10^{24}$ до $\sim 10^{27}$ Вт·Гц⁻¹ и для полного в радиодиапазоне излучения от $\sim 10^{40}$ до $\sim 10^{43}$ эрг·с⁻¹. Поведение функции радиосветимости скоплений хорошо согласуется с известными свойствами функции радиосветимости галактик

Левшаков С. А., Херсонский В. К., Варшалович Д. А. Возможная абсорбционная деталь в радиоспектре квазара PHL 61 и ее интерпретации.

Анализ радиоспектра квазара PHL 61 ($z_a=1,936$), полученного Такахарой и др., позволяет сделать вывод о возможном наличии в спектре абсорбционной детали на частоте $\nu=39,317$ ГГц шириной 5,2 МГц и глубиной $\tau=0,15$. Предполагаются как наиболее вероятные две интерпретации этой детали — вращательная линия $J=0 \rightarrow 1$ молекулы $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ с красным смещением $z_a(^{12}\text{C}^{16}\text{O})=1,9318$ либо ее изотоп-замещенный аналог $^{12}\text{C}^{17}\text{O}$ с $z_a(^{12}\text{C}^{17}\text{O})=1,8578$. Обсуждается также возможность отождествления этой абсорбционной детали с линиями сверхтонкого мультиплета вращательного перехода $K=0 \rightarrow 1$ молекулы CN с $z_a(\text{CN})=1,8784$. Рассмотрены тесты для проверки предлагаемых отождествлений.

Федоренко В. Н., Зенцова А. С. О взаимодействии выбросов радиогалактик с межзвездным и межгалактическим газом.

Рассмотрено взаимодействие сверхзвуковой конической газовой струи с покоящимся внешним газом. Получено выражение для длины торможения струи, а также найден закон движения газового облака, образованного заторможенной струей. Сравнение теории с наблюдениями позволяет наложить ряд ограничений на величины параметров «струй» в радиогалактиках.

(Продолжение см. с. 887)