

МЕТЕОРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА РАДАРЕ ЕКВ ИСЗФ СО РАН

Р.Р. Федоров, О.И. Бернгардт

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
fedrr@iszf.irk.ru

METEOR OBSERVATIONS AT EKV RADAR OF ISTP SB RAS

R.R. Fedorov, O.I. Berngardt

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Рассматривается расширение возможностей когерентного радара декаметрового диапазона ЕКВ ИСЗФ СО РАН по диагностике нейтральной атмосферы высот 80–100 км за счет мониторинга метеорного рассеяния в реальном масштабе времени. Описана реализация алгоритма поиска и определения параметров метеорных эхо по квадратурным компонентам рассеянного сигнала. В работе приведен статистический анализ характеристик метеорного эхо в период с начала 2016 г. по настоящее время, исследованы его ракурсные зависимости.

Ключевые слова: SuperDARN, метеорное эхо, автоматическое распознавание.

Abstract. Improving of diagnostic abilities of EKV ISTP SB RAS radar for 80–100 km height neutral atmosphere studies by monitoring of meteor trail scattering in real time are presented. Meteor echo detecting and parameters obtaining algorithm are described. Statistical analysis of characteristics of meteor echo since early 2016 is presented. Aspect sensitivities are studied.

Keywords: SuperDARN, meteor echo, automatic detecting.

Экспериментальная установка и объект исследования

Радар ЕКВ ИСЗФ СО РАН представляет собой загоризонтный когерентный радар аналогичный радарам сети SuperDARN [Greenwald et al., 1985]. Данный радар расположен 56.5° N, 58.5° E, обладает сектором обзора около 52°, эффективной дальностью 3000–4500 км и рабочими частотами 8–20 МГц. Сектор обзора поделен на 16 направлений (лучей) шириной порядка 3–6°, разрешение по дальности 15–45 км, время накопления сигнала на одном луче 4–8 с, полное сканирование сектора обзора занимает 1–2 мин. Основной режим работы — сканирование многоимпульсными последовательностями с накоплением корреляционной функции сигнала на каждой радиолокационной дальности и по каждому лучу по отдельности. Основным назначением данного радара является мониторинг динамики ионосферы в полярных широтах, однако он может быть использован и для регистрации параметров метеорного эхо (рассеяния на метеорных следах) на малых дистанциях (до 600 км.) на высотах сгорания метеоров (80–100 км.) [Hall et al., 1997]. Исследование метеорного эхо является относительно регулярным режимом работы аналогичных радаров сети SuperDARN [Arnold et al., 2003].

Основным рассеивающим объектом при исследовании метеорного эхо является метеорный след — вытянутая область (трубка) ионизованного газа, остающаяся после сгорания метеора. Метеорный след обладает высокой ракурсной чувствительностью — зондирующий луч должен быть ортогонален большой оси трубки для эффективного обратного рассеяния. Метеорные следы делятся на два типа по плазменной частоте на underdense следы (если частота зондирования выше плазменной) и

overdense следы (если частота зондирования ниже плазменной) [McKinley, 1961]. Underdense следы обладают простой формой рассеянного сигнала — резкий пик мощности с экспоненциальным спадом во времени, фаза сигнала при этом изменяется линейно вследствие движения следа под действием ветра. Эти особенности делают underdense эхо удобным объектом для автоматического распознавания в записях рассеянного сигнала.

Алгоритм детектирования метеорного эхо

В отличие от стандартных для сети SuperDARN методов диагностики метеорного эхо по среднестатистическим характеристикам сигнала (с временным разрешением порядка нескольких секунд), нами реализован алгоритм поиска метеорных эхо по квадратурным компонентам рассеянного сигнала до статистического усреднения, с временным разрешением 5–10 миллисекунд. Алгоритм состоит из двух этапов: грубый отбор записей с резкими пиками с монотонным спадом в мощности рассеянного сигнала и определение параметров модели сигнала по экспериментальным данным.

Измеряемые радаром узкополосные сигналы после гетеродинирования представляются в виде комплексного сигнала $F_m(t) = I_e(t) + iQ_e(t)$, состоящего из двух квадратурных компонент. Модель рассеянного на метеорном следе сигнала представляется в виде: $F_m(t) = (A_r + iA_i)(I_m(t) + iQ_m(t))$, где A_r и A_i — компоненты начальной амплитуды и фазы, $I_m(t) = \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)\cos(st)$ и $Q_m(t) = \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)\sin(st)$ — компоненты модельной функции, s и T — параметры модели: наклон фазы и время затухания соответственно, t — время.

При определении параметров модели ведется поиск по предопределенному набору значений параметров: для наклона фазы от -200 до 200 м/с с шагом в 1 м/с (при расчетах скорость переводится в наклон фазы по формуле $s = \frac{4\pi V}{\lambda}$, λ — длина волны несущей частоты радара, V — скорость неоднородностей); для времени затухания от 0.1 с до 40 с с шагом 0.1 с. Для каждой возможной комбинации s и T из соображений минимума отклонения модели от записи $\sum (F_{\text{expr}}(t) - F_m(t))^2 = \min$ вычисляются A_r и A_i :

$$A_r = \frac{\sum (I_m(t) * I_e(t) + Q_m(t) * Q_e(t))}{\sum (I_m^2(t) + Q_m^2(t))},$$

$$A_i = \frac{\sum (I_m(t) * Q_e(t) - Q_m(t) * I_e(t))}{\sum (I_m^2(t) + Q_m^2(t))}.$$

В ходе поиска параметров модели методом прямого перебора выбирается пара s и T с минимальным отклонением модели от записи:

$$D(s, \tau) = \sum \left((I_e(t) - \Re(F_m(t)))^2 + (Q_e(t) - \Im(F_m(t)))^2 \right) = \min$$

Для выбранной пары параметров вычисляются СКО амплитуды и фазы:

$$\sigma_{\text{amp}}^2(s, \tau) = \sum \left((F_e(t)) - (F_m(t)) \right)^2,$$

$$\sigma_{\text{ph}}^2(s, \tau) = \sum \left(\text{atan} \frac{Q_e(t)}{I_e(t)} - \text{atan} \frac{\Im(F_m(t))}{\Re(F_m(t))} \right)^2.$$

СКО амплитуды приводится к безразмерному виду:

$$\sigma_{r, \text{amp}}(s, \tau) = \frac{\sigma_{\text{amp}}(s, \tau)}{(F_e(T_0))}, \text{ где } T_0 \text{ — момент времени}$$

соответствующий пику мощности в записи.

После нахождения параметров модели проводится проверка следующих условий, определенных в результате статистического анализа:

$$D(s, \tau) < 500 \text{ [отсчетов АЦП]},$$

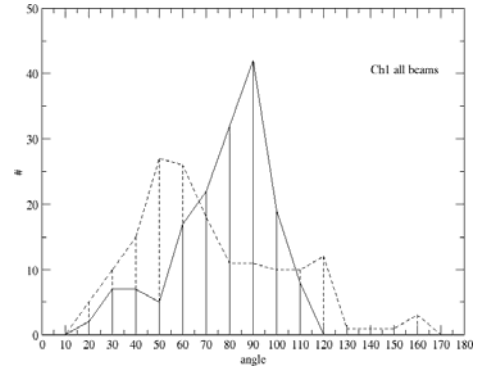
$$\sigma_{r, \text{amp}}(s, \tau) < 0.5,$$

$$\sigma_{\text{ph}}(s, \tau) < 0.7 \text{ [рад/с]}.$$

При выполнении данных условий запись считается метеорным эхо, с параметрами: T — характерное время затухания, $V = s \frac{\lambda}{4\pi}$ — скорость движения следа вдоль луча зрения.

Проверка результатов

Для проверки данных, получаемых алгоритмом, было выбрано свойство ракурсной чувствительности рассеяния на метеорных следах. Для этого был выбран день, соответствующий известному интенсивному потоку Геминид в декабре 2016 г. Положение радианта данного потока хорошо известно [ИМО Calendar, 2016] и соответственно можно рассчитать взаимное расположение луча зрения радара и направления на радиант и построить распределение



Распределение углов между лучом зрения радара и направлением на радиант потока Геминид. Сплошная линия — в предположении рассеяния в главном лепестке. Пунктирная линия — в предположении рассеяния в заднем лепестке

взаимных углов для каждого обнаруженного эхо. Поскольку радар ЕКВ не ведет измерений угла места принятого сигнала, но при этом имеет ярко выраженный задний лепесток диаграммы направленности — мы не можем судить по данным радара о том, в каком лепестке произошло рассеяние. Поэтому было построено два распределения: одно в предположении рассеяния только в переднем лепестке, второе — только в заднем лепестке. Для расчета положения луча зрения были использованы приближение того, что все полученные метеоры сгорели на высоте 100 км [Holdsworth et al., 2004], и приближение сферической Земли. Полученные распределения представлены на рисунке.

Как видно из рисунка распределение, соответствующее главному лепестку, имеет ярко выраженный пик в районе 90° , что позволяет интерпретировать полученные данные как ракурсное рассеяние на метеорных следах преимущественно принадлежащих потоку Геминид.

Заключение

Алгоритм запущен на радаре ЕКВ ИСЗФ СО РАН в декабре 2016 г. и в настоящее время является регулярным видом обработки данных радара, а также используется для ретроспективного анализа данных. Данные, представленные в работе, получены на радаре ЕКВ ИСЗФ СО РАН.

Список литературы:

- Greenwald R.A., Baker K.B., Hutchins R.A., Hanuise C. An HF phased-array radar for studying small-scale structure in the high-latitude ionosphere // Radio Sci. 1985 V. 20, N 1. P. 63–79.
- Hall G.E., MacDougall J.W., Moorcroft D.R. et al. Super Dual Auroral Radar Network observations of meteor echoes // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, N A7. P. 14603–14614.
- Arnold N.F., Cook P.A., Robinson T.R. et al. Comparison of D-region Doppler drift winds measured by the SuperDARN Finland HF radar over an annual cycle using the Kiruna VHF meteor radar // Annales Geophysicae. 2003 V. 21, N 10. P. 2073–2082.
- McKinley D.W.R. Meteor Science and Engineering // McGraw-Hill Book Company, Inc. 1961. P. 172–232.
- Meteor Shower Calendar, International Meteor Organization, 2016.
- Holdsworth D.A., Reid I.M., Cervera M.A. Buckland Park all-sky interferometric meteor radar // Radio Sci. 2004. V. 39, N 5, P. 1–12.