

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ СИГНАЛА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

В.П. Ташлыков, А.В. Медведев

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

DETERMINATION OF IONOSPHERIC PLASMA TEMPERATURES ON THE BASIS OF INCOHERENT SCATTER MODEL

V.P. Tashlykov, A.V. Medvedev

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

Аннотация. В работе представлена методика решения обратной задачи рассеяния для определения плазменных температур по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР). Проверка решения обратной задачи осуществляется путем постановки прямой задачи рассеяния сигнала и ее моделирования с помощью метода Монте-Карло. Кроме того, в модель рассеяния сигнала можно вводить известные источники систематической погрешности, что позволяет оценить, в каких приближениях возможно корректное восстановление температур. Поиск и методическое устранение таких погрешностей, которые искажают получаемые профили температур, являются главной задачей данного исследования. Также представлены результаты апробации разработанного метода восстановления температур на экспериментальных данных ИРНР.

Ключевые слова: ионные и электронные температуры, метод некогерентного рассеяния.

Abstract. The technique for solution of the inverse scattering problem was developed to obtain plasma temperatures on data of Irkutsk incoherent scatter radar (IISR). Verification of this solution was carried out with statement of the direct scattering problem and simulation using Monte-Carlo method. Besides, one can introduce the known systematic error sources into the backscatter model, what enables to estimate the approaches for which correct temperatures recovery is possible. Search and methodical correction of the errors that could disguise the obtained temperatures define the main task of the study. Validation of the developed technique for temperatures determination on IISR experimental data is also presented.

Keywords: ion and electron temperatures, incoherent scatter technique.

Введение

Одним из основных инструментов наземной диагностики ионосферы над Сибирским регионом является Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) [Потехин и др., 2008]. Эта уникальная установка не имеет аналогов в России и представляет собой УКВ радар (рабочая частота 152–164 МГц), выполненный в виде Н-секториального рупора с площадью раскрытия больше 500 м². Большая площадь апертуры совместно с мощными передатчиками (пиковая мощность 3 МВт) позволяет регистрировать слабый сигнал, рассеянный во всей толще ионосферы.

Одной из наиболее актуальных проблем для ИРНР остается корректное определение температур ионосферной плазмы. Для правильной постановки обратной задачи нужно учесть влияние фарадеевских замираний на профиль получаемых АКФ, которые возникают из-за одной важной особенности радара — прием и излучение строго линейной поляризации сигнала. Вследствие эффекта Фарадея плоскость поляризации испытывает вращение на всем пути распространения сигнала, скорость ее вращения зависит от электронной концентрации и магнитного поля Земли [Шпынев, 2000]. Когда плоскость поляризации сигнала приходит перпендикулярно поляризационному фильтру радара, в профиле мощности возникают замирания, характери-

зующиеся еще более низким отношением сигнал-шум. В первую очередь данная погрешность сказывается именно на температурах.

Задачей данного исследования является разработка алгоритма оценки и устранения описанной погрешности в методе определения плазменных температур.

Постановка и решение обратной задачи

Постановка обратной задачи состоит в определении связи АКФ принимаемого сигнала со спектром флуктуаций ионосферной плазмы.

Решение обратной задачи можно простроить, обратив прямую задачу рассеяния сигнала в ионно-акустической линии спектра. В рассматриваемом диапазоне высот 120–720 км доминирующую роль играют ионы атомарного кислорода. Это позволяет создать простую модель среды, в которой рассеивается сигнал — однородно распределенный по высоте набор ионов одного сорта. В первом приближении сигнал некогерентного рассеяния представляет собой сумму сигналов, отраженных от таких «рассеивателей». При этом каждый такой сигнал имеет случайную фазу, что обуславливает некогерентность процесса, а его частота и амплитуда распределены в соответствии со спектром рассеяния в холодной плазме. Мощность принимаемого сигнала в первую очередь зависит от концентрации электронов и фа-

зы, с которой приходит плоскость поляризации принимаемого сигнала. В прямую задачу ее можно ввести, как амплитудную модуляцию сигнала обратного рассеяния с помощью одного из экспериментально полученных профилей мощности.

Аналитическое описание спектра флуктуации диэлектрической проницаемости плазмы приведено в [Шеффилд, 1972].

Таким образом, сигнал обратного рассеяния можно представить в виде:

$$s(t) = \sum_h F(h) \sum_{n=0}^N S_{nh} e^{i(\omega_{nh}t + 2k_{nh}h + \varphi_{nh})} p\left(h - \frac{ct}{2}\right), \quad (1)$$

$F(h)$ — профиль мощности, S_{nh} (уравнение 2), ω_{nh} , k_{nh} — амплитуда, частота и волновое число спектра рассеяния плазмы для n -го иона и высоты h , φ_{nh} — случайная фаза рассеяния, p — форма зондирующего импульса.

Тогда усредненная АКФ реализаций сигнала обратного рассеяния примет вид:

$$\langle R(\tau, h) \rangle = \left\langle \sum_{t=\tau}^T \left\{ \sum_h \left[F^2(h) w(\tau, t, h, h) R_0(\tau, h) \right] \right\} \right\rangle,$$

где R_0 — обратное преобразование Фурье спектра флуктуаций плазмы. Первый этап решения обратной задачи и состоит в определении R_0 из уравнения (). В случае круговой поляризации сигнала функцию $F(h)$ можно считать константной, поэтому правая часть уравнения () превращается в свертку, которую можно обратить с помощью свойства преобразований Фурье. Однако в случае линейной поляризации сигнала представление данного выражения в виде свертки некорректно и является лишь грубым приближением. В данном исследовании используется менее грубое приближение: функция $R_0(\tau)$ считается слабо зависящей от высоты. Итак, решение обратной задачи приходит к виду:

$$R_0(\tau) = \frac{\langle R(\tau) \rangle}{W(\tau)}, \quad (2)$$

где

$$W(\tau) = \sum_{t=\tau}^T \times \left\{ \sum_h \left[F^2(h) p\left(h_1 - \frac{ct}{2}\right) p\left(h_2 - \frac{ct}{2} + \frac{c\tau}{2}\right) o(t) o(t-\tau) \right] \right\} \quad (3)$$

— весовая функция, которую в теории НР также называют функцией неопределенности []. Функция $W(\tau)$ — монотонно убывающая в положительной области τ , имеет максимум при $\tau=0$ и обращается в нуль при τ равной длительности зондирующего импульса.

Моделирование

Моделирование формирования сигнала обратного рассеяния проводилось в соответствии с постановкой прямой задачи (уравнение 3). Далее необходимо накопить несколько тысяч реализации квадратур сигнала, чтобы усреднить их автокорреляционные функции. Такая задача требует большой вычислительной мощности, в связи с чем для вы-

числений был использован вычислительный кластер «Академик В.М. Матросов» [http://hpc.icc.ru]. Параллеливание вычислений позволило добиться многократного ускорения работы модели.

После усреднения полученных АКФ можно применить уравнения 2 и 3 и сравнить значения заданных и восстановленных температур. На входе модели задавались линейные градиенты ионных и электронных температур, а также фарадеевские вариации мощности, экспериментально полученные на ИРНР. Входные данные модели и восстановленные температуры приведены на рис. 1.

Для статистической проверки алгоритма также проводилось моделирование методом Монте-Карло. Для каждых 300 реализаций квадратур сигнала случайным образом задавалось ядро псевдослучайной последовательности, на основе которой строилось распределение фаз «рассеивателей». Это также моделирует случай, когда время стационарности ионосферы меньше времени накопления реализаций сигнала. При тех же входных параметрах модели (см. рис. 1) восстановленные температуры повторяли заданный ход с относительно постоянной дисперсией.

На рис. 2 представлены профили характерных значений АКФ моделируемого сигнала для длительности импульса 700 мкс: a , b и c — соответственно, задержки первого нуля и первого минимума, а также амплитуда первого минимума действительной части АКФ до ее обращения уравнением 2; d , e и f — соответственно, задержки первого нуля и первого минимума, а также амплитуда первого минимума действительной части АКФ после ее обращения уравнением 4. Как видно из рисунков 2, b и c , заложенный фарадеевский профиль мощности искажает форму АКФ, внося характерные провалы в значения этих параметров. Однако и амплитуда функции неопределенности (уравнение 3) имеет похожие особенности, и в результате применения уравнения 2 восстанавливается градиент параметров, соответствующих заданным температурам (рис. 2, e , f). Слабое отличие поведения первого нуля АКФ, приведенного на рис. 2, a и d , косвенно говорит о справедливости принятого приближения, которое подразумевает мультипликативный характер решения обратной задачи.

Апробация разработанной методики восстановления температур на экспериментальных данных ИРНР

Разработанная методика определения температур была протестирована на экспериментальных данных ИРНР для 15 апреля 2016 г. Этот день пришелся на фазу восстановления геомагнитной бури 14 апреля, и поэтому характеризуется пониженной концентрацией электронов. При этих условиях плоскость поляризации сигнала вращается достаточно медленно, и в профиле мощности хорошо отслеживается только одно характерное замирание, что исключает различные случаи неопределенности, когда таких замираний несколько.

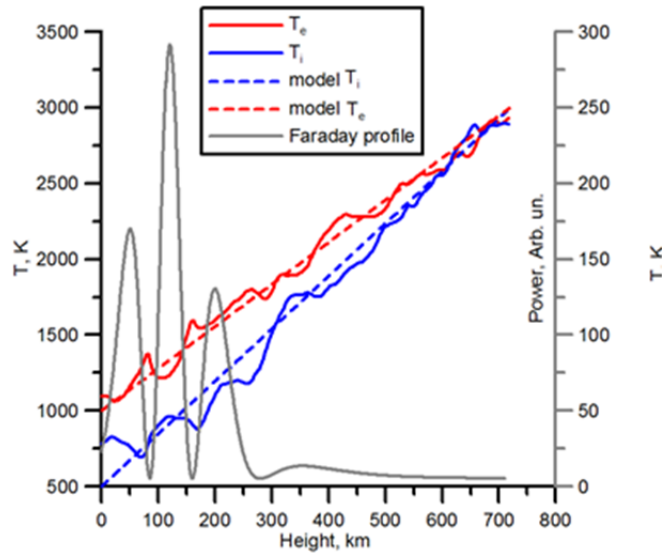


Рис. 1. Сравнение заданных и восстановленных моделью температур для характерного профиля фарадеевских вариации мощности ИРНР

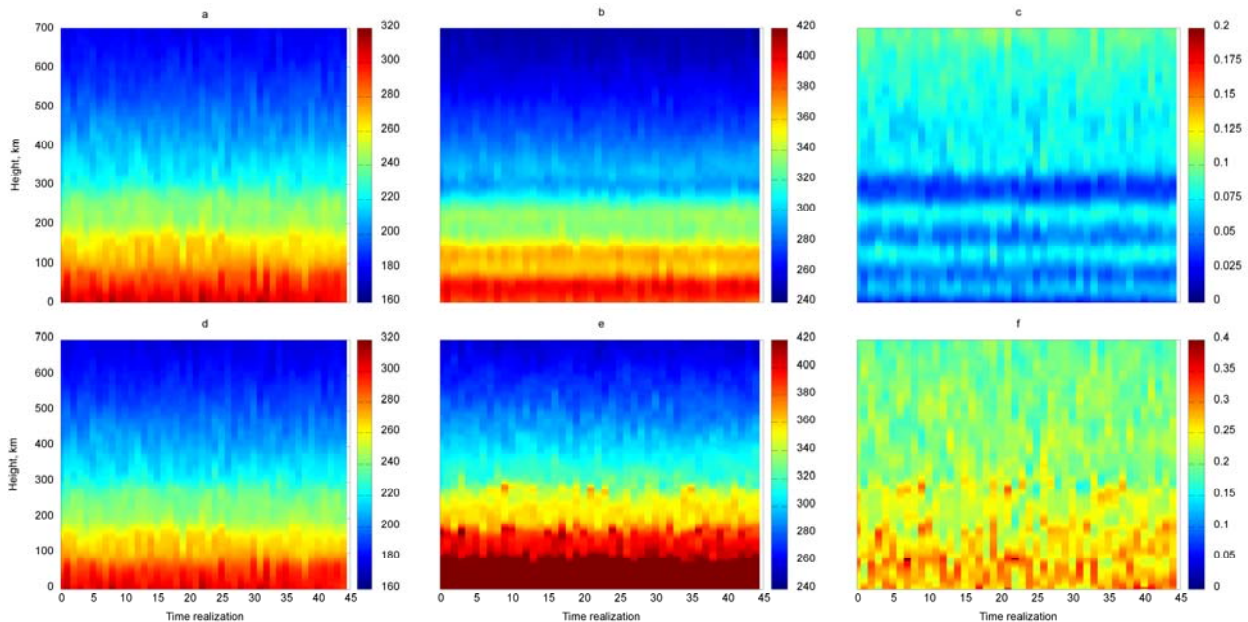


Рис. 2. a) – $\tau_0(<R(\tau)>)$; b) – $\tau_{\min}(<R(\tau)>)$; c) – $A_{\min}(<R(\tau)>)$; d) – $\tau_0(R_0(\tau))$; e) – $\tau_{\min}(R_0(\tau))$; f) – $A_{\min}(R_0(\tau))$

На рис. 3 приведены характерные амплитуды АКФ сигнала и весовой функции, с помощью которых определяется отношение температур T_e/T_i . Несмотря на то, что в амплитуде весовой функции ясно виден фарадеевский провал, аналогичный провалу амплитуды АКФ, данные структуры несколько отличаются как по форме, так и по фазе. В результате этого, ожидаемый высотный профиль температур не восстанавливается и содержит неестественные провалы. При этом перебор всех возможных значений константной фазы весовой функции не приводит к улучшению картины. Техническая ошибка исключена в результате проверки методики восстановления температур на модельных данных.

Проверка была проведена также на экспериментальных данных ИРНР для летних дней, когда количество фарадеевских замираний достаточно

велико, а их ширина меньше длительности импульса, что приводит к относительно слабому искажению полученных профилей температур вследствие эффекта Фарадея. Восстановленные значения температур в сравнении с концентрацией электронов для 11–15 июня 2015 г. приведены на рис. 4. При спокойных геомагнитных условиях ожидается плавный высотный градиент температур. Суточный ход полученных температур вполне соответствует ожидаемому ходу. Таким образом, исключив вероятные технические ошибки обработки данных, можно поставить задачу поиска других систематических погрешностей.

В результате анализа обработанных данных были построены гипотезы о существовании нескольких систематических погрешностей, не учитываемых ранее.

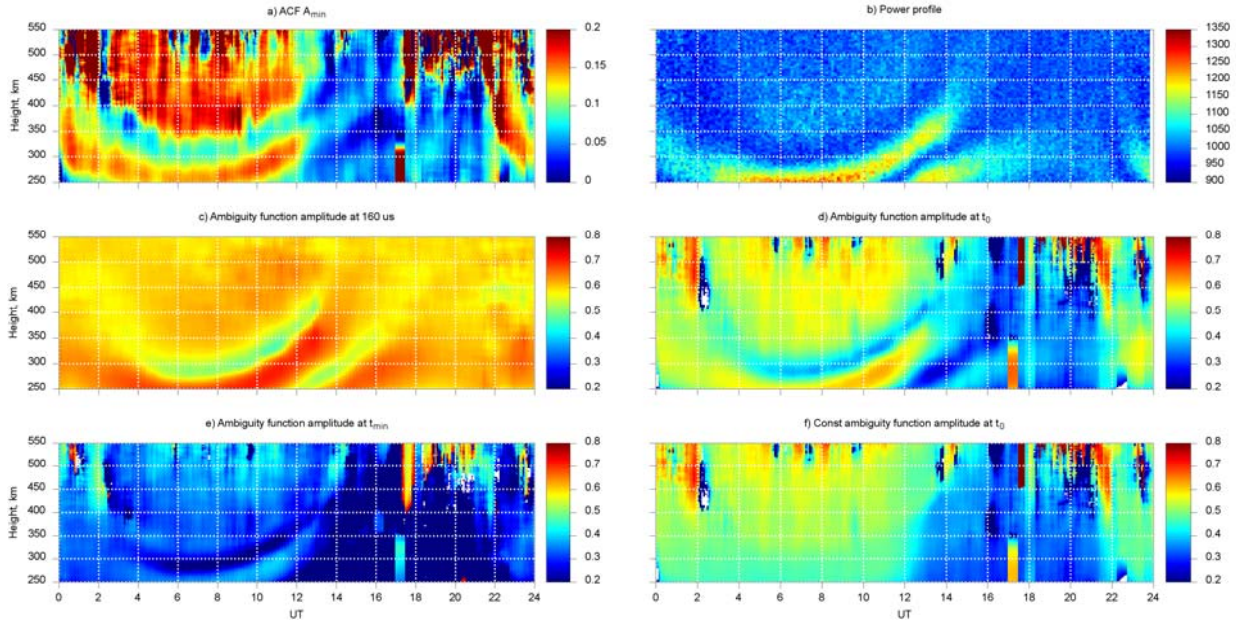


Рис. 3. Характерные величины, полученные экспериментально на ИРНР и необходимые для корректного восстановления ионных температур:

- a) Амплитуда первого минимума действительной части АКФ;
- b) Профиль мощности широкополосного сигнала (длительность импульса 200 мкс);
- c) Амплитуда функции неопределенности при $\tau=160$ мкс;
- d) Амплитуда функции неопределенности при τ , соответствующей первому нулю действительной части АКФ;
- e) Амплитуда функции неопределенности при τ , соответствующей первому минимуму действительной части АКФ;
- f) Амплитуда функции неопределенности для константного профиля мощности при τ , соответствующей первому нулю действительной части АКФ

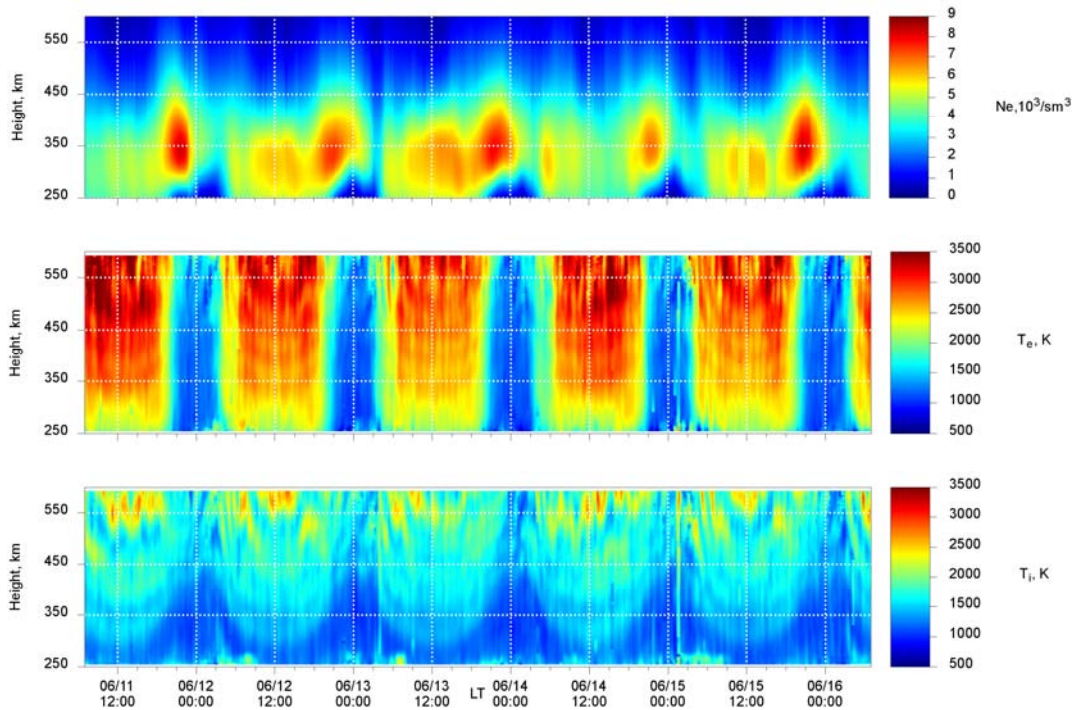


Рис. 4. Концентрация электронов, электронные и ионные температуры, полученные по данным ИРНР

1. Весовая функция построена некорректно вследствие неопределенности входных данных, т.е. профиля мощности широкополосного сигнала. Из-за слабой энергетики сигнала (длительность окна всего 30 км) на высотах выше 400 км перестают различаться фарадеевские вариации мощности сигнала, которые, безусловно, вносят свой вклад в АКФ.

Также уровень провалов мощности сигнала, строго говоря, может быть не нулевым и не постоянным по высоте.

2. Ошибка приближения, использованного для получения уравнения 2, которая возникает при сильном градиенте температур. Однако на основе описанной модели была протестирована работа ал-

горитма для различных градиентов температур. В каждом случае были восстановлены правильные значения температур.

3. Предполагается существования значительной когерентной составляющей сигнала обратного рассеяния для диапазона длин волн ИРНР ~ 2 м. Это приводит к существенному усложнению обратной задачи и ее решения. Метод идентификации когерентного вклада в сигнал обратного рассеяния и оценки его параметров находится в разработке.

Заключение

Для проверки корректности предложенной методики можно использовать данные ближайшего по широте к ИРНР радара HR — Миллстоун Хилл. Ожидается, что учет описанных выше систематических погрешностей и корректировка решения обратной задачи сведут к минимуму количество областей неопределенности и «белых пятен» в профилях восстанавливаемых температур. Разработанная методика решения обратной задачи на основе моделирования прямой задачи дает быстрый и информативный подход к развитию техник определения не только температур, но других важных параметров ионосферной плазмы, таких как скорость дрейфа плазмы, величины электрического поля, а также ионного состава. Это особенно актуально в перспективе строительства нового радара HR-МСТ.

Список литературы

Медведев А.В. Развитие методов и аппаратных средств радиофизических исследований верхней атмосферы Земли на Иркутском радаре некогерентного рассеяния: дисс. докт. физ.-мат. наук: 01.04.03. Иркутск, 2014. 225 с.

Потехин А.П., Медведев А.В., Заворин А.В. и др. Цифровые системы регистрации и управления Иркутского радара некогерентного рассеяния // Солнечно-земная физика. 2008А. № 11. С. 77–86.

Ташлыков В.П., Алсаткин С.С., Васильев Р.В., Щербаков А.А. Моделирование сигнала некогерентного рассеяния для ИРНР // Сборник трудов БШФФ-2013, Иркутск, 2013. 259 с.

Ташлыков В.П., Васильев Р.В., Медведев А.В., Щербаков А.А. Регрессионный метод определения температур по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния // Сборник трудов БШФФ-2015, Иркутск, 2015. 191 с.

Шеффилд Дж. Рассеяния электромагнитного излучения в плазме. АТОМИЗДАТ 1978. 129 с.

Шпынев Б.Г. Методы обработки сигналов некогерентного рассеяния с учетом эффекта Фарадея: дисс. канд. физ.-мат. наук. Иркутск, 2000. 122 с.