УДК 550.380
DOI: 10.12737/szf-101202409

Поступила в редакцию 12.11.2022
Принята к публикации 18.12.2023

МЕТОД ЭФФЕКТИВНЫХ ВЫЧИТАНИЙ: РАБОТА С ДАННЫМИ ИРКУТСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

EFFECTIVE SUBTRACTION TECHNIQUE: IMPLEMENTATION FOR IRKUTSK INCOHERENT SCATTER RADAR

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

С.С. Алсаткин
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, alss@iszf.irk.ru

А.В. Медведев
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, medvedev@iszf.irk.ru

К.Г. Ратовский
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, ratovsky@iszf.irk.ru

V.P. Tashlykov
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, vtashlykov@iszf.irk.ru

S.S. Alsatkin
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, alss@iszf.irk.ru

A.V. Medvedev
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, medvedev@iszf.irk.ru

K.G. Ratovsky
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, ratovsky@iszf.irk.ru

Аннотация. Метод эффективных вычитаний заключается в последовательном чередовании длительностей излученных импульсов во время измерений методом некогерентного рассеяния. Получаемый таким путем выигрыш в пространственном разрешении позволяет осуществить надежную оценку профиля электронной концентрации методом фарадеевских замираний. Рассмотрен метод измерения электронной концентрации в результате обработки узкополосных сигналов Иркутского радара некогерентного рассеяния, а также предложен автоматизированный метод определения электронной концентрации для задачи, в которой нельзя пренебречь сверткой мощности рассеянного сигнала с формой зондирующего импульса. Обратная задача восстановления электронной концентрации рассматривается как задача нелинейной оптимизации, и для ее решения используется метод последовательного применения алгоритмов глобальной и локальной оптимизации. Представлено сравнение значений электронной концентрации, полученных в результате анализа сигналов различных длительностей импульса, и данных Иркутского ионозонда.

Ключевые слова: Иркутский радар некогерентного рассеяния, метод эффективных вычитаний, электронная концентрация, эффект Фарадея, алгоритмы оптимизации.

Abstract. For incoherent scatter measurements, the effective subtraction technique is to alternate the duration of amplitude-modulated signals between a pair of consequently radiated pulses. The resulting gain of spatial resolution enables us to steadily assess the electron density profile by the Faraday rotation method. The paper describes the electron density measurement technique, which involves analyzing narrow-band signals from Irkutsk Incoherent Scatter Radar, and proposes an automated method of determining the electron density for the problem in which the convolution of the radiated signal waveform with backscatter signal cannot be neglected. The inverse problem of electron density recovery is considered as a standard nonlinear optimization problem, which is solved using the algorithms for global and local optimization applied consequently. We compare the electron density profiles obtained by analyzing different pulse waveforms and from Irkutsk ionosonde data.

Keywords: Irkutsk Incoherent Scatter Radar, effective subtraction technique, plasma density recovery, Faraday effect, optimization algorithms.

ВВЕДЕНИЕ

При подготовке экспериментальных наблюдений методом некогерентного рассеяния (НР) необходимо рассмотреть ряд условий, которые определяют, какие параметры ионосферной плазмы можно восстановить в результате анализа принятого сигнала и какие точность и разрешение они могут иметь. Большая часть таких условий учитывается еще в конструкции радара НР. Например, положение и конструкция антенной системы радара определяют пространственную конфигурацию эксперимента. Другие важные параметры, а именно, пространственное и спектральное разрешение, зависят от формы излученного сигнала и могут быть настроены для конкретной задачи. При этом для одиночного импульса излучения приходится находить компромисс между двумя видами разрешения. Однако существуют методики кодирования зондирующего сигнала [Farley, 1972; Lehtinen, Haggstrom, 1987], которые позволяют со-

хранить высокое спектральное и пространственное разрешение за счет некоторого усложнения методов обработки сигнала. Аналогичные характеристики можно получить путем чередования длительностей зондирующего импульса в соседних тактах излучения и последующего анализа соответствующих корреляционных профилей. Этот метод эффективных вычитаний (EST) был предложен в [Berngardt, Kushnarev, 2013]. Для его практического применения на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР) [Potekhin et al., 2009] был введен специальный режим, состоящий в чередовании трех различных зондирующих сигналов:

- фазоманипулированного сигнала в виде кода Баркера общей длительностью около 200 мкс (число элементов кода зависит от сезонного значения электронной концентрации);
- следующего за ним амплитудно-модулированного импульса длительностью ~700 мкс, излученного на другой частоте (с разницей 300 кГц): благодаря частотному принципу сканирования ИРНР главные лепестки диаграммы направленности ориентированы по-разному;
- амплитудно-модулированного импульса длительностью ~900 мкс, излученного в следующем такте.

При анализе профиля мощности используется фазоманипулированный широкополосный сигнал. После согласованной обработки этот сигнал имеет высокое пространственное разрешение, что позволяет оценить абсолютные значения профиля электронной концентрации методом фарадеевских замираний [Alsatkin et al., 2020]. Важно отметить, что диапазон рабочих частот ИРНР 154–162 МГц практически оптимален для фарадеевских измерений электронной концентрации на средних широтах [Farley, 1969]. Амплитудно-модулированные импульсы (узкополосные сигналы) используются для анализа корреляционных профилей и определения температур ионосферной плазмы. Однако EST позволяет получить профиль мощности с улучшенным пространственным разрешением и, следовательно, дает нам также дополнительную возможность провести оценку профиля электронной концентрации.

Для описания концепции EST рассмотрим усредненный элемент корреляционного профиля принятого сигнала

$$\overline{x(t)x^*(t+\tau)}, \tag{1}$$

где t — время начала приемного окна, форма которого идентична форме излученного импульса. Произведение огибающей функции излученного импульса и ее копии, сдвинутой на задержку τ, приводит к понятию функции неопределенности

$$W(r,t,\tau) = Q(t - rc/2)Q^*(t - rc/2 + \tau), \tag{2}$$

где $Q(t)$ — форма излученного сигнала; c — скорость света; r — дальность. Если принять, что импульсная характеристика приемной системы радара является дельта-функцией (приемная полоса ИРНР составляет 250 кГц), результирующее радиолокационное уравнение (РЛУ) для корреляционного профиля имеет вид

$$\overline{x(t)x^*(t+\tau)} \simeq \sum_r P_0(r) W(t,\tau)\sigma(r,\tau), \tag{3}$$

где $P_0(r)$ содержит эффекты ДН и условий распространения сигнала, включая вращение плоскости поляризации вследствие эффекта Фарадея; $\sigma(r, \tau)$ — корреляционная функция рассеянного в плазме сигнала, которая, в свою очередь, в первом приближении зависит от ионных и электронных температур и электронной концентрации. Согласно [Shpynev, 2001], РЛУ для профиля мощности можно представить в виде

$$\begin{aligned} |x(t)|^2 \simeq \sum_r 1/r^2 Q^2(t - rc/2)\cos\Omega(r) N_e(r)/ \\ /\left(1 + T_e(r)/T_i(r)\right), \end{aligned} \tag{4}$$

где $\Omega(r)$ — скорость вращения плоскости поляризации сигнала, которая пропорциональна интегралу электронной концентрации вдоль луча радара; N_e — электронная концентрация; T_e — температура электронов; T_i — температура ионов.

Технически функция неопределенности (2) дает оценку пространственного и спектрального разрешения. На рис. 1 представлены схема одного такта излучение–прием радара НР для эксперимента с одиночным импульсом и принцип формирования функции неопределенности для одиночного импульса и EST. Излученные в момент времени $t=0$ два импульса длительностями 700 и 900 мкс обеспечивают достаточное спектральное, но низкое пространственное разрешение (для импульса 700 мкс оно составляет 105 км). Разностный корреляционный профиль можно получить, вычитая из корреляционного профиля для импульса длительностью 900 мкс корреляционный профиль для импульса длительностью 700 мкс. При этом мы считаем ионосферу стационарной на протяжении всего времени интегрирования. Выбор только нулевой задержки из данного корреляционного профиля дает разностный профиль мощности, пространственное разрешение которого составляет 30 км, что соответствует длительности 200 мкс, тогда как отношение сигнал/шум постоянно для всех задержек коррекционного профиля более короткого импульса. Значительный недостаток EST заключается в уменьшении статистической точности анализа разностного сигнала, т. е. при низких значениях сигнал/шум его применение не оправдано.

Несмотря на это, EST имеет большой потенциал применительно к ИРНР вследствие технических особенностей радара. Его антенная система может принимать сигнал строго линейной поляризации, при этом возможен прием только одного из ортогональных сигналов. Это оставляет возможность восстановления абсолютных значений профиля электронной концентрации, но значительно усложняет анализ плазменных температур. Для ИРНР главным достоинством EST является тот факт, что точности измерений электронной концентрации и плазменных температур сопоставимы, конечно, при условии, что уровень отношения сигнал/шум достаточно высок. Таким образом, мы можем получить профили электронной концентрации независимо по данным широкополосного и узкополосных сигналов и затем сравнить их

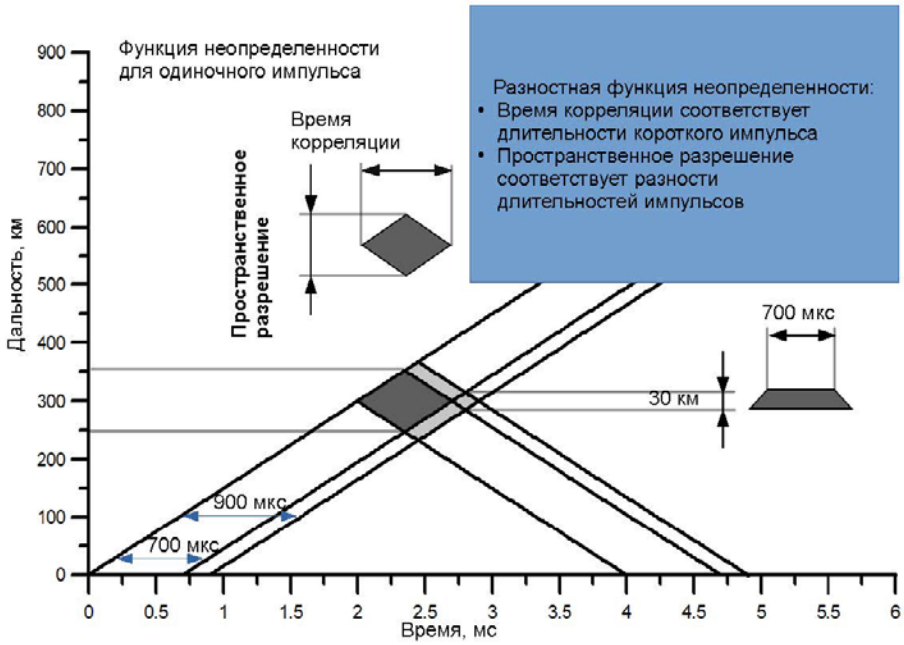

Рис. 1. Схема НР измерений для случая, когда длительность импульса чередуется от такта к такту

ключевые характеристики с данными Иркутского ионозонда [Alsatkin et al., 2020]. Метод корректной оценки температур ионосферной плазмы находится в стадии разработки, но все выводы для EST применительно к электронной концентрации будут справедливы и применительно к ионной и электронной температурам.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

При допущении, что эффекты деполяризации сигнала при рассеянии в среде отсутствуют, положение фарадеевских замираний на временной развертке принятого сигнала дает нам всю информацию, необходимую для оценки электронной концентрации. Для решения этой задачи, мы проводим регрессионный анализ полученного профиля мощности методом наименьших квадратов. Модельный профиль мощности, который подгоняется под экспериментальный, моделируется профилем электронной концентрации (см. (4)). Для поиска оптимальных параметров слоя Чепмена при анализе широкополосного сигнала проводится их полный перебор. Хотя фактор $Q(t-rc/2)$ в (4) также имеет место для широкополосного сигнала, сверткой мощности с формой изученного импульса можно пренебречь благодаря малой длительности сигнала (от 15 до 40 мкс для одного элемента кода Баркера). При этом в случае анализа EST (длительность 200 мкс) эффект свертки нельзя не учитывать, поэтому метод полного перебора параметров вряд ли применим из-за повышенной вычислительной стоимости задачи. Кроме того, потенциальное усложнение постановки прямой задачи, например, путем увеличения числа модельных параметров, вынуждает нас вести поиск более быстрых алгоритмов решения обратной задачи. В этой статье мы опишем подход, основанный на применении алгоритмов глобальной и локальной оптимизации (NLopt nonlinear-optimization package, [http://github.com/stevengj/nlopt]).

Обработка сигналов и их сопутствующий анализ проводятся следующим образом. После накопления корреляционных профилей все множество полученных данных (суточных измерений) можно разбить на независимые наборы данных, каждый из которых обрабатывается отдельным вычислительным потоком. Для каждого первого профиля мощности в таком наборе применяется алгоритм глобальной оптимизации, чтобы обеспечить сходимость к глобальному оптимуму решения задачи. Затем для каждого последующего профиля применяется локальный алгоритм оптимизации, начальные значения для которого задаются исходя из оптимального решения для предыдущего профиля. В случае двукратного увеличения оптимального значения целевой функции повторно запускается алгоритм глобальной оптимизации для текущего профиля. Такой подход обеспечивает временную преемственность полученных результатов и позволяет найти компромисс между временными затратами на вычисления и поиском решения задачи.

3. РАБОТА С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

По сравнению с полным перебором искомых параметров предложенный метод требует примерно в 1000 раз меньше итераций для алгоритма глобальной оптимизации и в 10000 раз меньше итераций для алгоритма локальной оптимизации. Важно учитывать, что вычислительная емкость анализа разностных профилей мощности выше из-за необходимости учета свертки в РЛУ. В качестве алгоритма глобальной оптимизации мы использовали улучшенную эволюционную стратегию стохастического ранжирования (Improved Stochastic Ranking Evolution

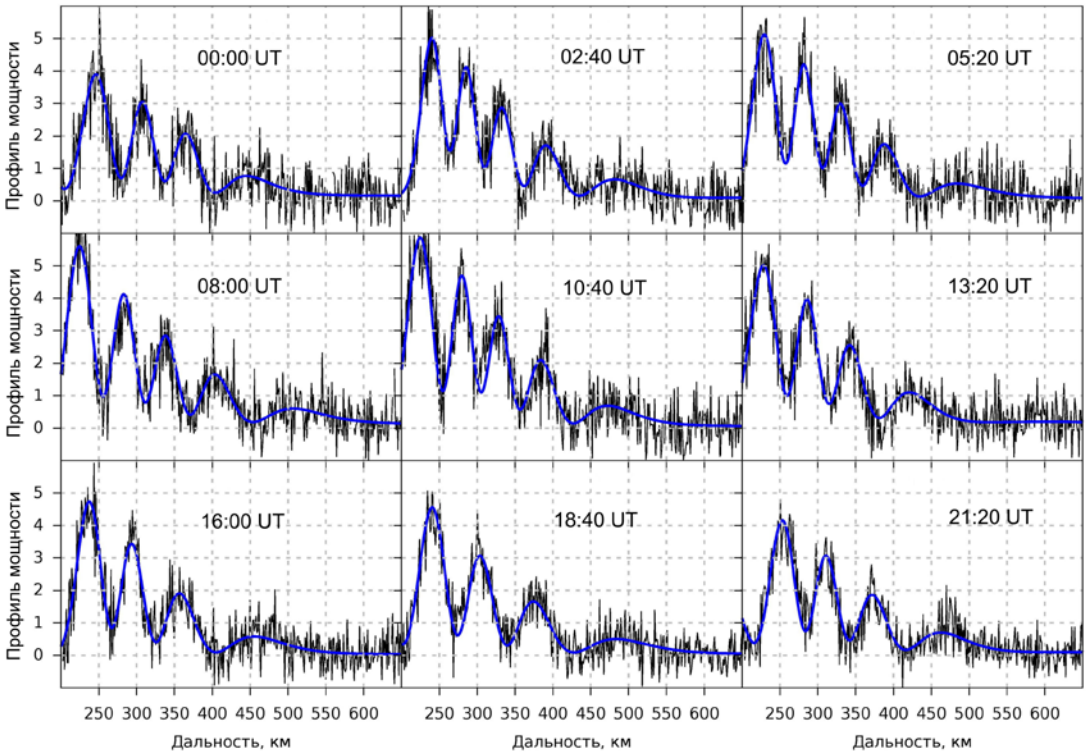

Рис. 2. Сравнение экспериментальных профилей разностной мощности (черным цветом [отн. ед.]) с модельными профилями мощности (синим цветом [отн.ед.]), полученными с применением метода наименьших квадратов для 05.06.2015

Strategy [Runarsson, Yao, 2000, 2005]), а в качестве локального — COBYLA (Constrained Optimization By Linear Approximations [Powell, 1994, 1998]). Эффективность обоих алгоритмов доказана на большом множестве оптимизационных задач, требующих жесткие ограничения на область поиска решений. Линейные ограничения на область поиска параметров Чепмена заданы эмпирически. Выбор данных алгоритмов также обусловлен возможностью задать ограничения в виде нелинейных равенств и неравенств, что важно в перспективе задач восстановления плазменных температур или электронной концентрации для E- и F1-слоев ионосферы. Описанный выше метод решения вполне может быть подстроен для этих задач. На рис. 2 показано сравнение экспериментальных и модельных профилей мощности для EST для различных моментов времени в течение суток и разных уровней сигнал/шум. Во всех случаях восстанавливаемый (модельный) профиль мощности удовлетворительно описывает полученные измерения.

На рис. 3 (две верхние панели) показано сравнение разностных профилей мощности (узкополосных сигналов) и модельных профилей, полученных путем регрессионного анализа. Используются данные 5 июня 2015 г., время накопления 5 мин. Предложенный подход обеспечивает стабильные решения даже в случае наличия помех от космических объектов (например, около 8 и 16 UT). В данном случае сигнал от помех значительно выходит за динамический диапазон полезного сигнала и поэтому высоты, содержащие эти помехи, были исключены в процессе регрессионного анализа (отмечены белым цветом). Алгоритм проявляет достаточную устойчивость, чтобы стабильно описывать временную динамику электронной концентрации, при этом каждый высотный профиль анализируется независимо. На двух нижних панелях рис. 3 электронная концентрация, полученная EST, сравнивается с данными Иркутского ионозонда. Хотя ионограммы не могут дать информацию о плазме на высотах выше максимума F2-слоя, результирующие профили электронной концентрации экстраполированы слоем Чепмена. Представленное сравнение дает качественное согласие между данными ИРНР и Иркутского ионозонда. Для количественного сравнения можно обратиться к рис. 4. Он показывает два ключевых параметра: высоту максимума F2-слоя и его значение, переведенное в масштаб плазменной частоты. Анализ узкополосного и широкополосных сигналов проводился независимо с применением различных методов обработки сигнала и решения обратной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод эффективных вычитаний, примененный на ИРНР, способен обеспечить достаточное пространственное разрешение для восстановления электронной концентрации методом фарадеевских замираний для сигналов с длительностями импульса свыше 700 мкс. Совместный анализ узкополосного и широкополосных сигналов может дать существенно больший объем информации, необходимой для восстановления электронной концентрации и увеличения точности ее оценок. Несмотря на значительно меньший уровень отношения сигнал/шум для разностного

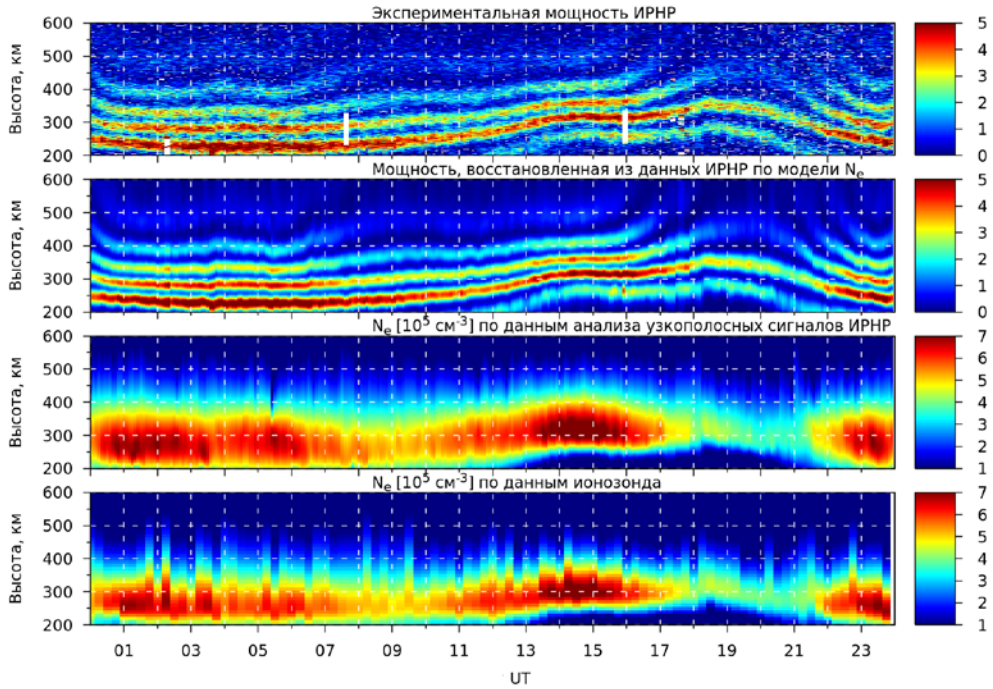

Рис. 3. Сверху вниз: разностная мощность, полученная путем вычитания мощностей узкополосных сигналов (с длительностями импульса 900 и 700 мкс); модельная мощность, полученная в результате регрессионного анализа; электронная концентрация по данным ИРНР; электронная концентрация по данным Иркутского ионозонда

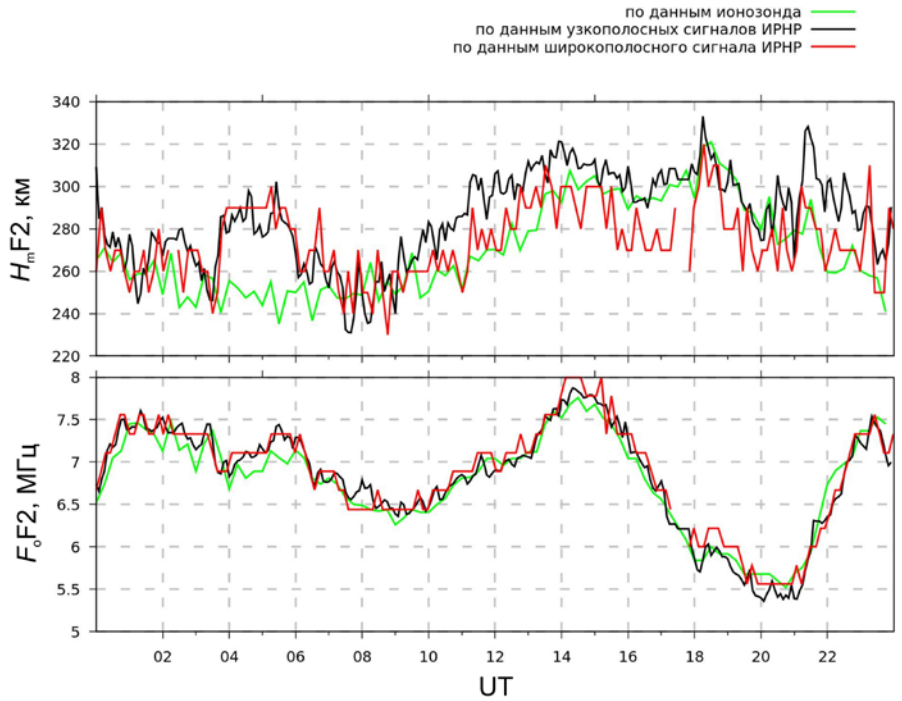

Рис. 4. Сравнение главных характеристик профилей электронной концентрации, полученных по данным ИРНР (при независимом анализе узкополосного и широкополосных сигналов), с данными Иркутского ионозонда

профиля мощности, используемые алгоритмы глобальной оптимизации находят решения, дающие качественное согласие с данными Иркутского ионозонда и данными ИРНР, полученными независимо в другом приемном канале. Путем подходящего чередования длительностей импульсов можно повысить статистическую точность измерений, сохранив время интегрирования.

Используемые алгоритмы оптимизации для решения обратной задачи восстановления электронной концентрации показывают высокую надежность в условиях, когда необходим точный учет функции неопределенности, что относится к любым сигналам (в том числе кодам) с относительно большой длительностью. Они также применимы для задач с большим количеством параметров, если нужна более

точная оценка параметров ионосферной плазмы. Предложенный подход к решению обратной задачи может быть применен и в задаче определения ионных и электронных температур, где необходимы нелинейные ограничения на поиск оптимальных параметров. Алгоритм совместного анализа различных параметров плазмы на основе регрессионного анализа полного профиля в настоящий момент находится в стадии разработки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00146 [https://rscf.ru/project/22-17-00146/] в части разработки метода обработки данных и анализа полученных результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в части проведения наблюдений. В работе использовались данные измерений Уникальной научной установки «Иркутский радар некогерентного рассеяния» [http://ckp-rf.ru/usu/77733/].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Alsatkin S.S., Medvedev A.V., Ratovsky K.G. Features of Ne recovery at the Irkutsk Incoherent Scatter Radar. *Solar-Terr. Phys*. 2020. Vol. 6. P. 77–88. DOI: 10.12737/stp-61202009.

Berngardt O.I., Kushnarev D.S. Effective subtraction technique at the Irkutsk Incoherent Scatter Radar: Theory and experiment. *J. Solar-Terr. Phys.* 2013. Vol. 105-106. P. 293–298. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.03.023.

Farley D.T. Faraday Rotation Measurements Using Incoherent Scatter. *Radio Sci*. 1969. Vol. 4, iss. 2. P. 143–152.

Farley D.T. Multiple pulse incoherent scatter correlation function measurements. *Radio Sci.* 1972. Vol. 7, iss. 6. P. 661–666.

Lehtinen M.S., Haggstrom I. A new modulation principle for incoherent scatter measurements. *Radio Sci.* 1987. Vol. 22, iss. 4. P. 625–634.

Potekhin A.P., Medvedev A.V., Zavorin A.V., et al. Recording and control digital systems of the Irkutsk Incoherent Scatter Radar. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009. Vol. 49, P. 1011–1021.

Powell M.J.D. A direct search optimization method that models the objective and constraint functions by linear interpolation. *Advances in Optimization and Numerical Analysis*. 1994. P. 51–67. DOI: 10.1007/978-94-015-8330-5_4.

Powell M.J.D. Direct search algorithms for optimization calculations. *Acta Numerica*. 1998. Vol. 7. P. 287–336. DOI: 10.1017/S0962492900002841.

Runarsson T.P., Xin Yao. Stochastic ranking for constrained evolutionary optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation.* 2000. Vol. 4, iss. 3. P. 284–294. DOI: 10.1109/4235.873238.

Runarsson T.P., Xin Yao. Search biases in constrained evolutionary optimization. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews). 2005. Vol. 5, iss. 2. P. 233–243. DOI: 10.1109/TSMCC.2004.841906.

Shpynev B.G. Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization. *Radio Sci*. 2001. Vol. 39, iss. 3. DOI: 10.1029/2001RS002523.

URL: http://github.com/stevengj/nlopt (дата обращения 12 октября 2022 г.).

URL: https://rscf.ru/project/22-17-00146/ (дата обращения 12 октября 2022 г.).

URL: http://ckp-rf.ru/usu/77733/ (дата обращения 12 октября 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Ташлыков В.П., Алсаткин С.С., Медведев А.В., Ратовский К.Г. Метод эффективных вычитаний: работа с данными Иркутского радара некогерентного рассеяния. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 1. С. 68–73. DOI: 10.12737/szf-101202409.