

А.П. Бондаренко¹
 М.М. Дюжева²
 А.О. Жуков³
 В.Б. Оводенко⁴
 В.В. Трекин⁵

A.P. Bondarenko
 M.M. Dyuzheva
 A.O. Zhukov
 V.B. Ovodenko
 V.V. Trekin

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ
 ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА
 НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЙЯНИЯ
 ДЛЯ ТЕКУЩЕЙ ОЦЕНКИ ПОЛНОГО
 ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ЗОНЕ
 ОТВЕТСТВЕННОСТИ РЛС ДО⁶**

**THE EVALUATION OF POSSIBILITY
 OF USING THE INCOHERENT SCATTERING
 METHOD FOR THE CURRENT ESTIMATION
 OF THE TOTAL ELECTRONIC CONTENT
 IN THE RADAR ZONE OF RESPONSIBILITY**

В статье рассмотрено возможное направление модификации метода некогерентного рассеяния (НР). Видоизменение указанного метода НР обусловлено необходимостью оперативной оценки некоторых параметров среды распространения (в частности, ПЭС) в интересах учета и компенсации текущего состояния условий распространения с целью повышения качества траекторных измерений РЛС ДО. Необходимость рассмотрения реализации такого подхода обусловлена некоторыми ограничениями реализованного на РЛС ДО метода коррекции модели среды распространения на базе информации GPS/ГЛОНАСС-приемника, расположенного в районе дислокации указанной РЛС. В материалах статьи рассматриваются ограничения данного метода, а также проводится

The possible direction of the modification of the non-coherent scattering (HP) method is considered in the article. The modification of this HP method is conditioned by the need to promptly evaluate certain parameters of the propagation environment (in particular, the PES) in order to take into account and compensate for the current state of propagation conditions in order to improve the quality of the trajectory measurements of the radar. The necessity to consider the implementation of this approach is due to some limitations of the method of correcting the propagation model on the basis of GPS/GLONASS information located in the area of the radar station deployed on the radar. The materials of the article discuss the limitations of this method, and also evaluate the possibility of using the radar DOs for the operational measurement of the total

¹ Кандидат технических наук, главный научный специалист, открытое акционерное общество «Научно-производственный комплекс «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи» (ОАО «НПК «НИИДАР»).

© Бондаренко А.П., 2017.

² Научный сотрудник, Научно исследовательский испытательный центр (г. Москва) Центрального научно-исследовательского института войск воздушно-космической обороны Министерства обороны Российской Федерации (НИИЦ (г. Москва) ЦНИИ ВВКО МО РФ).

© Дюжева М.М., 2017.

³ Доктор технических наук, доцент, Институт астрономии РАН, ГАИШ МГУ, Аналитический центр, ведущий научный сотрудник Института астрономии РАН, старший научный сотрудник ГАИШ МГУ, профессор ФГБНУ «Аналитический центр».

© Жуков А.О., 2017.

⁴ Кандидат технических наук, начальник отдела, открытое акционерное общество «Научно-производственный комплекс «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи» (ОАО «НПК «НИИДАР»).

© Оводенко В.Б., 2017.

⁵ Доктор технических наук, доцент, Научно исследовательский испытательный центр (г. Москва) Центрального научно-исследовательского института войск воздушно-космической обороны Министерства обороны Российской Федерации (НИИЦ (г. Москва) ЦНИИ ВВКО МО РФ).

© Трекин В.В., 2017.

⁶ Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (№ НШ-6831.2016.8).

оценка возможности использования РЛС ДО по оперативному измерению полного электронного содержания на базе видоизмененного метода некогерентного рассеяния. Приведены предварительные результаты такой оценки.

Ключевые слова: радиолокационная станция дальнего обнаружения, метод некогерентного рассеяния, полное электронное содержание.

Одним из методов, обеспечивающих оперативную корректировку детерминированной модели ионосферы в интересах решения задачи компенсации влияния среды распространения, является использование информации КА глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Известно, что по характеристикам принятых сигналов навигационных КА диагностируется состояние ионосферы и тропосферы вдоль трассы распространения сигнала, что позволяет исследовать морфологию естественных и искусственных возмущений полного содержания электронов [1]. Однако наличие неравномерности пребывания навигационных КА данных систем по времени и пространству в зоне ответственности РЛС ДО, имеющей большие пространственные размеры (до 120° по азимуту, до 70° по углу места и большой протяженности по дальности [2]), а также наличие сбоев в работе навигационных КА в периоды геомагнитных возмущений [3] требует поиска дополнительных решений по оперативной оценке параметров среды распространения.

Проведенный анализ показывает, что в исследованиях ионосферы и термосферы наиболее информативным наземным средством их диагностики является метод некогерентного рассеяния (НР), который дает возможность получать в диапазоне высот 90 – 1000 км пространственно-временные распределения сразу нескольких параметров ионосферной плазмы (электронную концентрацию, скорость дрейфа температуры электронов и ионов и др.).

Однако радары НР, являясь наиболее информативным средством исследований верхней атмосферы, одновременно являются и наиболее дорогостоящими из всех наземных диагностических установок. Для реализации метода НР нужны большой энергетический потенциал и высокая чувствительность. В существующих радары НР используются передатчики с мощностями в несколько мегаватт, крупные антенные системы,

имеющие коэффициент усиления ~ 40 дБ и более, приемные системы с низким уровнем шума, применяются самые современные технологии управления, обработки информации и хранения данных [4].

Keywords: early detection radar, incoherent scattering method, total electronic content.

имеющие коэффициент усиления ~ 40 дБ и более, приемные системы с низким уровнем шума, применяются самые современные технологии управления, обработки информации и хранения данных [4].

На рис. 1 и 2, соответственно, представлены распределения частотных диапазонов и пиковых мощностей, используемых в радары некогерентного рассеяния. Как следует из данных рисунков, частотный диапазон, используемый в РЛС ДО, и потенциал станции позволяют реализовать на РЛС ДО режим некогерентного рассеяния. Существенным препятствием этому является достаточно большое время определения высотного хода электронной концентрации на трассе «РЛС ДО – среда распространения – цель» для последующей оценки влияния среды распространения и корректировки модели среды в зоне ответственности на не охваченных КА ГНСС азимутальных направлениях.

Так, например, высотный профиль изменения концентрации электронов, представленный на рис. 3, был получен усреднением примерно 50 000 эхо-сигналов для каждой высоты [5], что накладывает существенные ограничения на оперативность проведения предполагаемой корректировки модели ионосферы с использованием метода НР.

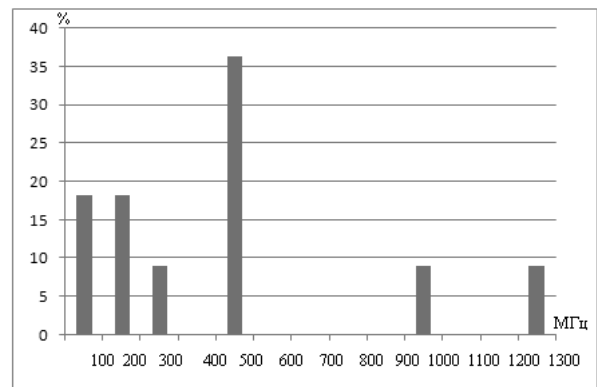


Рис. 1. Распределение частот, используемых в радары НР

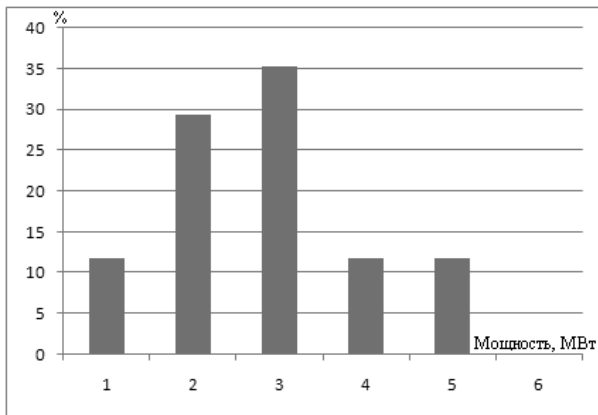


Рис. 2. Распределение пиковой мощности действующих радаров НР

Рассмотрим возможность реализации метода НР с использованием технического потенциала РЛС ДО.

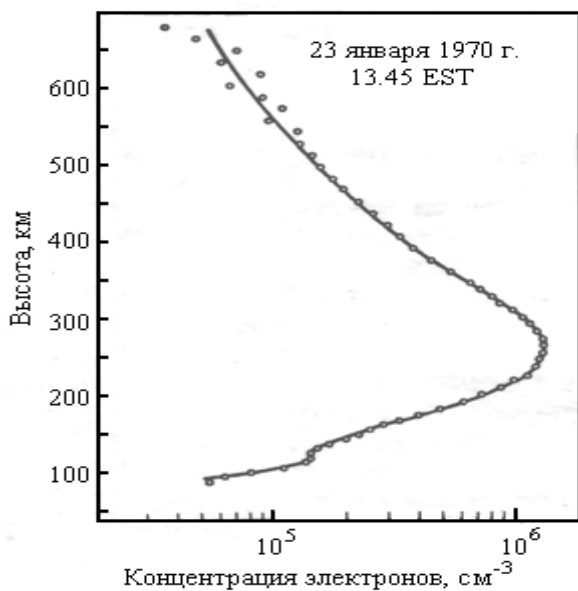


Рис. 3. Пример высотного профиля электронной концентрации, измеренного над Милстон-Хилл на волне 68 см

Как показано в [6], величина отраженной мощности P_s , измеренной на выходе приемной антенны, находится из выражения

$$P_s = \frac{P_t L N \sigma c \tau \lambda^2}{128 \pi^3 R^2} \iint G^2(\beta, \varepsilon) \sin \beta d\beta d\varepsilon \quad \text{Вт},$$

где P_t – максимальная мощность передатчика (Вт); L – коэффициент потерь, учитывающий омические потери в линиях передачи приемника и передатчика; N – электронная концентрация (значение ее предполагается постоянным в высотном интервале $c\tau/2$, занимаемом импульсом); σ – эффективное по-

перечное сечение рассеяния электрона¹; c – скорость света; τ – длительность импульса; R – расстояние до рассеивающего объема и $G(\beta, \varepsilon)$ – коэффициент усиления антенны по сравнению с изотропной (β и ε характеризуют ширину диаграммы направленности в азимутальной и угломестной плоскостях), λ – длина волны. Поскольку $G(0)$ и эффективная площадь антенны $A_{\text{эфф}}(0)$ связаны соотношением $G(0) = 4\pi A_{\text{эфф}}(0)/\lambda^2$, то вышеприведенное уравнение для P_s можно записать в виде [6]:

$$P_s = \left[\frac{0,76 P_t A_{\text{эфф}} L c \tau}{16 \pi} \right] \left[\frac{N \sigma}{R^2} \right] \text{Вт}.$$

Для расчета рассеянной мощности при облучении ионосферы радиолокатором вводят понятие импульсного объема $V_{\text{и}}$ и эффективной площади рассеяния этого объема – $\sigma_{\text{и}}$.

Импульсный объем $V_{\text{и}}$ определяется из следующего выражения:

$$V_{\text{и}} = c \tau / 2 * R^2 * \Delta \Omega,$$

где τ – длительность импульса, R – расстояние до рассеивающего объема; $\Delta \Omega$ – угловой растров диаграммы направленности антенны в стереadians (если ширина диаграммы направленности по азимуту и углу места равна 2β и 2ε соответственно, то $\Delta \Omega = \pi \beta \varepsilon$).

Отсюда $\sigma_{\text{и}}$ будет равна:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{c \tau}{2} R^2 \Delta \Omega \sigma_{\text{и}} N.$$

Тогда мощность рассеяния, принимаемая радиолокационной станцией, согласно приведенным выше уравнениям, будет равна [7]:

$$P_s = \frac{\sigma_{\text{и}} P_t G A_{\text{эфф}}}{(4 \pi R^2)^2} = \frac{c \tau \Delta \Omega \sigma_{\text{и}} N P_t G A_{\text{эфф}}}{2 (4 \pi R)^2}.$$

Из этого уравнения видно, что если известны все входящие в него справа множители, за исключением N , то по мощности принятого сигнала можно определить концентрацию электронов N .

Таким образом, для реализации метода некогерентного рассеяния требуется большая мощность излучения, хорошие характеристики пространственного разрешения (узкая диаграмма направленности по угловым координатам и достаточно короткая длительность излучаемого импульса) и применительно к рассматриваемым средствам РЛС ДО – незначительные временные затраты на получение информации об уровне электронной концентрации. Однако если первые два условия (большая мощность излучения и хорошее пространственное разрешение) обеспечиваются техническими характеристиками

¹ Радиолокационное поперечное сечение рассеяния одного электрона $\sigma \varepsilon = 4 \pi r \varepsilon^2$, где $r \varepsilon = 2,8 * 10^{-15}$ м – радиус классического электрона.

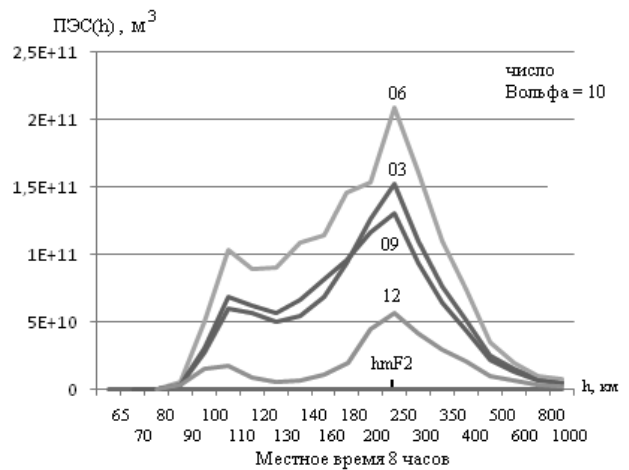
РЛС ДО, то время получения информации во всем диапазоне высот ионосферы (в первом приближении до 2000 км), как показывает анализ работы станций некогерентного рассеяния, может составлять единицы минут для одного фиксированного направления. Для оценки значения электронной концентрации на базе метода некогерентного рассеяния во всей зоне ответственности РЛС ДО может потребоваться, в зависимости от числа направлений, – до десятка минут. Это ставит под серьезное сомнение целесообразность использования данного метода в полном объеме в штатном режиме работы станции.

В связи с этим были разработаны методические основы использования указанного метода на базе РЛС ДО, основанные на взаимосвязи критической частоты области F ионосферы и полного электронного содержания (ПЭС).

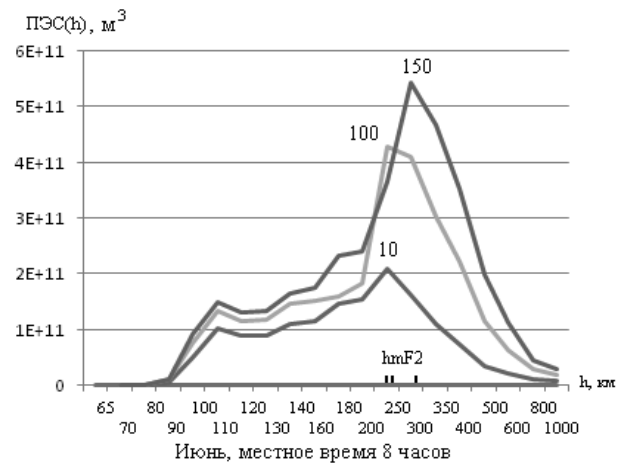
В основу были положены результаты предварительного анализа вклада областей ионосферы в значение ПЭС, который показал, что область F ионосферы вносит наибольший вклад в значение ПЭС. При этом параметр ПЭС достаточно точно отслеживает состояние F области ионосферы – изменение критической частоты этой области – f_0F_2 . Коэффициент корреляции ПЭС и f_0F_2 в зависимости от времени суток и сезона составлял величину 0,9 и более [8; 9]. Последующая обработка экспериментальных данных позволила получить функциональную эмпирическую зависимость среднего значения f_0F_2 от ПЭС и напрямую рассчитывать это значение при знании значения ПЭС и наоборот. На рис. 4 приведены дифференциальные значения ПЭС в зависимости от высоты, которые показывают, что для всего спектра сезонной составляющей (рис. 4а) и уровня солнечной активности (4б) максимальный вклад в общее значение ПЭС дает область F ионосферы. На рис. 5 приведены значения f_0F_2 , полученные методом вертикального зондирования и рассчитанные с помощью рассмотренного подхода оценки критической частоты области F ионосферы. В нашем случае значение f_0F_2 определялось из эмпирически полученного выражения

$$f_0F_2 = \frac{\text{ПЭС}}{2.088 + 0.0447 * \text{ПЭС}}.$$

Данное обстоятельство и полученная зависимость позволяют решить и обратную задачу: по известному (измеренному, в том числе и методом некогерентного рассеяния) значению f_0F_2 можно оперативно оценить значение ПЭС.



а)



б)

Рис. 4. На рисунке а) цифрами обозначены порядковые номера месяцев года, а на рисунке б) – уровни солнечной активности в числах Вольфа.

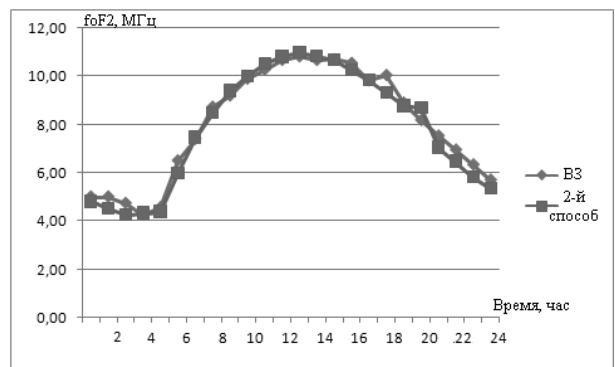


Рис. 5. Суточный ход f_0F_2 , полученной методом ВЗ и с использованием выражения 1

На рис. 6 приведено суточное распределение отклонения значения f_0F_2 , полученного рассмотренным выше методом от значения f_0F_2 , полученное методом вертикального зондирования.

ния на станции Калининград. Как и следовало ожидать, наибольшие отклонения характерны для периодов наиболее динамичного изменения электронной концентрации в F области ионосферы: в восходные и заходные часы.

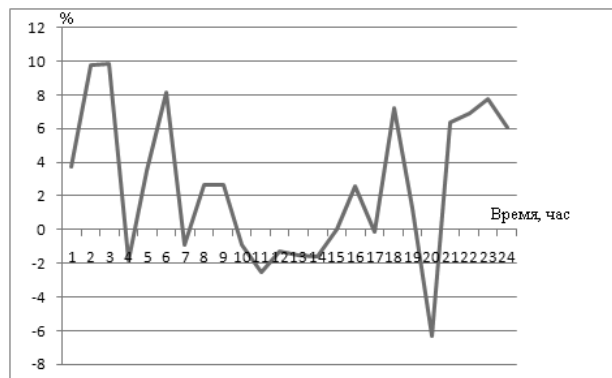


Рис. 6. Ошибка сравнения значения $f_0F_{2,}$ полученной методом ВЗ и с использованием выражения 1.

Для проверки точности определения значения f_0F_2 данным методом, по отношению к методу, основанному на корректировке модели ионосферы по текущим значениям ПЭС, рассчитанным на основе обработки сигналов GPS/ГЛОНАСС-приемников, были получены распределения ошибок текущей оценки f_0F_2 с помощью разных методов по отношению к значению f_0F_2 , полученных с помощью метода ВЗ. На рисунке 7 приведены распределения указанных ошибок. Там же для сравнения приведены ошибки определения f_0F_2 , полученные на основе нескорректированной эмпирической модели ионосферы IRI.

Ряд 1 соответствует распределению ошибки сравнения данных о критической частоте $f_0F_{2,}$ полученной методом ВЗ с $f_0F_{2,}$ полученной методом коррекции модели ионосферы IRI по текущим данным ПЭС на базе информации КА ГНСС (метод 1), ряд 2 – данные ВЗ сравнивались с данными, полученными путем пересчета ПЭС в значение f_0F_2 (метод 2), а ряд 3 – данные ВЗ сравнивались с данными не корректируемой эмпирической модели IRI (метод 3).

Приведенные результаты показывают практическое совпадение данных оперативно корректируемой модели ионосферы (методы 1 и 2) с результатами измерений методом ВЗ. Проверка адекватности по критерию Фишера показала, что отношение дисперсий ошибок метода 1 и метода 2 составляют 1,527 (табличное 1,98), а отношение дисперсий ошибок метода 1 и ошибок не корректируемой модели ионосферы (метод 3) составило 9,86 против табличного значения 1,98 при 90% уровне значимости. Полученные дан-

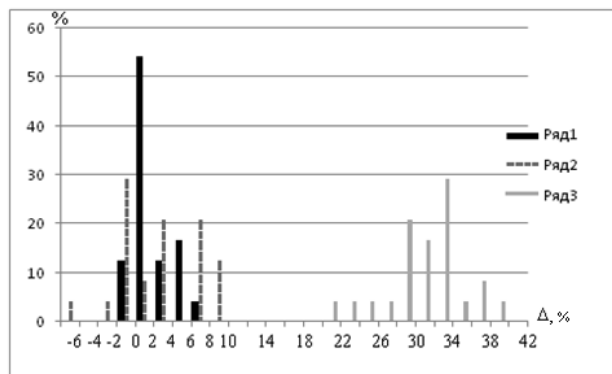


Рис. 7. Распределение ошибок (Δ) оценки $f_0F_{2,}$ полученной разными методами (см. текст)

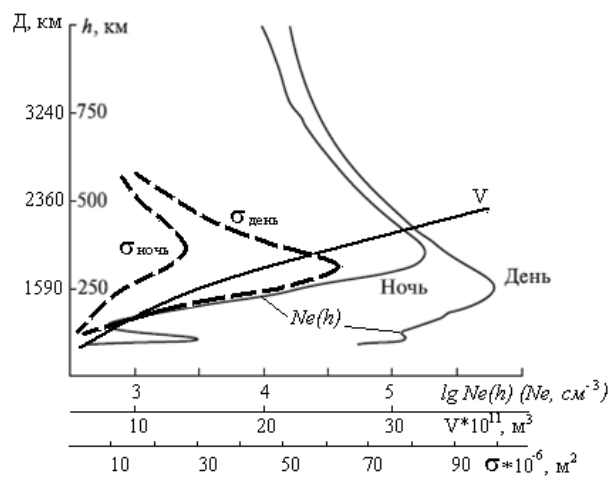


Рис. 8. Зависимость объемной ЭПР от высоты (V – импульсный объем для типовых азимутально-угломестных характеристик главного луча диаграммы направленности РЛС ВЗГ-ДМ и разрешения по дальности $\Delta R = 380$ м).

ные говорят об адекватности методов 1 и 2 и метода ВЗ, как основного при определении $f_0F_{2,}$ и неадекватности по отношению к ним некорректируемой модели ионосферы.

Таким образом, проведенный анализ показал, что можно с некоторой потерей точности, учитывая максимальный вклад области F_2 в интегральное содержание N (полное электронное содержание (ПЭС) или ТЕС), основное внимание при использовании метода НР на РЛС ДО сосредоточить на измерении электронной концентрации в области максимума области F . С этой целью была определена оптимальная высота измерения N_e с учетом изменения импульсного объема в главном луче диаграммы направленности РЛС ДО и высотного хода электронной концентрации $N_e(h)$, на которой объемная ЭПР имеет максимальное значение (и соответственно для определения N_e потребуются наименьшее время накопления при использовании метода НР). Результаты анализа приведены на рисунке 8, где $\sigma_{\text{день}}$ и $\sigma_{\text{ночь}}$ – значения объемной ЭПР для

дневных и ночных условий соответственно. Из рисунка следует, что оптимальная высота измерения N_e (максимального значения объёмной ЭПР) практически совпадает с максимумом F области ионосферы.

Таким образом, порядок определения ПЭС в направлении на лоцируемую цель следующий. На основании оценки мощности рассеянного сигнала P_s определяется текущее значение электронной концентрации в F области ионосферы:

$$N_e = \frac{4P_s(4\pi R)^2}{c\tau\Delta\Omega\sigma_e P_t G A_{эфф}}$$

Далее, используя полученное значение N_e и выражение $N_e [см^{-3}] = 12400 \cdot f^2 [МГц]$, рассчитывают значение плазменной частоты f (в нашем случае f_0F_2). Затем, исходя из зависимости ПЭС от f_0F_2 , осуществляется расчет значения полного электронного содержания.

Полученное значение ПЭС может быть использовано для корректировки используемой эмпирической модели при оценке траекторных ошибок.

В табл. 1 представлено значение числа импульсов, необходимых для реализации метода НР на РЛС ДО для разного уровня ее потенциала, а также ожидаемые временные затраты на их накопление (с учетом возможного штатного режима работы РЛС ДО) при текущей локации одной цели с использованием типичных характеристик РЛС ДО [2].

Данные значения были получены для типовых значений дневной и ночной электронной концентрации: $4,5 \cdot 10^{11}$ эл/м³ и $4,5 \cdot 10^{10}$ эл/м³ и дальности до максимума области F ионосферы порядка 2000 км. Импульсный объем рассчитывался для типовой диаграммы направленности РЛС ДО [2] для ширины спектра излучаемого импульса 350 кГц. При этом энергия количества принимаемых и некогерентно накапливаемых импульсов должна превысить порог обнаружения (в нашем случае 20 дБ).

Для оценки возможности одновременного использования импульсов от целей, находящихся в азимутальном секторе, равном или мень-

шем радиуса пространственной корреляции, был проведен анализ распределения целей реального космического фона в зоне ответственности РЛС ДО [10] на временном интервале, не превышающем минимальный радиус временной корреляции изменения параметров ионосферы (в нашем случае он был взят равным 3 минутам). На рис. 9 приведено азимутальное распределение целей в зоне ответственности РЛС ДО, из которого следует, что число некогерентно накапливаемых импульсов от области F ионосферы в ряде азимутальных направлений может быть увеличено в несколько раз (например, на азимуте 50° – в 11 раз, на азимуте –10° – в 10 раз). При этом, если учитывать цели, находящиеся в области, ограниченной пространственным радиусом корреляции по уровню 0,95, что примерно соответствует 500 км (или 20-градусному сектору по азимуту), то для рассматриваемых условий локации максимума области F в дневное время число импульсов может увеличиться. Это увеличение будет составлять, например, для сектора –20° ÷ –10° – в 17 раз, а для сектора 40° ÷ 50° – в 16 раз. Данное обстоятельство позволяет сократить время некогерентного накопления и повысить оперативность определения ПЭС в интересах текущей коррекции используемой региональной модели в контуре траекторной обработки РЛС ДО.

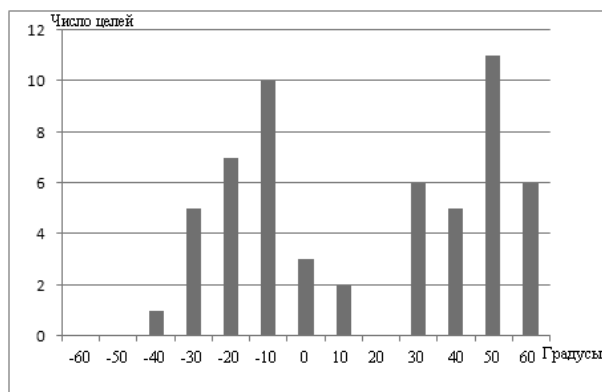


Рис. 9. Распределение числа целей в зоне ответственности РЛС ДО по азимуту на интервале 3 минуты

Таблица 1

**Оценка числа импульсов
и времени некогерентного накопления**

Потенциал РЛС ДО, дБ	День, $N_e=4.5 \cdot 10^{11}$ эл/м ³		Ночь, $N_e=4.5 \cdot 10^{10}$ эл/м ³	
	Число импульсов	Время накопления, с.	Число импульсов	Время накопления, с.
30	3.2382e+07	1.4402e+04	3.2382e+09	1.4402e+06
60	32.3820	0.0144	3.2382e+03	1.4402

Таким образом, разработанные методические положения использования метода некогерентного рассеяния в рабочем режиме РЛС ДО позволяют с определенной точностью, превышающей точность, достигаемую при использовании нескорректированной эмпирической модели, оценивать текущие параметры среды распространения с последующим использованием их для коррекции данных траекторной обработки. При этом наиболее целесообразным, с точки зрения минимизации временных затрат, использование метода некогерентного рассеяния должно дополнять другие методы в периоды, когда происходят сбои в работе GPS/ГЛОНАСС-приемников, и/или когда информации указанных приемников не хватает на равномерное покрытие в азимутальном измерении всей зоны ответственности РЛС ДО (или в области линейной интерполяции и «сшивки» информации указанных приёмников и используемой математической модели) [11].

Литература

1. Скрипачев В.О., Большаков В.О. Эксперименты по диагностике плазменных возмущений в трубке магнитного силового поля Земли над станцией «Сура» по сигналам навигационных космических аппаратов // *Космонавтика и ракетостроение*. – 2010. – № 1 (58). – С. 87–92.
2. Гозюмов Г.И. Обзор состояния и развития работ по американским системам и средствам предупреждения о ракетно-ядерном ударе и воздушном нападении (по материалам зарубежной печати за 1992–1993 гг.), МАК «Вымпел», (ГОНТИ), 1994.
3. Ушаков И.И. Сбои при измерениях фазового и группового запаздывания сигналов GPS во время геомагнитных возмущений : дис. / Иркутский военный авиационный инженерный институт. – Иркутск, 2004. – 170 с.
4. Rottger, J. The instrumental principles of MST radars and incoherent scatter radars and the configuration of radar system hardware // *Handbook for MAP*. – 1989. – Vol. 30. – P. 54–113.
5. Evans, J.V. and Loewenthal, M. // *Ionospheric backscatter observations* // *Planet. SpaceSci.* – 1964. – Vol. 12. – Pp. 915–944.
6. Evans, J.V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar // *Proc. Jeee.* – 1969. – V. 57. – № 4.
7. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. – М. : Сов. радио, 1972.
8. Афраимович Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006.
9. Mosert, M., Ezquer, R., SanMigueldeTucuman. Relations between critical frequency f_0F_2 and total electron content // *Proceeding soft the IRI Task Force Activity*. – 2001. – Pp. 95–201.
10. Жуков А.О., Зубарев А.Н., Оводенко В.Б., Тютин И.В., Трекин В.В. Особенности условий функционирования РЛС в высоких широтах // *Радиотехника*. – 2016. – № 10. – С. 153–158.
11. Скрипачев В.О., Пирхавка А.П., Полушковский Ю.А., Суровцева И.В., Жуков А.О., Яковлев О.В. Аспекты создания информационной системы для обработки ионосферных данных // *Современные информационные технологии и ИТ-образование. Фонд содействия развитию интернет-медиа, ИТ-образования, человеческого потенциала «Лига интернет-медиа» (Москва)*. – 2015. – Т. 2. – № 11. – С. 316–320.