

УДК 621.396.98

В.П. Деденок¹, Ю.В. Резников¹, Д.В. Карлов¹, М.Ф. Пичугин¹,
Н.М. Степаненков², М.Н. Журавский³

¹ Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

² Командование Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины, Винница

³ Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОГО КАНАЛА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАДИОПЕЛЕНГОВАНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ СЕАНСОВ СВЯЗИ В КОРТКОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

В работе рассматриваются вопросы определения местоположения источников радиоизлучения и организации каналов связи в коротковолновом диапазоне. Проанализированы особенности распространения волн в ионосфере и предложена методика оценивания ее параметров на основе измерений глобальных спутниковых систем навигации. Приведены результаты практического использования предложенной методики для задач пеленгования, а также намечены пути развития проведенных исследований.

Ключевые слова: радиопеленгация, ионосфера, глобальные спутниковые навигационные системы.

Введение

Постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций. Одной из особенностей распространения волн в коротковолновом (КВ) диапазоне (3...30 МГц) является отражение от слоев ионосферы, что является основой для создания систем связи между объектами находящимися на существенных расстояниях, вне прямой видимости друг от друга. По такому принципу построены мобильные системы радиосвязи наземного, авиационного и морского базирования, станции передачи метеопрогнозов, системы дипломатической связи, системы связи подразделений специального назначения.

Данные системы являются альтернативой соотв. системам связи в районах, где использование последних либо невозможно, либо экономически нецелесообразно. Кроме того, КВ системы являются, как правило, автономными, обеспечивая независимость от местной коммуникационной инфраструктуры.

Наряду с системами связи эффект отражения сигналов от ионосферы нашел широкое применение в задачах определения местоположения КВ источников радиоизлучения (ИРИ).

Как правило, для решения таких задач используются многопозиционные системы, осуществляющие расчет значений координат положения ИРИ по всем точкам пересечения линий пеленгов (рис. 1).

Несмотря на достаточно высокие характеристики точности местоопределения ИРИ такой подход требует организации сети пеленгаторов и каналов связи между ними, что сказывается на мобильности и оперативности оценки положения.

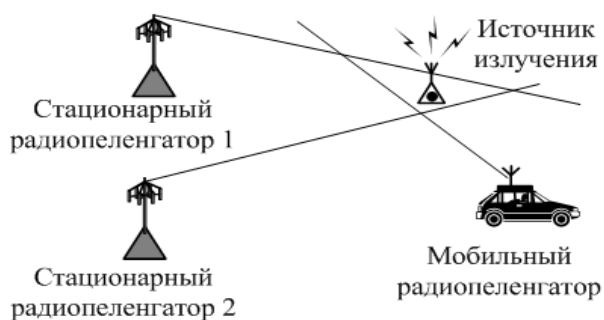


Рис. 1. Определение местоположения ИРИ методом триангуляции

Значительно упростить определение положения передатчика позволяет метод SSL (single station location), не требующий триангуляции, что позволяет определять местонахождение ИРИ только одной станцией. Данный метод предполагает определение азимута и угла места отраженного от ионосферы радиосигнала, что позволяет на основе знания параметров ионосферы рассчитать траекторию луча и вычислить местоположение ИРИ.

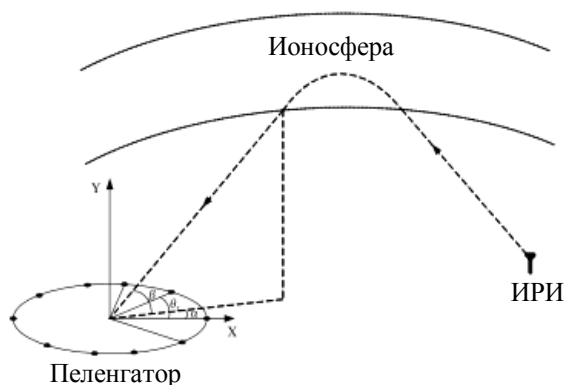


Рис. 2. Радиопеленгация методом SSL

По такому же принципу может быть организовано планирование сеансов дипломатической и военной связи для реализации оптимального взаимного расположения приемника и передатчика с точки зрения минимизации мощности передаваемого сигнала и обеспечения максимальной скрытности.

Кроме эффекта отражения КВ сигналов, ионосфера оказывает существенное влияние на распространение радиоволн в диапазоне ультракоротких волн, в значительной степени искривляя траектории сигналов.

В частности, учет этого влияния, позволяет в несколько раз повысить точность позиционирования потребителей глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС).

Таким образом, при решении широкого круга задач связи, пеленгации, навигации возникает необходимость оценки параметров ионосферы.

Как правило, ионосфера представляется в виде пространственно-временных моделей регулярной составляющей электронной концентрации [1].

Входной информацией данных моделей являются координаты, а также набор коэффициентов, полученных в результате обработки и обобщения накопленных экспериментальных данных, что устанавливает жесткие ограничения на соответствие данных моделей физике ионосферных процессов.

Поэтому целью данной статьи является разработка подхода к оцениванию параметров ионосферы при котором, в отличие от известных, для расчета используются измерения ГНСС, что позволяет адаптировать модель ионосферы к реальному состоянию и существенно повысить качество решения задач пеленгования и планирования сеансов КВ связи.

Изложение основного материала

Экспериментальные исследования и прямые измерения параметров ионосферы во всем мире ведутся достаточно давно с использованием различных радиофизических методов. Наиболее предпочтительным с точки зрения экономических затрат, глобальности и оперативности получения первичных данных (измерений) о состоянии ионосферы является использование в качестве средств измерения характеристик ионосферы сети наземных многочастотных приемников ГНСС (рис. 3) [2].

Организация приема и обработки сигналов на нескольких частотах наземными пунктами дает возможность получения оценок задержки сигнала в ионосфере (ионосферной задержки) и связанной с ней интегральной электронной концентрации:

$$\hat{\tau}_{и\,ji} = \frac{\hat{\tau}_{1\,ji} - \hat{\tau}_{2\,ji} + \Delta_{12}}{1 - \gamma}, \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{f_1^2}{f_2^2},$$

где $\hat{\tau}_{и\,ji}$ – время задержки сигнала в ионосфере на трассе j -навигационный космический аппарат (НКА) – i приемник ГНСС;

Δ_{12} – межчастотное смещение,

f_1, f_2 – частоты навигационных сигналов.

$$\hat{N}_{ji} = \hat{\tau}_{и\,ji} \cdot \frac{C \cdot f_1^2}{K}, \quad K = 40,3 \text{ м}^3 / \text{с}^2, \quad (2)$$

где \hat{N}_{ji} – полное электронное содержание (ПЭС) на трассе;

C – 299 792 458 м/с.

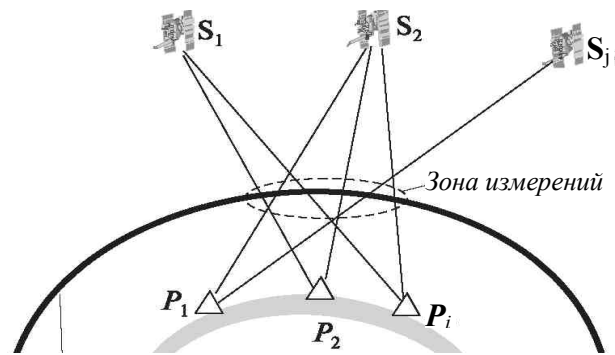


Рис. 3. Получение ионосферных данных с использованием сигналов ГНСС

Представим ионосферную задержку как сумму регулярной и флуктуационной составляющих, и учитывая, что при получении оценок $\hat{\tau}_{и\,ji}$ привносится дополнительная шумовая погрешность, модель оценки ионосферной задержки может быть представлена в виде:

$$\hat{\tau}_{и\,ji} = \tau_{и\,р\,ji} + \tau_{и\,ф\,ji} + \xi_{ji}, \quad (1)$$

где $\tau_{и\,р\,ji}$ – значение регулярной составляющей ионосферной задержки;

$\tau_{и\,ф\,ji}$ – значение флуктуационной составляющей;

ξ_{ji} – шумовая составляющая.

Представим в виде вектора \hat{Y} совокупность оценок ионосферных задержек $\hat{\tau}_{и\,ji}$, полученных от всех приемников ГНСС ($i = \overline{1, I}$) по всем наблюдаемым НКА ($j = \overline{1, J}$) (также здесь может быть использовано накопление измерительной информации по времени), т.е.

$$\hat{\bar{Y}} = |y_1, y_2, \dots, y_n| = |\hat{\tau}_{i11}, \hat{\tau}_{i21}, \hat{\tau}_{i22}, \dots, \hat{\tau}_{iji}, \dots, \hat{\tau}_{iJ1}|, \quad (2)$$

$$n = \overline{1, N}, \quad N = J \cdot I.$$

Тогда в векторном виде модель совокупности наблюдений примет вид:

$$\hat{\bar{Y}} = \bar{Y}_p + \bar{Y}_\phi + \bar{\xi}, \quad (3)$$

где \bar{Y}_p – вектор значений регулярной составляющей ионосферной задержки;

\bar{Y}_ϕ – вектор значений флуктуационной составляющей;

$\bar{\xi}$ – вектор шумов измерения.

Пусть с точностью до некоторых параметров $\bar{\Theta}$ известна модель регулярной составляющей ионосферы $F(\phi, \lambda, h, t / \bar{\Theta})$, позволяющая каждой точке с планарными координатами (ϕ, λ) , высотой h и временем t сопоставить значение электронной концентрации $\hat{n}_e(\phi, \lambda, h, t / \bar{\Theta})$.

В этом случае выражение для расчета значений ПЭС вдоль трассы распространения навигационного сигнала l от точки расположения i -го навигационного приемника l_1 до точки j -го НКА l_2 имеет вид:

$$N_{ji}(\phi, \lambda, h, t / \bar{\Theta}) = \int_{l_1(\phi_i, \lambda_i, h_i, t_i / \bar{\Theta})}^{l_2(\phi_j, \lambda_j, h_j, t_j / \bar{\Theta})} \hat{n}_e(\phi, \lambda, h, t / \bar{\Theta}) dl. \quad (4)$$

В результате каждому измеренному значению ионосферной задержки $\hat{\tau}_{iji}$ на трассе j -й НКА $\rightarrow i$ -й приемник ГНСС можно сопоставить модельное интегральное значение регулярной составляющей электронной концентрации ионосферы

$$N_{ji}(\phi, \lambda, h, t / \bar{\Theta}) = N_{ji}(\bar{\Theta}),$$

известное до параметров $\bar{\Theta}$.

Тогда векторная модель регулярной составляющей ионосферной задержки (модельный аналог вектора \bar{Y}_p) может быть представлена как:

$$\bar{F}(\bar{\Theta}) = |N_1(\bar{\Theta}), N_2(\bar{\Theta}), N_n(\bar{\Theta}), \dots, N_N(\bar{\Theta})|. \quad (5)$$

С учетом этого модель наблюдений (3) примет вид:

$$\hat{\bar{Y}} = \bar{F}(\bar{\Theta}) + \bar{Y}_\phi + \bar{\xi}. \quad (6)$$

Относительно вектора суммы шумовой и флуктуационной составляющей измерений может

быть принята модель нормального коррелированного процесса с нулевым средним и ковариационной матрицей $\mathbf{K}_{\bar{Y}}$.

С учетом принятых предположений плотность вероятности вектора наблюдений \bar{Y} имеет вид многомерного нормального распределения:

$$P\left(\frac{\bar{Y}}{\bar{\Theta}}\right) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \cdot (\Delta)^{-1/2} \times \exp\left\{-\frac{1}{2}[\bar{Y} - \bar{F}(\bar{\Theta})]^T \mathbf{K}_{\bar{Y}}^{-1} [\bar{Y} - \bar{F}(\bar{\Theta})]\right\}, \quad (7)$$

где Δ – определитель матрицы $\mathbf{K}_{\bar{Y}}$;

n – число элементов в векторе \bar{Y} ;

$\bar{\Theta}$ – вектор неизвестных параметров регулярной составляющей ионосферной задержки.

В этом случае оценки максимального правдоподобия вектора неизвестных параметров находятся из условия

$$\min_{(\bar{\Theta})} \left\{ \left[\hat{\bar{Y}} - \bar{F}(\hat{\bar{\Theta}}) \right]^T \cdot \mathbf{K}_{\hat{\bar{Y}}}^{-1} \cdot \left[\hat{\bar{Y}} - \bar{F}(\hat{\bar{\Theta}}) \right] \right\}. \quad (8)$$

С учетом анализа различных информационных источников [1, 2], в качестве модели регулярной составляющей предлагается использовать модель IRI, которая позволяет получать наиболее достоверные оценки электронной концентрации $\hat{n}_e(\phi, \lambda, h, t / \rho)$, определяемые положением заданной точки (ϕ, λ, h, t) и среднемесячным значением числа Вольфа ρ .

Такой подход позволяет получать усредненные значения электронной концентрации, не зависящие от реальных ионосферных процессов. Поэтому, учитывая, что наибольший вклад в ионизацию ионосферы вносит солнечная энергия, предлагается принять число Вольфа в качестве неизвестного параметра и оценивать его на основе представленного выше подхода по измерениям ГНСС.

Если в выражении (8) принять, что шумовая и флуктуационная составляющие являются некоррелированными шумами с постоянными дисперсиями, выражение для оценки числа Вольфа принимает следующий вид:

$$\min_{\rho} \left[\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \left(\hat{\tau}_{iji} - F(\rho)_{ji} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Применение на практике модели IRI с использованием информации ГНСС при решении задачи пеленгации КВ источника [3] (рис.4) показывает уменьшение погрешности определения дальности до ИРИ на 25% по сравнению с общепринятой методикой расчета.

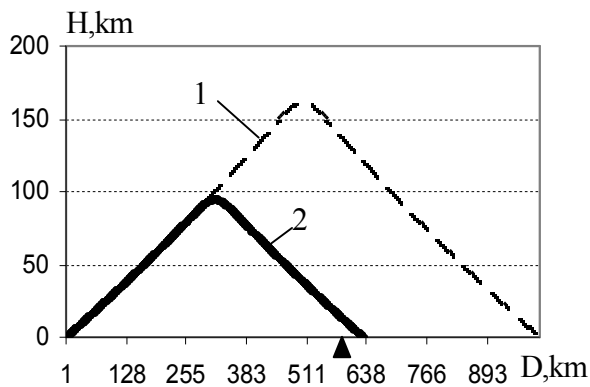


Рис. 4. Восстановленная траектория радиоволны при описании распределения электронной концентрации моделью IRI с использованием среднемесячных (1) и оцененных значений (2) числа Вольфа

«Платой» за повышение точности расчета дальности при использовании модели IRI является значительное увеличение вычислительных затрат, что, однако, не является существенным препятствием на современном уровне развития средств вычислительной техники.

Выводы

Таким образом, сформулированы основные подходы к решению задачи оценивания распределения электронной концентрации ионосферы в ходе получения текущих (первичных) измерений наземной аппаратуры ГНСС, позволяющие существенно повысить точность решения задач пеленгации КВ диапазона.

Кроме того, предложенный подход позволяет организовать оптимальное размещение приемопередающей аппаратуры при организации сеансов дипломатической связи.

Дальнейшим направлением развития данной области может быть исследование пространственно-временных возможностей получения ионосферных данных наземной группировкой приемников глобальных спутниковых навигационных систем.

Кроме того, могут быть рассмотрены вопросы относительно выбора модели ионосферы и определения набора неизвестных параметров принимая во внимание характер конкретной решаемой задачи.

Список литературы

1. Черняков С.М. Создание адаптивной модели ионосферы на основе данных по полному электронному содержанию / С.М. Черняков // Сб. науч. труд. физ.-мат. факультета Мурманского государственного педагогического университета. – Мурманск: МГПУ, 2003. – С. 80-106.
2. Деденок В.П. Мониторинг возмущений в локальной пространственно-временной области ионосферы по данным сети станций приема спутниковых радионавигационных сигналов / В.П. Деденок, А.А. Ткаченко, В.Н. Дейнеко, Ю.В. Резников // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17, № 6. – С. 68-73.
3. Деденок В.П. Анализ погрешностей определения дальности до наземного источника радиоизлучений, связанных с принятой моделью распределения электронной концентрации ионосферы / В.П. Деденок, А.А. Ткаченко, С.М. Власик // Системи обробки інформації. – X: XV ПС. – 2008. – Вип. 5 (72). – С. 54-56.

Поступила в редколлегию 29.04.2015

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. В.А. Василец, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ІОНОСФЕРНОГО КАНАЛУ ПРИ ВИРІШЕННІ ЗАВДАНЬ РАДІОПЕЛЕНУВАННЯ ТА ПЛАНУВАННЯ СЕАНСІВ ЗВ'ЯЗКУ В КОРОТКОХВИЛЬОВОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

В.П. Деденок, Ю.В. Резников, Д.В. Карлов, М.Ф. Пічугін, М.М. Степаненков, М.М. Журавський

У роботі розглядаються питання визначення місця розташування джерел радіовипромінювання і організації каналів зв'язку в короткохвильовому діапазоні. Проаналізовані особливості поширення хвиль в іоносфері та запропонована методика оцінювання її параметрів на основі вимірів глобальних супутникових систем навігації. Приведені результати практичного використання запропонованої методики для завдань пеленгації, а також намічені шляхи розвитку проведених досліджень.

Ключові слова: радіопеленгація, іоносфера, глобальні супутникові навігаційні системи.

METHOD OF ESTIMATION OF IONOSPHERE CHANNEL PARAMETERS AT THE DECISION OF TASKS RADIODIRECTION FINDINGS AND PLANNING OF CONNECTION SESSIONS IN A SHORT-WAVE RANGE

V.P. Dedemok, Yu.V. Reznikov, D.V. Karlov, M.F. Pichugin, M.M. Stepanenkov, M.M. Shuravskiy

The questions of position-fix of sources of radio emission and organization of ductings of connection are in-process examined in a short-wave range. The features of distribution of waves are analysed in an ionosphere and the method of estimation of its parameters is offered on the basis of measurements of the global satellite systems of navigation. The results of the practical use of the offered method are resulted for the tasks of direction-finding, and also the ways of development of the conducted researches are set.

Keywords: radiodirection findings, ionosphere, global satellite navigation system.