

Т. О. МЫСЛИВЦЕВ, В. М. ГУСАКОВ, А. П. АЛЕШКИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ В КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВОЛНЫ

Рассматриваются вопросы моделирования измерений навигационных параметров в коротковолновых радиолокационных системах пространственной волны. Предлагается для наиболее точного описания связи пространства измерений и пространства состояний радиолокационных объектов использовать метод траекторных расчетов совместно с корректируемыми моделями ионосферы. Показано, что для определения вектора измерений эффективным инструментом являются методы эмпирической оптимизации.

Ключевые слова: коротковолновые радиолокационные станции, метод траекторных расчетов, ионосферная модель.

Введение. Одним из важнейших направлений современных исследований в области радиолокации является разработка новых и совершенствование существующих коротковолновых радиолокационных систем пространственной волны (далее — РЛС). Такие системы позволяют существенно увеличить дальность обнаружения и сопровождения радиолокационных объектов, скрытых за линией горизонта [1, 2].

Принцип действия РЛС пространственной волны основан на эффекте обратного рассеяния сигналов наклонного зондирования земной поверхностью. Современные образцы таких систем, как правило, имеют бистатическую структуру построения с разнесением передающей и приемной позиций на 100—150 км. Рабочий диапазон волн составляет 3 — 30 МГц, а максимальная дальность действия ограничивается однокачковой трассой (около 3000 км), что позволяет осуществлять оптимальный контроль изменения ионосферных параметров за счет использования сети станций ионосферного мониторинга, расположенных в области отражения радиоволн от ионосферы.

Значительная дальность действия таких систем и возможность контроля больших площадей позволяют осуществлять обнаружение и сопровождение надводных и воздушных объектов в условиях, когда применение других радиотехнических средств невозможно либо ограничено во времени.

Основные особенности и проблемы коротковолновой радиолокации заключаются в следующем [3]:

— необходимо постоянно выбирать оптимальную рабочую частоту в зависимости от состояния ионосферы и дальности до радиолокационного объекта; параметры ионосферы существенно изменяются в пространстве и времени в течение сезонно-суточного цикла: это требует использования почти всего декаметрового диапазона, что, в свою очередь, создает существенные трудности при проектировании приемных и передающих антенных систем;

— работа РЛС происходит в сложных условиях помех, так как декаметровый диапазон загружен сигналами различных радиостанций и промышленными помехами;

— в тракте приема присутствует мощный сигнал, отраженный от земной поверхности, который может превышать сигнал, отраженный от объекта, на 60 дБ.

Основными радиофизическими проблемами, которые необходимо исследовать применительно к коротковолновой радиолокации, являются: закономерности распространения радиоволн декаметрового диапазона в ионосферном канале; свойства неорганизованных активных и пассивных помех; оценивание эффективной поверхности отражения объекта.

Ввиду сложности перечисленных проблем необходимо применять как теоретические, так и экспериментальные методы исследований в целях определения эффективности использования данных РЛС по назначению.

Конечной целью использования РЛС пространственной волны является определение вектора состояния объекта с заданными точностными характеристиками, поэтому, кроме указанных выше проблем, стоящих перед разработчиками РЛС декаметрового диапазона, существует проблема создания эффективных алгоритмов вторичной обработки радиолокационной информации.

Система обработки радиолокационной информации функционирует в условиях воздействия целого ряда случайных факторов, учет которых затруднителен при проведении аналитического исследования. Поэтому для анализа эффективности работы таких систем необходимо проведение статистического моделирования, функциональная схема которого приведена на рис. 1.

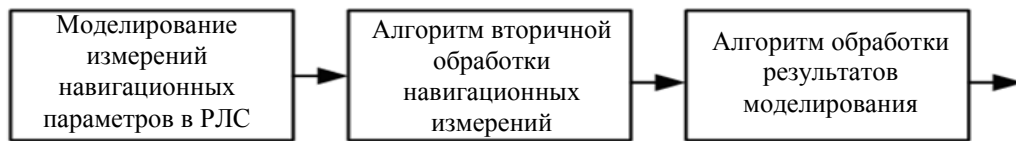


Рис. 1

Необходимо отметить, что создание и реализация эффективных алгоритмов вторичной обработки для современных РЛС пространственной волны представляет собой сложную задачу и не является предметом рассмотрения в данной статье.

Особенности моделирования измерений навигационных параметров. В измерениях, проводимых радиолокационной системой пространственной волны (в простейшем случае это азимут, задержка сигнала и доплеровское смещение частоты или радиальная скорость объекта), присутствуют все виды ошибок, характерных для надгоризонтных РЛС. Однако существенная особенность этих измерений в такой системе заключается в перераспределении веса ошибок. Основным источником погрешностей для систем дальнего обнаружения является ионосфера. Ее нестабильность и нестационарность приводят к тому, что практически невозможно определить функциональную зависимость той или иной ошибки измерений. Постоянное изменение группового пути распространения сигнала, вызванное вариациями плотности концентрации электронов в ионосфере на различных частотах декаметрового диапазона, приводит к значительным погрешностям определения задержки сигнала, отраженного от объекта. Восходно-заходные градиенты концентрации электронов оказывают сильное влияние на изменение азимута поступления сигнала. Наличие в ионосфере перемещающихся ионосферных возмущений различных масштабов приводит к погрешностям определения доплеровского смещения частоты и радиальной скорости, которые могут быть сравнимы с аналогичными измеряемыми параметрами радиолокационных объектов (например, морских судов различного класса).

Кроме того, на вход системы слежения могут поступать сигналы, отраженные от метеорных следов (областей повышенной ионизации), искусственных ионосферных возмущений (при работе нагревных стенов, выбросе плазмогасящих веществ и т.п.), а также сигналы радиостанций, использующих декаметровый диапазон.

Одним из возможных способов учета рассмотренных особенностей распространения радиоволн при моделировании навигационных измерений является совместное использование методов геометрической оптики при описании трансionoсферного распространения сигнала и современных моделей ионосферы, параметры которых корректируются по данным систем ионосферного мониторинга.

Применительно к решению задачи моделирования измерений использование метода траекторных расчетов на основе геометрооптического приближения позволяет:

— повысить точность описания связи пространства измерений и пространства состояний объектов;

— оценить влияние параметров ионосферы на качество измерений, в том числе, применительно к различным типам и параметрам движения объектов;

— оперативно использовать данные ионосферного мониторинга для адаптации ионосферной модели к реальным геогелиофизическим условиям, что, в свою очередь, позволит в максимальной степени адаптировать моделируемые измерения к реальным;

— проводить моделирование измерений в условиях многомодового распространения сигналов;

— проводить анализ измерений в случае наличия в ионосфере неоднородностей различных масштабов, а также при изменениях интенсивности концентрации электронов.

Исходные данные при моделировании. Исходными данными являются система дифференциальных уравнений, описывающих положения волнового фронта в диспергирующей среде (при условии, что фронт волны остается локально почти плоским), современные модели ионосферы (с возможностью их коррекции в реальном масштабе времени) и модель движения радиолокационного объекта.

Запишем систему дифференциальных уравнений, описывающих траекторию радиоволны [4]. В сферической системе координат r, θ, φ траектория описывается шестью дифференциальными уравнениями, первые три из которых определяют координаты волнового вектора \mathbf{k} :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= \frac{1}{n^2} \left(k_r - n \frac{\partial n}{\partial k_r} \right); \\ \frac{d\theta}{dt} &= \frac{1}{rn^2} \left(k_\theta - n \frac{\partial n}{\partial k_\theta} \right); \\ \frac{d\varphi}{dt} &= \frac{1}{rn^2 \sin \theta} \left(k_\varphi - n \frac{\partial n}{\partial k_\varphi} \right), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

а вторые три — его направление:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dk_r}{dt} &= \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial r} + k_\theta \frac{d\theta}{dt} + \sin \theta \cdot k_\varphi \frac{d\varphi}{dt}; \\ \frac{dk_\theta}{dt} &= \frac{1}{r} \left(\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial \theta} - k_\theta \frac{dr}{dt} + r \cos \theta \cdot k_\varphi \frac{d\varphi}{dt} \right), \\ \frac{dk_\varphi}{dt} &= \frac{1}{r \sin \theta} \left(\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial \varphi} - \sin \theta \cdot k_\theta \frac{dr}{dt} - r \cos \theta \cdot k_\varphi \frac{d\theta}{dt} \right). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Особенностью системы дифференциальных уравнений (1)—(2) является наличие частных производных первого порядка от показателя преломления n среды (ионосферы) по пространственным координатам, которые, как правило, определяются численными методами. Таким образом, для того чтобы воспользоваться этой системой дифференциальных уравнений, необходимо знать показатель преломления, который в пренебрежении соударениями заряженных частиц в ионосфере определяется формулой Эпплтона:

$$n^2 = 1 - \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y^2 \sin^2 \gamma \pm \sqrt{Y^4 \sin^4 \gamma + 4Y^2(1-X)^2 \cos^2 \gamma}}, \quad (3)$$

$$X = \frac{e^2 N_e}{\varepsilon_0 m f^2}, \quad Y = \frac{eB_0}{mf},$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость, e и m — заряд и масса электрона, B_0 — индукция магнитного поля, f — частота радиоволны, N_e — концентрация электронов, γ — угол между вектором напряженности магнитного поля и волновым вектором.

Описанная система дифференциальных уравнений (1)–(2) траектории радиоволны с показателем преломления, определяемым по формуле (3), интегрируется методом Рунге — Кутты 4-го порядка.

Пространственно-временное описание концентрации электронов N_e задается в виде модели, простейшим вариантом которой может быть модель одного или нескольких слоев концентрации электронов, представляющая собой „гауссоиду“ [5]. При описании модели одного слоя возможно варьировать несколькими параметрами, например: изменением максимальной концентрации слоя (выраженной в значениях плазменных частот f_p) на заданной высоте (z_0F) ионосферы (рис. 2, а), изменением высоты z_0F при $f_p=9,0$ МГц (рис. 2, б) и изменением полутолщины (z_mF) слоя ионосферы (рис. 2, в).

Движение радиолокационного объекта, в зависимости от его типа, может быть описано сколь угодно сложной системой дифференциальных уравнений (если траектория движения детерминирована), и, далее, путем задания начальных условий и применения методов численного интегрирования можно определить полный вектор состояния объекта в заданные моменты времени. Если объект имеет недетерминированную траекторию, то ее достаточно описать последовательностью значений вектора состояния во времени. В простейшем случае при моделировании может быть выбран объект, движущийся по линейной траектории с заданным курсом и тангажом в секторе обзора гипотетической РЛС (рис. 3).

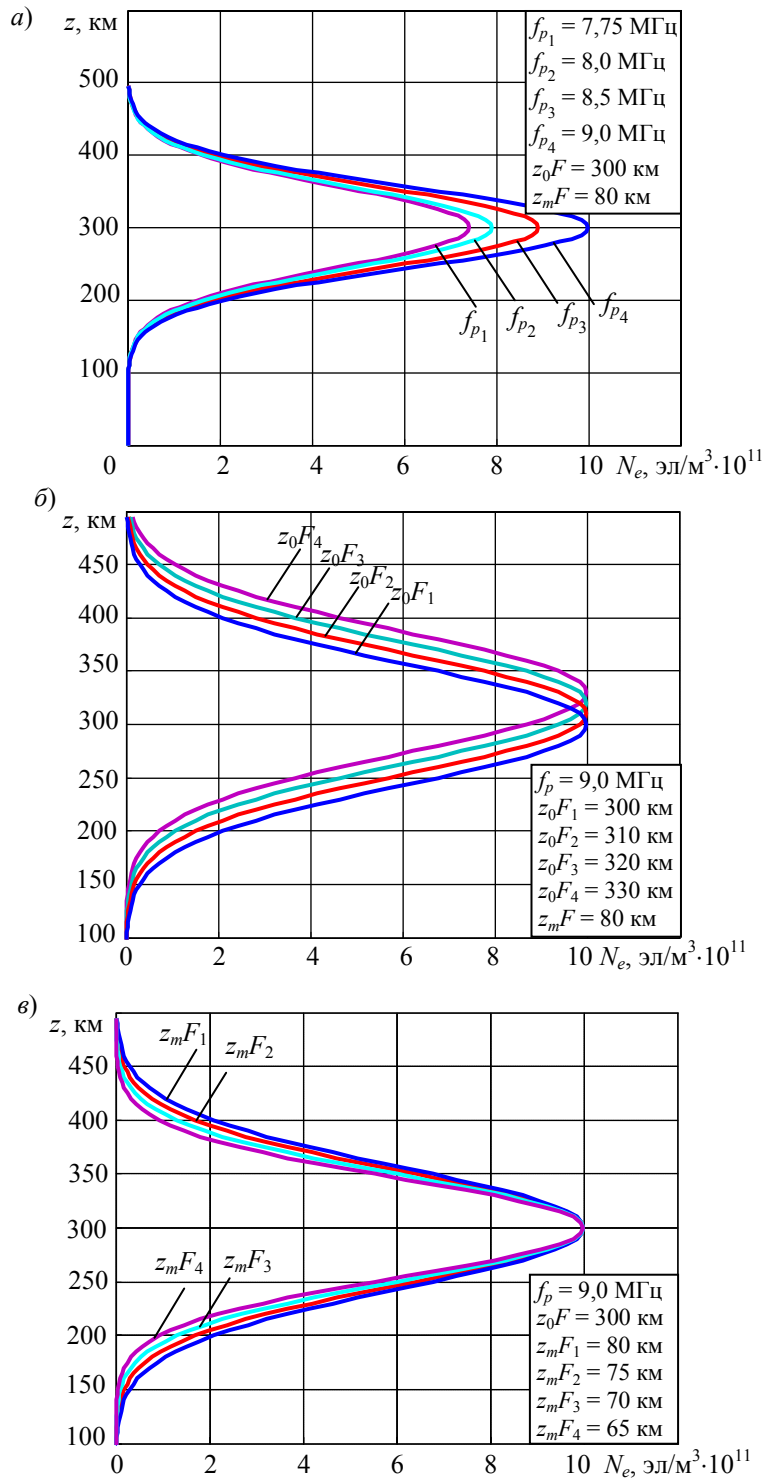


Рис. 2

На рис. 4 показаны траектории радиоволны, полученные методом траекторных расчетов с использованием описанной выше модели ионосферы, при частоте излучения радиосигнала $f_0=18,9$ МГц, различных значениях угла места El_i и фиксированном азимуте Az (по оси абсцисс обозначена дальность D по Земле).

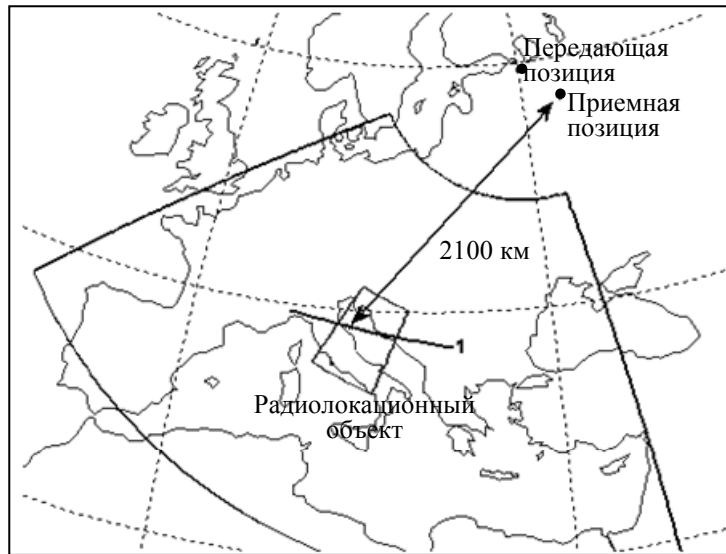


Рис. 3

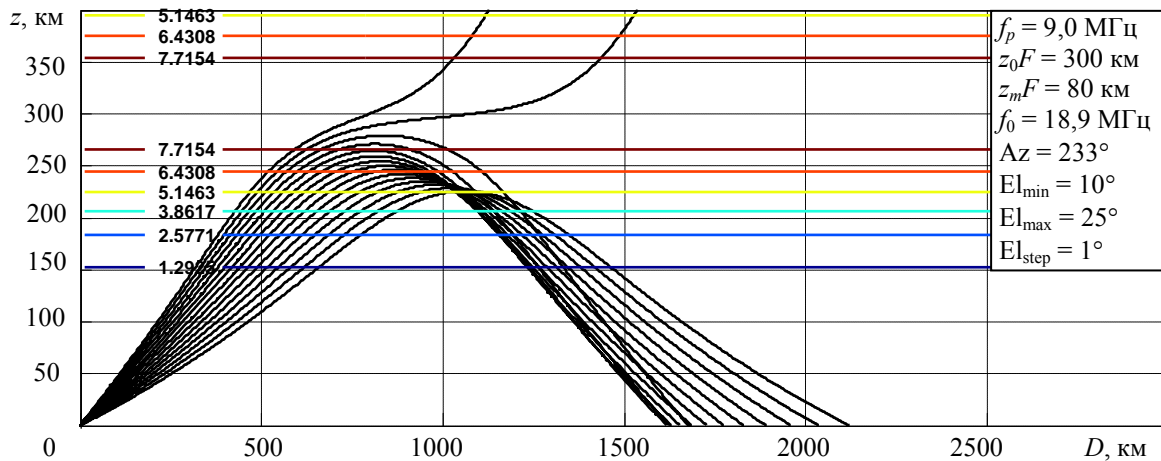


Рис. 4

Использование методов эмпирической оптимизации при моделировании. Как уже отмечалось, состав измерений в коротковолновых РЛС представляет собой измерения азимута, времени задержки сигнала и доплеровского смещения частоты. Если имеется информация о профиле концентрации электронов в области отражения радиоволны, то, зная положение приемной позиции РЛС и составляющие волнового вектора \mathbf{k} в точке начала интегрирования, можно отыскать такую траекторию, которая соединит передающую позицию системы и текущее значение вектора состояния объекта. Иными словами, зная координаты объекта в i -й момент времени ($\mathbf{x}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$) и используя систему дифференциальных уравнений (1)—(2), описывающую траекторию радиоволны в ионосфере, можно подобрать (найти в процессе оптимизации) такие значения угла места El_i , азимута Az_i , групповой Rg_i и фазовой Rf_i дальности, при которых функционал $S(Az_i, Rg_i, El_i)$ будет иметь минимальное значение.

Функционал $S(Az_i, Rg_i, El_i)$ определяется как сумма отклонений полученного методом траекторных расчетов (МТР) вектора состояния объекта ($\mathbf{x}_{\text{МТР}}$) от его истинных координат:

$$S(Az_i, Rg_i, El_i) = (x_i - x_{MTPi})^2 + (y_i - y_{MTPi})^2 + (z_i - z_{MTPi})^2, \quad (4)$$

где координаты конца траектории радиоволны представляют собой сложную функциональную зависимость, полученную в результате численного решения системы уравнений (1)—(2) и оптимизации функционала (4). В общем виде эту функцию можно записать как

$$x_{MTPi} = f(Az_i, Rg_i, El_i, \mathbf{p}_{IONi}, \mathbf{p}_R),$$

где \mathbf{p}_{IONi} и \mathbf{p}_R — параметры, определяющие модель ионосферы и характеристики РЛС.

На рис. 5, а, б соответственно представлены график целевой функции в пространстве (El, Az) при фиксированном значении Rg и процесс поиска ее минимума методом деформируемых многогранников [6] (здесь q_0 и q^* — точки начала и окончания поиска).

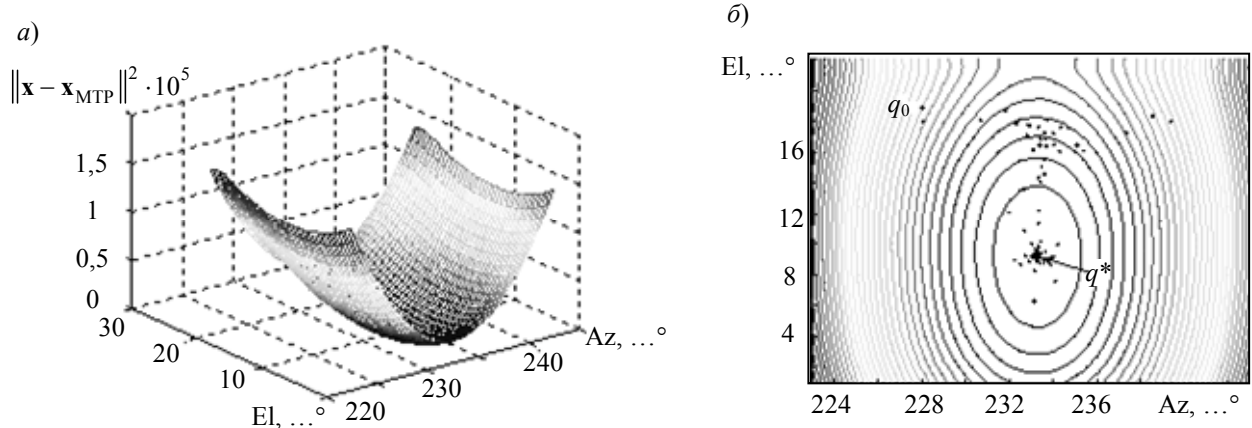


Рис. 5

Основные характеристики оптимизационного процесса при определении минимума функционала $S(Az_i, Rg_i, El_i)$ для одной из точек траектории движения объекта представлены ниже.

Характеристика оптимизационного процесса	Значение
Точка начала поиска $q_0 = [Az \ Rg \ El]^T$	$q_0 = [228^\circ \ 2200 \text{ км} \ 18^\circ]^T$
Точка окончания поиска	$q^* = [233,28^\circ \ 2213,3 \text{ км} \ 9,274^\circ]^T$
Значение целевой функции в точке окончания поиска	0,1941
Число итераций метода оптимизации	87
Количество вычислений целевой функции	164
Шаг интегрирования, мкс	1

Определив в процессе оптимизации начальные условия для интегрирования дифференциальных уравнений, можно для каждого момента времени численно рассчитать фазовую дальность радиоволны:

$$Rf = \int_l n dl,$$

где l — путь радиоволны в ионосфере.

Тогда, зная фазовую дальность в двух точках траектории движения объекта, можно определить значения его радиальной скорости и доплеровского смещения частоты:

$$Rr = \frac{dRf}{dt} = \frac{\int_{l_2} n dl_2 - \int_{l_1} n dl_1}{dt}, \quad f_d = -\frac{f_0}{c} \frac{dRf}{dt},$$

где l_1, l_2 — путь радиоволны при других последовательных измерениях; f_0 — частота радиосигнала; c — скорость света.

На рис. 6 и 7 соответственно показаны графики изменения дальности до объекта и его радиальной скорости. Объект движется по линейной траектории с заданными значениями курса $C=98^\circ$, скорости $V=1350$ км/ч и тангажа $P=270^\circ$.

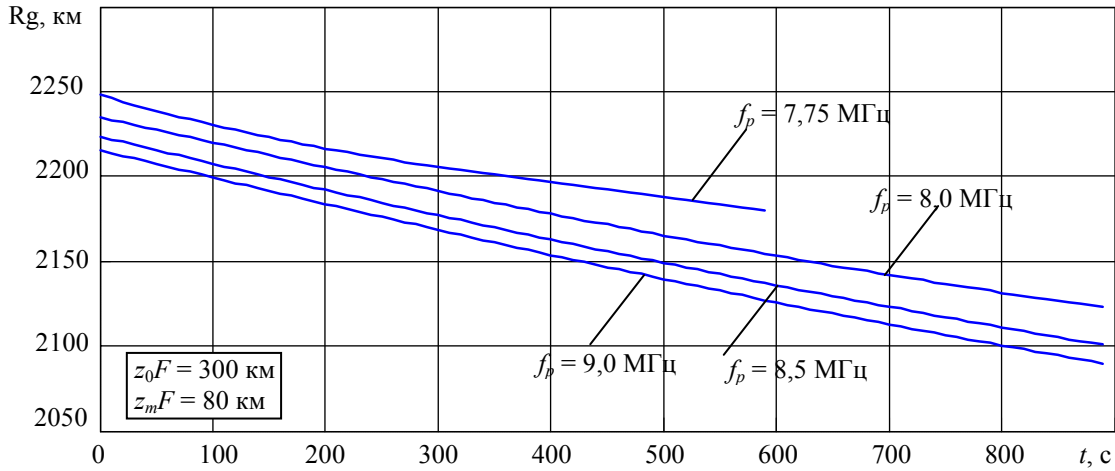


Рис. 6

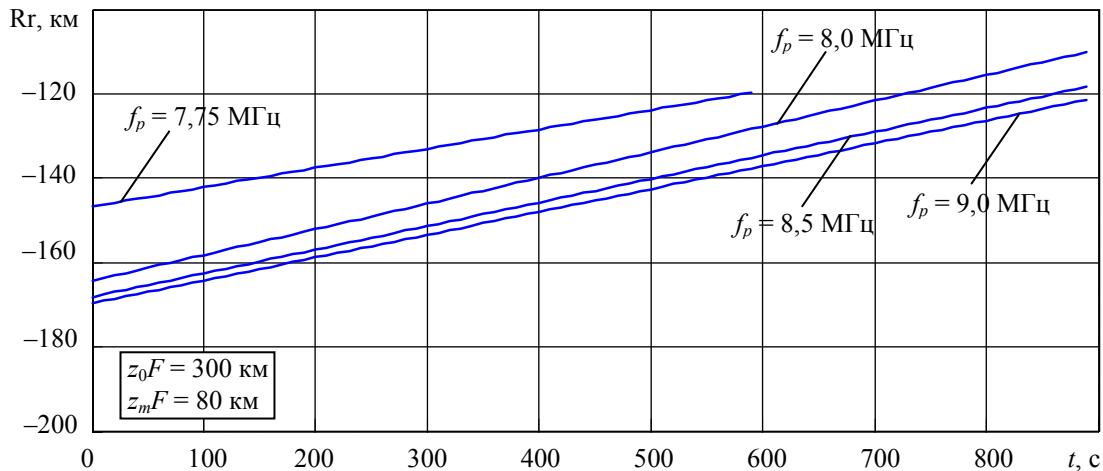


Рис. 7

Заключение. Использование метода траекторных расчетов позволяет решать задачу описания траекторий радиоволн без существенных ограничений на параметры модели ионосферы, тем более что условия применимости метода в большинстве случаев легко выполняются на используемых частотах. Таким образом, процесс моделирования измерений навигационных параметров в коротковолновых РЛС пространственной волны с использованием метода траекторных расчетов автоматически учитывает все особенности распространения радиоволн за счет близкого к реальному, на настоящее время, описания модели ионосферы. В заключение необходимо отметить основные требования к выбору моделей.

Выбор определенной модели ионосферы осуществляется пользователем исходя из возможностей ее применения в работе конкретного радиотехнического комплекса. В этой связи представляется целесообразным использовать отечественную модель SPIM (Standard Atmosphere—Ionosphere Model) [7], так как она позволяет рассчитать профиль концентрации электронов до высот среднеорбитальных спутниковых радионавигационных систем. Это обеспечивает возможность коррекции модели SPIM по навигационным измерениям; нижняя часть модели — примерно до 2000 км — совпадает с моделью IRI (International Reference Ionosphere), широко применяемой в различных задачах. Кроме того, модель SPIM легко согласуется с программой траекторных расчетов.

Как и все эмпирические модели ионосферы, SPIM имеет погрешности (15—30 %), обусловленные ошибками интерполяции и изменчивостью гелиогеофизических условий. Отсюда следует, что для применения SPIM при моделировании измерений в условиях повышенной точности ее необходимо корректировать и адаптировать к текущему состоянию ионосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов Б., Торговкин С., Трекин В. СПРН: новые возможности // Военно-космическая оборона. 2008. № 2 (39).
2. Сапрыкин С., Сколотяный А., Собчук В. Взгляд за горизонт // Военно-космическая оборона. 2006. № 5 (30).
3. Шустов Э. И. Проблемы загоризонтной радиолокации и принципы построения загоризонтных РЛС // Радиотехника. 1997. № 1. С. 5—12.
4. Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн / Пер. с англ.; Под редакцией М. П. Кияновского. М.: Наука, 1971. 312 с.
5. Троицкий В. Ф. Ионосферное обеспечение средств локации, навигации и связи: Учеб. пособие. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2011. 235 с.
6. Алешкин А. П., Бакурский К. В. Методы адаптивной эмпирической оптимизации при определении параметров вектора состояния летательного аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 1. С. 3—6.
7. Gulyaeva T. L., Huang X., Reinisch B. W. The Ionosphere-plasmosphere model software for ISO // Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica. 2002. Vol. 39, N 3.

Сведения об авторах

- Тимофей Олегович Мысливцев** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра антенно-фидерных, передающих устройств и средств СЕВ, Санкт-Петербург; E-mail: tim33@list.ru
- Виктор Михайлович Гусаков** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра антенно-фидерных, передающих устройств и средств СЕВ, Санкт-Петербург
- Андрей Петрович Алешкин** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра антенно-фидерных, передающих устройств и средств СЕВ, Санкт-Петербург

Рекомендована кафедрой антенно-фидерных, передающих устройств и средств СЕВ

Поступила в редакцию 05.06.12 г.