

УДК 621.371.3

ПАШИНЦЕВ В. П., СОЛЧАТОВ М. Э., КОНДРАШИН А. Е., СЕНОКОСОВА А. В.

МАКСИМАЛЬНАЯ ЧАСТОТА ОТРАЖЕНИЯ ДЕКАМЕТРОВОЙ ВОЛНЫ ОТ СФЕРИЧЕСКИ-СЛОИСТОЙ ИОНОСФЕРЫ

Разработана аналитическая методика, позволяющая получить достаточно простые выражения для расчета с малой погрешностью максимальной частоты отражения декаметрового волны от сферически-слоистой ионосферы в зависимости от угла падения волны на отражающий слой, высоты его нижней границы и полутолщины.

Известно, что частота (f_0) наклонной декаметровой (ДКМ) волны, отражающейся от плоско-слоистой ионосферы, связана с углом ее падения (φ_0) на нижнюю границу ионосферного слоя и частотой эквивалентной вертикальной волны (f_v) законом секанса $f_0 = f_v \sec \varphi_0$ [1—3]. Согласно последнему, максимальная частота отражения ($f_0 = f_{\text{макс}}$) определяется при критической частоте отражающего слоя ($f_v = f_{\text{кр}}$) как $f_{\text{макс}} = f_{\text{кр}} \sec \varphi_0$ [1, 3]. При этом высота отражения ($h = h_{\text{от}}$) наклонной волны с максимальной частотой $f_{\text{макс}}$ в плоско-слоистой ионосфере почти совпадает с высотой максимума ($h = h_m$) ее ионизации [3].

При учете сферичности Земли и ионосферы значение f_0 , помимо f_v и $\sec \varphi_0$, зависит еще и от истинной высоты отражения волны относительно нижней границы (h_0) слоя $Z_{\text{от}} = h_{\text{от}} - h_0$, т. е. $f_0 = \psi(f_v, \varphi_0, Z_{\text{от}})$. В соответствии с этим максимальное значение $f_0 = f_{\text{макс}}$ определяется в [1] аналогичной зависимостью при замене f_v и $Z_{\text{от}}$ на их наибольшие значения $f_{\text{кр}}$ и $Z_m = h_m - h_0$, т. е. $f_{\text{макс}} = \psi(f_{\text{кр}}, \varphi_0, Z_m)$. Однако согласно [3, 4] в сферически-слоистой ионосфере наибольшая высота отражения наклонной волны

$Z_{\text{от макс}}$ не совпадает с высотой максимума ионизации Z_m и лежит значительно ниже ее ($Z_{\text{от макс}} < Z_m$). Поэтому использование достаточно простой аналитической зависимости $f_{\text{макс}} = \psi(f_{\text{кр}}, \varphi_0, Z_m)$ из [1] может давать значительные погрешности в расчете $f_{\text{макс}}$. Истинные значения $f_{\text{макс}}$ определены в [4] по известной методике, учитывающей снижение $Z_{\text{от макс}}$ по сравнению с Z_m в сферически-слоистой ионосфере. Однако эта методика дает чрезвычайно сложную и неудобную для расчетов аналитическую зависимость $f_{\text{макс}}$ от угла падения (φ_0) волны на сферически-слоистую ионосферу и ее параметров ($h_0, Z_m, f_{\text{кр}}$). Поэтому целесообразно разработать аналитическую методику, позволяющую получить более простую зависимость $f_{\text{макс}} = \psi(\varphi_0, h_0, Z_m, f_{\text{кр}})$ по сравнению с [4] при обеспечении меньшей погрешности ее расчетов по сравнению с [1].

Целью статьи является разработка методики и оценка погрешности аналитического расчета максимальной частоты ($f_{\text{макс}}$) отражения ДКМ волны от сферически-слоистой ионосферы в зависимости от угла падения (φ_0) волны и параметров ($h_0, Z_m, f_{\text{кр}}$) отражающего слоя.

Известная [4] методика расчета $f_{\text{макс}}$ при параболической модели отражающего слоя ионосферы сводится к решению системы уравнений вида

$$Z_{\text{от}}^2 + 0,5Z_{\text{от}}(a + Z_{\text{от}} - 3Z_m) + 0,5Z_m \left[Z_m (f_0 / f_{\text{кр}})^2 - a - h_0 \right] = 0; \\ \left(1 - \frac{2f_{\text{кр}}^2}{f_0^2} \frac{Z_{\text{от}}}{Z_m} + \frac{f_{\text{кр}}^2}{f_0^2} \frac{Z_{\text{от}}^2}{Z_m^2} \right) \left(1 + \frac{h_0}{a} + \frac{Z_{\text{от}}}{a} \right)^2 = \sin^2 \varphi'_0, \quad (1)$$

где $a = 6370$ км — радиус Земли, а φ'_0 — угол между лучом и вертикалью к поверхности Земли. Последний связан с углами возвышения луча Δ и падения его на нижнюю границу ионосферы φ_0 как [1, 5]

$$\varphi'_0 = \pi / 2 - \Delta; \quad \cos \Delta = \sin \varphi_0 (a + h_0) / a. \quad (2)$$

Указанные выше углы ($\varphi_0, \varphi'_0, \Delta$) и параметры отражающего слоя ионосферы ($h_0, Z_{\text{от}} = h_{\text{от}} - h_0, Z_m = h_m - h_0, Z_{\text{от макс}}$) показаны на рис. 1, иллюстрирующем траектории распространения ДКМ волны с частотами f_0 и $f_{\text{макс}}$ в плоско-слоистой и сферически-слоистой ионосфере.

При заданных значениях $h_0, Z_m, f_{\text{кр}}$ и φ'_0 совместное решение (1) определяет максимальные высоту $Z_{\text{от}} = Z_{\text{от макс}}$ и частоту $f_0 = f_{\text{макс}}$ отражения ДКМ волны от сферически-слоистой ионосферы. Если $\varphi'_0 = \pi / 2$, то согласно (2) угол возвышения луча $\Delta = 0$, а угол его падения на ионосферу будет максимальным

$$\varphi_0 = \varphi_{0 \text{ макс}} = \arcsin a / (a + h_0). \quad (3)$$

В этом случае $\sin \varphi'_0 = 1$ и снижение $Z_{\text{от макс}}$ и $f_{\text{макс}}$ по сравнению со случаем плоско-слоистой ионосферы будет максимальным и достигает значений, приведенных в табл. 1 [4].