

УДК 621.396

Д.П. Пашков<sup>1</sup>, С.Е. Ломоносов<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальная академия обороны Украины, Киев<sup>2</sup>Центр контроля и анализа космической обстановки, Киев

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ

*В статье исследованы возможности реализации метода аналитического прогнозирования помехоустойчивости приемных устройств радиосигналов СВЧ и КВЧ диапазонов в условиях воздействия факторов трансионосферного распространения радиоволн.*

*помехоустойчивость радиотехнических систем*

### Введение

Анализ среды распространения радиоволн СВЧ и КВЧ диапазонов, свидетельствует, что геофизические процессы в верхних слоях атмосферы могут быть причиной сравнительно медленных колебаний силы поля, которые не относятся к классу флуктуаций, а являются причиной суточных, сезонных и вообще медленных случайных колебаний уровня поля [1, 2]. Так например [3], для спутниковых линий характерны помехи по совмещенному каналу между соседними лучами, а на частотах выше 10 ГГц и поглощение в гидрометеорах.

Таким образом, в диапазонах сантиметровых и миллиметровых радиоволн основными факторами, влияющими на помехоустойчивости радиосистем, будут тропосферные и ионосферные искажения радиосигнала, связанные с поляризационными изменениями и частотно-селективными замираниями.

**Анализ литературы.** Проведенный анализ известной литературы [1 – 4] показал, что влияние среды распространения на радиоволны СВЧ и КВЧ диапазонов проявляется в изменении амплитуды электромагнитных волн, изменении скорости и направления распространения, в повороте плоскости поляризации и в искажении информационных ха-

рактеристик передаваемых сигналов. Условия распространения радиоволн определяются многими факторами [4, 5], так что полный их анализ оказывается сложным.

Анализ состояния вопроса разработки моделей распределения электронной концентрации в возмущенной ионосфере (ВИ) [2, 3], в свою очередь, показывает, что решение этой проблемы далеко от завершения и требует разработки подходов к прогнозированию помехоустойчивости РТС при заданных частотных параметрах сигналов и приращений физических параметров ионосферы под воздействием возмущающих факторов.

**Постановка проблемы.** Оценка помехоустойчивости некогерентного приема сигналов в космических системах (КС) с замираниями определяется величиной вероятности ошибки приёма сигнала  $P_{\text{ош}}$ , которая зависит от статистических параметров передаточных характеристик КС и коэффициентов энергетических потерь, возникающих при обработке сигналов в условиях наличия частотно-селективных замираний [3].

При этом целесообразно разработать подходы к решению задачи расчета  $P_{\text{ош}}$  радиотехнических систем наземного комплекса управления КА в условиях возмущения ионосферы Земли.

## Раздел основного материала

Известные аналитические соотношения [2] (1) для оценки величины  $P_{\text{ош}}$  при некогерентном приеме сигналов в КС в зависимости от значений частотных параметров передаваемых сигналов (ширины спектра  $\Delta f_0$  и несущей частоты  $f_0$ ) и физических параметров ионосферы (интенсивности неоднородностей в ионосфере  $\beta$ , максимальной концентрации электронов  $N_{\text{em}}$ , внутреннего и внешнего масштаба ионосферных турбулентностей  $l_m$ ,  $L_0$ , эквивалентной толщины слоя  $z_3$ ) позволяет приближенно рассчитать помехоустойчивость РТС при воздействии ионосферных возмущений.

$$P_{\text{ош}} = \frac{\gamma^2 + 1}{\eta_{\text{чсз}} \bar{h}_0^2 + 2(\gamma^2 + 1)} \exp \left[ - \frac{\eta_{\text{чсз}} \gamma^2 \bar{h}_0^2}{\eta_{\text{чсз}} \bar{h}_0^2 + 2(\gamma^2 + 1)} \right], \quad (1)$$

где  $\eta_{\text{чсз}}$  – коэффициент энергетических потерь;  $\bar{h}_0^2$  – входное отношение  $E_r/N_0$ , которое соответствует отношению мощностей сигнала и помехи на выходе приемника.

Однако прежде чем приступить к проведению указанных расчетов, следует напомнить, что входящие в (1) коэффициенты  $\gamma^2$  (2) и  $\eta_{\text{чсз}}$  (3) связаны с физическими параметрами ионосферы через величину  $\sigma_\phi^2$ :

$$\gamma^2 = \frac{\alpha^2}{2\sigma_\phi^2} = \frac{1}{\exp(\sigma_\phi^2) - 1}, \quad (2)$$

где  $\sigma_\phi^2$ ,  $\alpha^2$  – флуктуационная и регулярная составляющих коэффициента передачи РТС по мощности;

$$\eta_{\text{чсз}} = F \left( \sqrt{2\pi} \frac{\Delta f_{\text{кор}}}{\Delta f_0} \right) \left[ 1 + \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{\Delta f_0}{\Delta f_{\text{кор}}} \right)^2 \right] - \frac{1}{\pi\sqrt{\pi}} \left( \frac{\Delta f_0}{\Delta f_{\text{кор}}} \right) \left\{ 2 - \exp \left[ - \pi^2 \left( \frac{\Delta f_{\text{кор}}}{\Delta f_0} \right)^2 \right] \right\}, \quad (3)$$

$$\text{где } \Delta f_{\text{кор}} = \frac{\sqrt{2}f_0}{\sigma_\phi} = \frac{f_0^2 c}{80,8\pi\sqrt{L_0 z_3 \beta N_{\text{em}}}}.$$

В свою очередь, выражение (4) [4] для определения  $\sigma_\phi^2$  может быть получено в приближении Рытова при условии, что спектр флуктуаций неоднородностей в невозмущенной ионосфере  $\Phi_{\Delta N_e}(K)$  имеет степенной вид зависимости от  $k = 2\pi/l$  в инерционном интервале  $l_m < l < L_0$  со спектральным показателем  $p \approx 4$ ;

$$\sigma_\phi^2 \approx 2(\lambda r_e)^2 L_0 z_3 \sigma_{\Delta N_e}^2 = 2 \left( \frac{80,8\pi}{c} \right)^2 L_0 z_3 \left( \frac{\beta N_{\text{em}}}{f_0} \right)^2 (\text{рад}^2), \quad (4)$$

где  $r_e$  – классический радиус электрона.

При этом сама величина  $\sigma_\phi^2$  может принимать различные значения, как меньше, так и значительно

больше 1 в зависимости от количественных изменений  $\beta$  и  $N_{\text{em}}$  для различных широт и времени суток.

Поскольку проведенный анализ состояния вопроса разработки моделей распределения ЭК в возмущенной ионосфере показывает, что решение этой проблемы далеко от завершения, то, в первом приближении, целесообразно осуществить прогнозирование помехоустойчивости при следующих допущениях:

- качественный характер модели распределения ЭК в возмущенной ионосфере, определяемый видом зависимости  $\Phi_{\Delta N_e}(K)$  от  $K$  и значениями параметров  $p$ ,  $l_m$ ,  $L_0$ ,  $z_3$ , остается неизменным по сравнению с моделью невозмущенной ионосферы;

- отличие в степени возмущения ионосферы определяется только количественными изменениями значений параметров  $\beta$  и  $N_{\text{em}}$ .

При этих допущениях задача прогнозирования помехоустойчивости РТС сводится к расчету  $P_{\text{ош}}$  в соответствии с выражениями (1) – (3) при заданных частотных параметрах сигналов ( $f_0$ ,  $\Delta f_0$ ) и приращений физических параметров ионосферы  $\beta$  и  $N_{\text{em}}$  под воздействием возмущающих факторов.

Назовем условно состояние возмущенной ионосферы в зависимости от значений указанных физических параметров ионосферы в интервалах их вероятных приращений  $\beta = 10^{-2} - 1$  и  $N_{\text{em}} = 10^{11} - 10^{14}$  эл/м<sup>3</sup> следующим способом: слабовозмущенные при  $\beta = 10^{-2}$  и  $N_{\text{em}} = 10^{13}$  эл/м<sup>3</sup>; средневозмущенные при  $\beta = 10^{-1}$  и  $N_{\text{em}} = 10^{13}$  эл/м<sup>3</sup>; сильновозмущенные при  $\beta = 1$  и  $N_{\text{em}} = 10^{14}$  эл/м<sup>3</sup>.

Следует отметить, что прогнозирование помехоустойчивости РТС для условий сильных возмущений ионосферы будет достоверно только при несущей частоте  $f_0 = 40$  ГГц. Для  $f_0 = 1,5, 10$  ГГц они отражают верхнюю границу помехоустойчивости, поскольку при данных значениях  $f_0$  и указанных значениях  $\beta$  и  $N_{\text{em}}$  сильновозмущенной ионосферы граничное условие применимости метода фазового экрана [5]

$$(\beta N_{\text{em}})^2 \leq 9 \cdot 10^3 \left( L_0 / z_3^2 \right) \cdot f_0^3 \quad (5)$$

не выполняется. Поэтому случайные изменения интенсивности поля принимаемой волны в этих случаях будут обусловлены флуктуациями не только фазового фронта данной волны на выходе ионосферного слоя ( $\sigma_\phi^2$ ), но и амплитудного ( $\sigma_x^2$ ). В результате этого искажения формы принимаемых сигналов и связанные с ними энергетические потери ( $\eta_{\text{чсз}}$ ) будут более существенными, чем те, которые учитываются в разработанной методике.

Справедливость отмеченного замечания подтверждается оценками помехоустойчивости некогерентного приема сигналов в РТС при создании ионосферных возмущений, полученных численными методами имитационного моделирования на ЭВМ процессов трансionoсферного распространения радиоволн и обработки принимаемых сигналов. Они показывают, что снижение помехоустойчивости

рассматриваемых систем будет более значительным по сравнению с полученными аналитическими результатами прогнозирования. Это объясняется тем, что в известной численной методике прогнозирования учтено влияние как фазовых, так и амплитудных флуктуаций фронта выходной волны. Однако проверить и оценить достоверность результатов не представляется возможным в силу недостатка приведенных в ней исходных данных [5].

### Выводы

Полученные с помощью разработанной аналитической методики результаты прогнозирования помехоустойчивости РТС в условиях ВИ позволяет сделать следующие выводы:

– при возникновении даже слабых ВИ характер замираний принимаемых в РТС сигналов ДМ и СМ диапазона ( в том числе и с  $f_0 > 6$  ГГц) становится близким к релейскому, что потребует увеличение энергетического запаса радиолиний существующих РТС до 40 дБ;

– в условиях сильных ВИ прием сигналов будет сопровождаться возникновением ЧСЗ и энергетических потерь ( $\eta_{\text{чсз}}$ ), для компенсации которых потребуются дополнительное увеличение энергетического запаса радиолиний;

– использование сантиметрового диапазона волн позволяет существенно повысить помехоустойчивость РТС НКУ при любой степени ВИ, однако в условиях воздействия сильных возмущений для обеспечения требуемой  $P_{\text{ош}}$  ( $\sim 10^{-5}$ ) также необходимо увеличить  $\bar{h}_0^2$  примерно на 40 дБ по сравнению со случаем невозмущенной ионосферы.

Таким образом, данная методика прогнозирования помехоустойчивости РТС позволяет разрабатывать научно обоснованные требования к энергетическим и частотным параметрам передаваемых сигналов в РТС НКУ КА.

### Список литературы

1. Долухонов М.П. Распространение радиоволн. – М.: Связь, 1972. – 336 с.
2. Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. – М.: Радио и связь, 1983. – 224 с.
3. Солодовников Г.К., Новожилов В.И., Фаткуллин М.Н. Распространение радиоволн в многомасштабной неоднородной ионосфере. – М.: Наука, 1990. – 200 с.

Поступила в редколлегию 26.03.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Национальная академия обороны Украины, Киев.