

УДК 681.325

С.Е. Ломоносов<sup>1</sup>, Е.И. Онищенко<sup>1</sup>, А.П. Котов<sup>2</sup>, А.Н. Ларионов<sup>2</sup><sup>1</sup>Центр контроля космического пространства

Национального космического агентства Украины, Евпатория

<sup>2</sup>Центральный научно-исследовательский институт навигации и управления, Киев

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ РАДИОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ УЧЁТА ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Одной из задач управления космическими аппаратами (КА), является своевременное получение информации от бортовых систем КА находящихся на орбите Земли. Однако, на качество функционирования радиотехнических систем (РТС) при приеме информации оказывают влияние различные факторы, к числу которых необходимо в первую очередь отнести условия распространения радиоволн. В статье рассмотрены особенности функционирования РТС и проведен анализ по возможности повышения помехоустойчивости приёмных устройств наземных радиосистем в условиях возмущения ионосферы Земли.

**Ключевые слова:** радиотехническая система, информация, требования, помехоустойчивость, ионосфера.

### Введение

Известно, что качество функционирования РТС определяется её помехоустойчивостью, которая характеризует способность поддерживать требуемые точность воспроизведения сообщений (вероятность ошибки) с учетом влияния возможных помех [1, 2]. Однако имеется ряд критичных факторов, влияющих на помехоустойчивость радиосистем, в том числе, обусловленные средой распространения радиоволн в канале передачи сигналов между КА и наземной РТС.

На современном этапе развития радиотехники, наметилась тенденция развития комплекса методов и средств, включающих использование сигналов сложной формы с оптимизацией их обработки, построение специального класса антенно-приемных устройств, а также повышение быстродействия цифровой техники, участвующей в обработке принимаемого сигнала [1] для сверхвысокочастотных (СВЧ) и крайневвысокочастотных (КВЧ) диапазонов [2].

Однако на характеристики РТС существенное влияние оказывают флуктуации принимаемых сигналов, обусловленные распространением радиоволн (РРВ) в ионосферном слое атмосферы Земли [2]. Одним из факторов оказывающих существенное влияние при распространении радиоволн в ионосфере является частотно-селективные замирания сигнала (как при естественных, так и при искусственных возмущениях ионосферы случайные функции электронной концентрации вызывают рассеивания радиоволн, что приводит к случайным изменениям амплитуды и фазы принимаемых радиосигналов) [1]. Это оказывает весьма существенное влияние на прием сигналов в радиосистемах. Следовательно, при проектировании перспективных космических систем необходимо учитывать влияние ионосфер-

ных возмущений на распространение радиоволн [3].

В связи с этим при использовании существующих РТС наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) космических аппаратов целесообразно учитывать влияние ионосферного слоя Земли на распространение радиоволн.

**Анализ литературы.** Проведенный анализ известной литературы [1, 2] 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 характеристик передаваемых сигналов. Условия распространения радиоволн определяются многими факторами [3, 4], так что полный их анализ оказывается сложным. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо построить модель трассы распространения, выделяя те факторы, которые оказывают определяющее воздействие. Анализ среды распространения радиоволн сантиметрового и миллиметрового 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 [5].

Таким образом, в диапазонах сантиметровых и миллиметровых радиоволн основными факторами влияющие на помехоустойчивости радиосистем будут тропосферные и ионосферные искажения радиосигнала, связанные с поляризационными изменениями и частотно-селективными замираниями. Поэтому в дальнейшем ограничимся изучением влияния на помехоустойчивости РТС данных факторов.

Анализ источников литературы [1 – 4] показал, что влияние ионосферы на РРВ неодинаково из-

непредсказуемой пространственной и временной неоднородности показателя преломления среды [5, 6]. Поэтому учет влияния ионосферных эффектов позволит повысить качество функционирования РТС в сложных условиях помеховой обстановки.

В связи с этим, **целью статьи** является провести анализ влияния ионосферных явлений на помехоустойчивость приёмных устройств радиотехнических систем наземного автоматизированного комплекса управления КА и предложить пути повышения помехоустойчивости РТС.

### Раздел основного материала

Для того, чтобы провести качественный анализ влияния факторов при распространении радиоволн на помехоустойчивость РТС воспользуемся элементарными представлениями о структуре ионосферы. Известно [2], что ионосфера представляет собой частично ионизированную область верхних слоев атмосферы, условно разделенную на три главные области - D, E, F. Она располагается по высоте приблизительно от 50 до 2000 км, что оказывает существенное влияние на качество функционирования радиосистем. На рис. 1 показаны в схематическом виде «послойные» свойства среднеширотной ионосферы, как для дневных, так и для ночных условий. Взаимодействие радиоволн с ионосферой зависит как от частоты, так и от распределения плотности ионов и электронов на пути распространения сигнала.

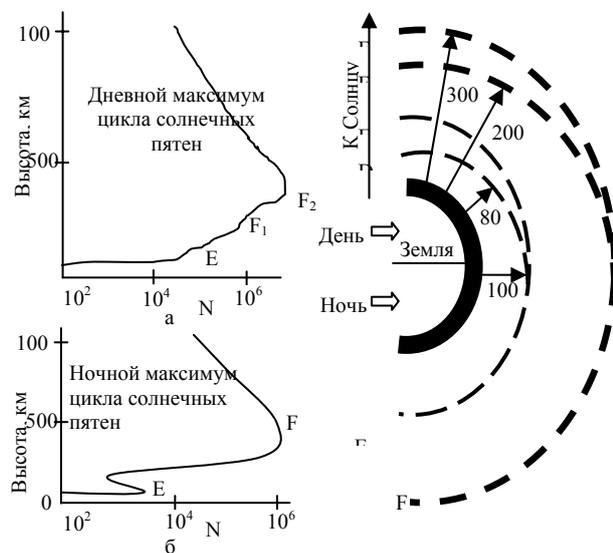


Рис. 1. Ионосферные области: а – дневное время (вверху слева); б – ночное время (внизу слева)

Современные требования, предъявляемые к работе РТС НАКУ КА, а в частности к точности определения параметров орбит космических объектов (КО) существенно возрастают. Один из путей решения задачи – оценка помехоустойчивости приёмных устройств путём определения достоверности принятой информации [6].

Как известно [7], ионосферные эффекты,

влияющие на качество функционирования РТС управления КА, связаны с изменением основных параметров сигналов, таких как амплитуда, поляризация волны и фазы. Кроме этого, они меняются по мере того, как радиоволна проходит через ионосферу, вследствие чего волна сохраняет «память» об интегральных изменениях. Многие факторы, влияющие на качество функционирования системы, за исключением эффектов рассеяния и мерцания, зависящих от детальных распределений, непосредственно связаны с электронной концентрацией ионосферы (ЭКИ) на пути распространения радиоволны [2]. Эта величина соотносима с фарадеевским вращением, групповой задержкой на трассе, фазовым опережением, доплеровским сдвигом в ионосфере и дисперсией сигнала и является существенным параметром для оценки системных эффектов. Электронная концентрация определяется произведением двух факторов: так называемой толщины слоя и пика плотности электронов. Суточные и сезонные изменения, которых характеризуются большими различиями.

Помимо, указанных выше, сглаженных свойств ионосферы, существуют структурные плазменные эффекты, подобные тем, которые связаны с нерегулярностями ЭКИ, что приводит к фокусировке и расфокусировке радиоволн. Кроме того, в рассматриваемом вопросе весомую значимость приобретают другие эффекты, например мерцания [3, 4].

Флуктуации мощности и фазы сигнала, сопровождающие распространение радиоволн РТС НАКУ КА, являются результатом неоднородностей и нерегулярностями плотности электронов в ионосфере, особенно в области F на высотах 200-600 км. Это явление оказывается наиболее важным негативным фактором, который влияет на помехоустойчивость приёмных устройств.

Изменение дисперсионных свойств ионосферы определяется в основном ЭКИ и вызывает изменение формы принимаемых сигналов, что приводит к рассогласованию последних со схемой оптимальной обработки. В результате обеспечиваемое ею отношение мощностей  $P_c/P_n$  (сигнала и шума) уменьшится, что эквивалентно снижению отношения сигнал/шум на входе приемника [5]

$$h^2 = \eta_g \cdot h_0^2, \quad (1)$$

где  $\eta_g < 1$  – коэффициент энергетических потерь, возникающих при обработке сигналов с дисперсионными искажениями.

Величина данного коэффициента определяется соотношением [4]

$$\eta_g = \frac{2\pi}{y} c^2(y), \quad (2)$$

где  $c(y)$  – интеграл Френеля,  $y = 2\pi\Delta f_0/\Delta f_g$ ;  $\Delta f_g$  – полосу когерентности ионосферы, обусловленная ее дисперсионными свойствами. Последняя определяется как [3]

$$\Delta f_g = \frac{cf_0^3}{40,4\Delta f_0 N_{\text{тср}}} \quad (3)$$

Отсюда следует, что общие закономерности влияния дисперсионных свойств ионосферы на помехоустойчивость РТС НАКУ КА состоят в том, что увеличение интегральной средней ЭКИ ионосферы  $N_{\text{тср}}$ , расширение спектра передаваемых сигналов  $\Delta f_0$  и уменьшение их несущей частоты  $f_0$  приводит к снижению отношения сигнал/шум на входе приемника и, как следствие, - к возрастанию вероятности ошибки приёма сигнала  $P_{\text{ош}}$ .

Известные аналитические соотношения [2, 3] для оценки величины  $P_{\text{ош}}$  при некогерентном приеме сигналов 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.

$$P_{\text{ош}} = \frac{\gamma^2 + 1}{\eta_{\text{чсз}} \bar{h}_0^2 + 2(\gamma^2 + 1)} \exp \left[ -\frac{\eta_{\text{чсз}} \gamma^2 \bar{h}_0^2}{\eta_{\text{чсз}} \bar{h}_0^2 + 2(\gamma^2 + 1)} \right], \quad (4)$$

где  $\eta_{\text{чсз}}$  – коэффициент энергетических потерь из-за влияния частотно-селективных замираний при распространении радиоволн;  $\bar{h}_0^2$  – 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  $\gamma^2$

$$\gamma^2 = \frac{\alpha^2}{2\sigma_b^2} = \frac{1}{\exp(\sigma_\phi^2) - 1}, \quad (5)$$

где  $\sigma_b^2, \alpha^2$  – флуктуационная и регулярная составляющих коэффициента передачи РТС по мощности, и  $\eta_{\text{чсз}}$  связаны с физическими параметрами ионосферы через величину  $\sigma_\phi^2$ .

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  $p \approx 4$ .

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

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 различного времени суток.

Функционирование РТС НАКУ КА осуществляется в круглосуточном режиме, где на основе определения времени задержки сигнала, частоты, фазы и других параметров определяются координаты космических объектов относительно наземного измерительного средства. В этом случае ионосферные возмущения вызывают многократное увеличение ошибок определения параметров движения КО (если брать измерительное средство).

Кроме того, специфика функционирования РТС НАКУ КА такова, что состав группировки измерительных средств ограничен по численности и территории расположения, что также в свою очередь усложняет определение параметров орбит КО. Так для измерения параметров движения средневысотного КО РТС НАКУ КА как показала практика, ошибки измерения могут достигать десятка секунд.

С помощью разработанного аналитического аппарата получены результаты (рис. 2, 3) прогнозирования помехоустойчивости приемных устройств космических систем для метрового и дециметрового диапазонов длин волн в условиях воздействия ионосферных возмущений. Определено, что для обеспечения вероятности ошибки  $P_{\text{ош}} \sim 10^{-5}$  необходимо иметь энергетический запас радиолиний порядка 7 – 15 дБ, что выдвигает условие к повышению энергетических характеристик передающих устройств.

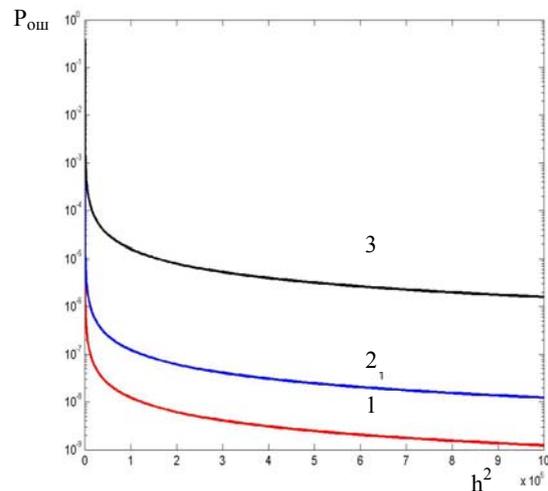


Рис. 1. Зависимость вероятности ошибочного приема от отношения сигнал/шум приемника в разных условиях возмущения ионосферы: 1 – слабозвозмущенная; 2 – средневозмущенная; 3 – сильновозмущенная

Поэтому представляется целесообразным учитывать влияние ионосферы, специфику и эффекты распространения радиоволн, вносимые различными по свойствам средами прохождения. Кроме этого, учет влияния воздействий повысит качество функционирования радиосистем управления КА, обеспе-

чит ее уверенную работу в сложных помеховых условиях и в то же время позволит определить необходимые энергетические и частотные параметры радиолинии, при проектировании и использовании РТС НАКУ КА.

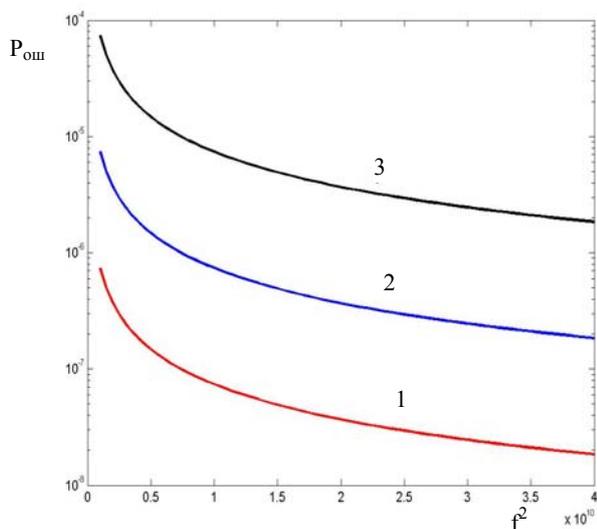


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибочного приема от частоты используемого сигнала в разных условиях возмущения ионосферы: 1 – слабовозмущенная; 2 – средневозмущенная; 3 – сильновозмущенная

### Выводы

Таким образом, в результате разработанной метода получено обобщенное аналитическое соотношение для оценки  $P_{ош}$  при приеме радиосигналов в РТС в зависимости от значений частотных параметров передаваемых сигналов и физических параметров ионосферы, определяющих ее рассеивающие свойства. Это дает возможность провести учет пространственных и временных особенностей ионосферных неоднородностей и связанных с ними

амплитудных и фазовых мерцаний имеют большое значение в организации и функционировании измерительных средств НАКУ КА. Поскольку предсказать реальную амплитуду и частоту мерцаний в конкретном месте и в конкретный момент времени невозможно, то помимо эмпирических методов (повышение мощности передатчика) снижения влияния ионосферных эффектов, представляется целесообразным использовать аналитические выражения, предложенные в статье для повышения помехоустойчивости приемных устройств РТС управления КА путем адаптации по уровню принимаемого сигнала.

### Список литературы

1. Черенкова Е.Л., Чернышев О.В. Распространение радиоволн. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
2. Гундзе Е., Чжаухань Лю. Мерцание радиоволн в ионосфере // ТИИЭР. – 1982. – Т. 70, № 4, – С. 5-45.
3. Солодовников Г.К., Новожиллов В.И., Фаткуллин М.Н. Распространение радиоволн в многомасштабной неоднородной ионосфере. – М.: Наука, 1990. – 200 с.
4. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1. – М.: Мир, 1981. – 279 с.
5. Кравцов Ю.А., Фейзуллин З.И., Виноградов А.Г. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. – М.: Радио и связь, 1983. – 224 с.
6. Быстров Р.П., Петров А.В., Соколов А.В. Миллиметровые волны в системах связи // Радиотехника. – 2000. – № 5. – С. 73-85.
7. Пашков Д.П., Ломоносов С.Е. Прогнозирование помехоустойчивости радиотехнических систем в условиях возмущения ионосферы // Системы обработки информации. – Х.: ХУ ПС. – 2007. – Вып. 4 (62). – С. 91-93.

Поступила в редколлегию 4.07.2008

Рецензент: д-р техн. наук. проф. С.В. Козелков, Центральный НИИ навигации и управления, Киев.

### МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ПЕРЕШКОДОСТІЙКОСТІ ПРИЙМАЛЬНИХ ПРИБОРІВ РАДІОСИСТЕМ НА ОСНОВІ ОБЛІКУ ВПЛИВУ ІОНОСФЕРНИХ ЕФЕКТИВ

С.Е. Ломоносов, Є.І. Оніщенко, О.П. Котов, О.М. Ларіонов

Одному із завдань управління космічними апаратами (КО), є своєчасне отримання інформації від бортових систем КО що знаходяться на орбіті Землі. Проте, на якість функціонування радіотехнічних систем (РТС) при прийомі інформації роблять вплив різні чинники, до яких необхідно в першу чергу віднести умови розповсюдження радіохвиль. У статті розглянуті особливості функціонування РТС і проведений аналіз по можливості підвищення перешкодостійкості приймальних пристроїв наземних радіосистем в умовах обурення іоносфери Землі.

**Ключові слова:** радіотехнічна система, інформація, вимоги, перешкодостійкість, іоносфера.

### METHOD OF INCREASE OF ANTIJAMMINGNESS OF RECEIVING DEVICES OF RADIOSYSTEM ON BASIS OF ACCOUNT OF INFLUENCING OF EFFECTS OF IONOSPHERES

S.E. Lomonosov, E.I. Onitshenko, A.P. Kotov, A.N. Larionov

To one of tasks of management the vehicles (MV) of spaces, there is a timely receipt of information on the systems of sides MV being on the orbit of Earth. However, on quality of functioning of the radio engineerings systems (RES) at adopting information different factors to the number which it is necessary above all things to deliver the terms of distribution of radio waves have influence. In the article the features of functioning are considered RES and an analysis on possibility of increase of anti-jammingness of receiving devices of surface radiocustem is conducted in the conditions of indignation of ionosphere of Earth.

**Keywords:** radio engineering system, information, requirements, anti-jammingness, ionosphere.