

Нижегородский научно-исследовательский радиофизический институт
Государственного комитета РФ по высшему образованию

П р е п р и н т N 428

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ИОНОСФЕРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ
КОРОТКИХ РАДИОВОЛН**

Понятов А. А.
Урядов В. П.

Нижегород, 1996

Понятов А. А., Урядов В. П.

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ИОНОСФЕРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ
КОРОТКИХ РАДИОВОЛН // Препринт N 428. — Нижний
Новгород: НИРФИ, 1996. — 20 с.**

УДК 550.388.2

Описан метод расчета траекторных, энергетических и доплеровских характеристик коротких радиоволн, основанный на обобщенном законе Снеллиуса для горизонтально-неоднородной ионосферы. Разработана программа синтеза ионограмм наклонного зондирования естественной и модифицированной ионосферы. Проведено компьютерное моделирование дисперсионных и амплитудно-частотных характеристик кругосветных сигналов. На основе сопоставления экспериментальных и расчетных данных определены преобладающие механизмы распространения КС на радиопутьях, проходящих вблизи терминатора. Проведено моделирование экспериментальных данных по широкополосному зондированию ионосферы, возмущенной мощным наземным радиоизлучением. Показано определяющее влияние рефракции на частотную зависимость появляемости сигналов, рассеянных на искусственных мелкомасштабных неоднородностях. Разработана методика и составлена программа расчета доплеровского сдвига частоты при наклонном зондировании для модели ионосферы, содержащей движущуюся крупномасштабную неоднородность.

1. Введение

Математическому моделированию постоянно уделяется большое внимание в задачах ионосферного распространения коротких радиоволн (КВ). Роль моделирования заметно возросла в последние годы в связи с бурным развитием и внедрением современной вычислительной техники в практику ионосферных исследований. Для описания характеристик КВ сигналов в регулярной ионосфере широко используется приближение геометрической оптики (ГО) и на основе ГО решаются различные задачи ионосферного распространения радиоволн. Неоднородная структура ионосферы заметно усложняет картину распространения и ответственна за эффекты рассеяния, дифракции и связанные с ними явления. Моделирование особенностей распространения радиоволн в реальной ионосфере имеет важное научное и практическое значение в исследованиях физики ионосферы и распространения радиоволн. В настоящей работе в приближении ГО дается описание метода расчета траекторных, энергетических и доплеровских характеристик КВ сигналов в среде, содержащей как крупномасштабные вариации электронной концентрации, так и мелкомасштабные неоднородности, определяющие эффекты ракурсного рассеяния радиоволн. Результаты моделирования сопоставляются с экспериментальными данными, полученными с помощью средств широкополосного зондирования в условиях естественной и искусственно-возмущенной ионосферы на радиолиниях различной ориентации и протяженности, вплоть до кругосветных.

2. Метод расчета. Модель среды распространения

При постановке экспериментальных исследований и интерпретации результатов зондирования широко используется компьютерное моде-

лирование. В данной работе модельные расчеты проводились на ПЭВМ с помощью разработанной в НИРФИ программы расчета характеристик коротких волн, распространяющихся в трехмерно-неоднородной ионосфере. Первоначальный вариант этой программы описан в работе [1]. В дальнейшем программа неоднократно была проверена сравнением результатов численного моделирования с результатами различных экспериментов (см. например, [2]). Их хорошее совпадение показало работоспособность программы в различных ионосферных условиях как в невозмущенной ионосфере, так и при наличии возмущений. Программа основана на одном из геометро-оптических (лучевых) методов, использующем принцип Ферма и его математическую аналогию - принцип Гамильтона, впервые описанном в [3] (в ряде работ его называют методом закона Снеллиуса). Это скалярный метод, поэтому в нем невозможно учесть эффекты, связанные с наличием магнитного поля, что, впрочем, не является принципиальным для моделирования распространения КВ на протяженных радиопутьях.

Для случая двумерно-неоднородной среды, который с достаточной степенью точности реализуется на используемых нами радиопутьях, выпишем уравнения, описывающие траекторные и энергетические характеристики КВ сигналов. В горизонтально-неоднородной ионосфере закон Снеллиуса в сферической системе координат записывается в виде [3]

$$nR \sin \varphi - n_0 R_0 \sin \varphi_0 = \int_{R_0}^R \frac{\partial n}{\partial \theta} dS \quad (1)$$

Здесь n - показатель преломления, R_0 - радиус Земли, φ - угол, составляемый лучом с вертикалью в текущей точке траектории, R - расстояние от центра Земли до текущей точки луча, θ - центральный угол, dS - элемент длины луча, индекс "0" относится к точке на поверхности Земли.

Групповое время распространения рассчитывается по формуле

$$t_{гр} = \frac{1}{c} \int_{R_0}^R \frac{(1 + \tan^2 \varphi)^{1/2} dR}{n}, \quad (2)$$

где c - скорость света.

Амплитуда волны рассчитывается с учетом поглощения, пространственного ослабления, фокусировки и потерь при отражении от Земли. Потери на неотклоняющее поглощение, обусловленное соударениями элек-

тронов вычисляется по формуле

$$\Gamma(dB) = 4.64 \times 10^4 \int_{R_0}^R \frac{N \nu_{\text{эфф}} (1 + \tan^2 \varphi)^{1/2} dR}{n(\omega^2 + \nu_{\text{эфф}}^2)} \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f$, f - частота излучения, $\nu_{\text{эфф}}$ - эффективная частота соударений электронов.

В приближении ГО рефракционный фактор фокусировки (дефокусировки) определяется выражением [4]

$$F = \frac{D^2 \sin \varphi_0}{R_0^2 \cos \varphi_1} \left| \frac{d\theta}{d\varphi_0} \right|^{-1} \quad (4)$$

Здесь D - расстояние от излучателя до точки приема. Если $F > 1$, то имеет место фокусировка лучей по сравнению со свободным пространством, если $F < 1$, то происходит дефокусировка.

Для многоскачкового распространения потери при каждом отражении от Земли приняты равными 2 дБ, что согласуется с данными [5].

С математической точки зрения метод сводится к решению задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. В данной программе ее решение проводится методом Рунге-Кутты с модификацией Мерсона.

Программа создана с расчетом на быструю смену моделей ионосферы, которые могут задаваться как аналитически, так и таблично. В качестве модели регулярной ионосферы используется трехслойная модель, состоящая из слоев D, E и F_2 . Ионизация в слое D задается либо таблично, либо аналитически по модели Гуревича и Цедилиной [6], а в слоях E и F_2 описывается параболическим законом

$$f_o^2 = f_1^2 \left[1 - \frac{(z - z_1)^2}{y_1^2} \right], 100 \text{ км} \leq z \leq z_1, \quad (5)$$

где f_o - плазменная частота, y_1 - полуширина слоя E, f_1 - критическая частота слоя E

$$f_o^2 = f_2^2 \left[1 - \frac{(z - z_2)^2}{y_2^2} \right], z \geq z_*, \quad (6)$$

где z_2 - высота слоя F_2 , y_2 - полутолщина слоя, f_2 - критическая частота слоя F_2 .

Распределение концентрации в долине между слоями E и F_2 принято постоянным по высоте, то есть

$$f_o^2 = f_1^2, z_1 \leq z \leq z_* \quad (7)$$

здесь высота z_* определяется из (6) и (7)

$$z_* = z_2 - y_2(1 - f_1^2/f_2^2)^{1/2} \quad (8)$$

Критические частоты, высоты максимумов и полутолщины слоев задаются на сетке с любым шагом либо по прогнозам, либо по реальным ионосферным данным. Высотная зависимость частоты соударений выбрана экспоненциальной в соответствии с экспериментальными данными [7].

3. Моделирование КС. Сравнение с экспериментом

Известно, что с ростом протяженности трассы возрастает роль аномальных, в частности, волноводных мод распространения. Исследование таких мод требует комплексного подхода, сочетающего современную технику широкополосного зондирования с моделированием распространения КВ в различных геофизических условиях. Для определения преобладающих механизмов дальнего распространения КВ был проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных характеристик кругосветных сигналов (КС). Эксперимент проводился на трассе ЛЧМ зондирования Хабаровск-Нижний Новгород в декабре 1990г. [8]. Примеры ионограмм КС на трассе проходящей вблизи терминатора (угол α между трассой и линией терминатора варьировался от 6° до 20°) показаны на рис.1. На ионограммах КС в утренние часы 08.45-08.58 мск наблюдался "излом" дистанционно-частотной характеристики КС в окрестности частот $f_c \sim 16-17$ МГц. На частотах $f < f_c$ групповая задержка КС уменьшалась с частотой $\dot{\tau}_g = \partial\tau/\partial f \sim -100\mu\text{s}/\text{МГц}$, а на частотах $f > f_c$ - величина $\dot{\tau}_g > 0$ ($\sim 80\mu\text{s}/\text{МГц}$). Наличие излома, на наш взгляд, может быть связано со сменой преобладающих механизмов формирования поля КС.

Анализ данных проводился на основе моделирования. Распределение ионизации вдоль трассы задавалось по долгосрочным прогнозам. Примеры траекторий КС на частотах $f < f_c$ и $f > f_c$ показаны на рис.2 а. Здесь же показаны ход критической частоты f_oF_2 и высоты максимума слоя F_2 (h_mF_2) вдоль трассы. Согласно расчетам при углах $\alpha \sim 10 - 15^\circ$ (08-09 мск) на трассе существуют оптимальные условия

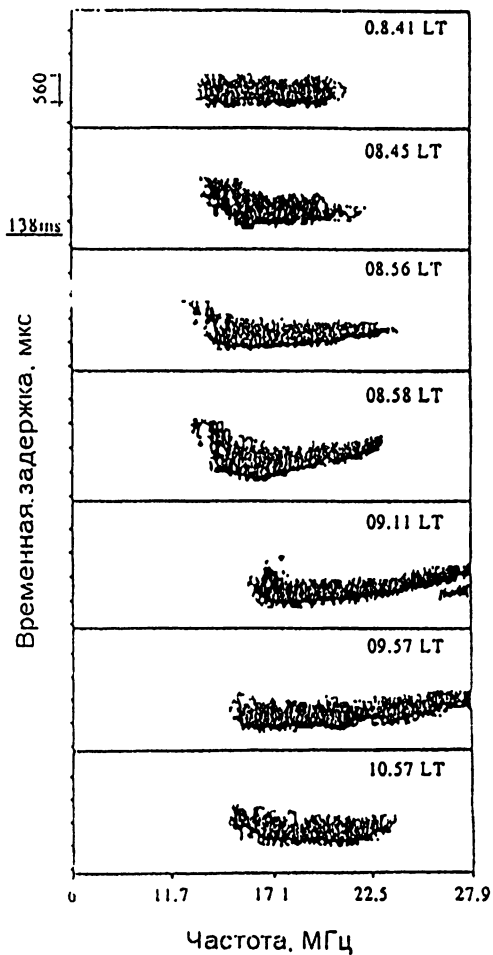


Рис.1 Примеры ионограмм кругосветного сигнала на трассе Хабаровск-Н.Новгород. 11 декабря 1990г.

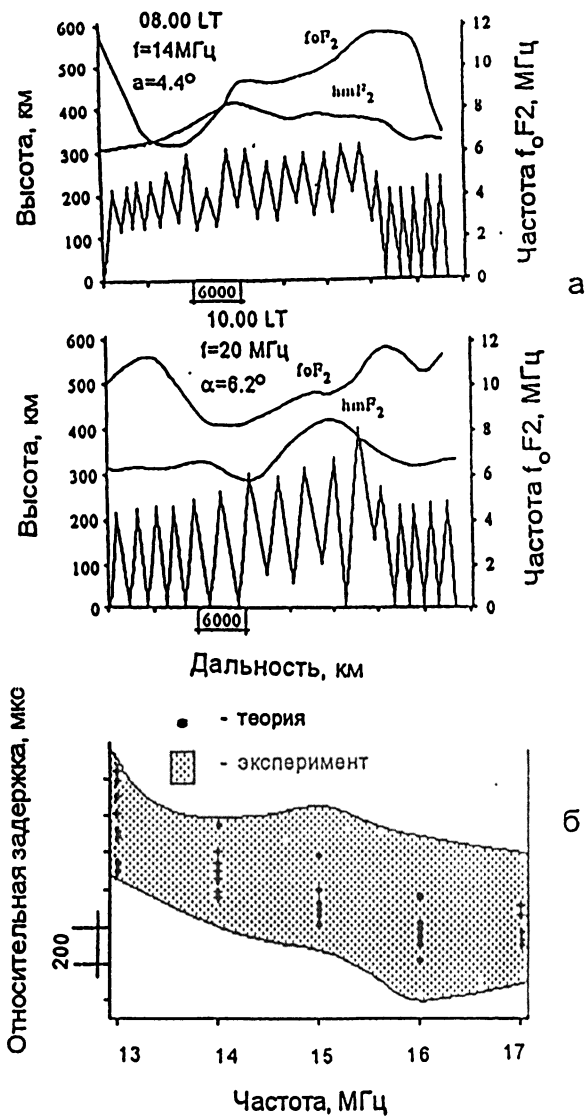


Рис.2 Лучевые траектории КС на трассе Хабаровск-Н.Новгород (а) и дисперсионные характеристики низкочастотной ветви КС (б).

для волноводного распространения в межслоевом канале FE, захват и выход из которого осуществляются за счет рефракции радиоволн на горизонтальных градиентах ионизации. На низких частотах эффект рефракции проявляется сильнее и волна большую часть пути проходит в приподнятом канале. С ростом частоты влияние рефракции на удержание волны в канале уменьшается и наряду с волноводными модами в формировании поля КС дают вклад скачковые и рикошетирующие моды. Для малых углов $\alpha \sim 5 - 7^\circ$ (10.00мс) распределение ионизации вдоль трассы более однородно и основным механизмом становится скачковый способ распространения КС. Проводилось сопоставление экспериментальных и расчетных дисперсионных характеристик низкочастотной ветви КС на волноводном участке трассы Хабаровск-Нижний Новгород. Расчет выполнялся для приподнятого источника в межслоевом канале FE для различных углов излучения ($0-8^\circ$), отсчитываемых от горизонтали. При этом учитывались только волноводные моды, распространяющиеся без промежуточных отражений от Земли. Результаты расчетов представлены на рис.2 б. Сравнение данных показывает хорошее соответствие экспериментальной ($\dot{\tau}_g = -100\mu s/MГц$) и расчетной ($\dot{\tau}_g = -120\mu s/MГц$) значений крутизны дисперсионных характеристик низкочастотной ветви КС, что подтверждает волноводный механизм ее формирования.

Изучение частотных характеристик ослабления КС позволяет получить представление о роли различных слоев ионосферы и степени неоднородности распределения ионизации вдоль трассы в формировании энергетических характеристик сигналов. Моделирование амплитудно-частотной характеристики КС проводилось для источника излучения в канале и источника на Земле для более четкого выделения особенностей энергетических характеристик волноводной и скачковой мод распространения. На рис.3 а,б соответственно показаны частотные зависимости ослабления скачковой моды (источник излучения на Земле, протяженность трассы ~ 36000 км) и волноводной моды (источник излучения в канале, минимальная высота отражения $z_{min}^{отр} > 115$ км, протяженность трассы ~ 28000 км, которую согласно расчетам (см. рис. 2 а) КС проходит в межслоевом канале). Из рисунков видно, что для волноводной моды характерна более слабая частотная зависимость ослабления по сравнению со скачковой модой. Крутизна ослабления волноводной моды $p \simeq 0.3$ дВ/МГц, а скачковой моды $p \simeq 6$ дВ/МГц.

Следует отметить, что результаты моделирования АЧХ согласуются с экспериментальными данными по наблюдению КС вблизи тер-

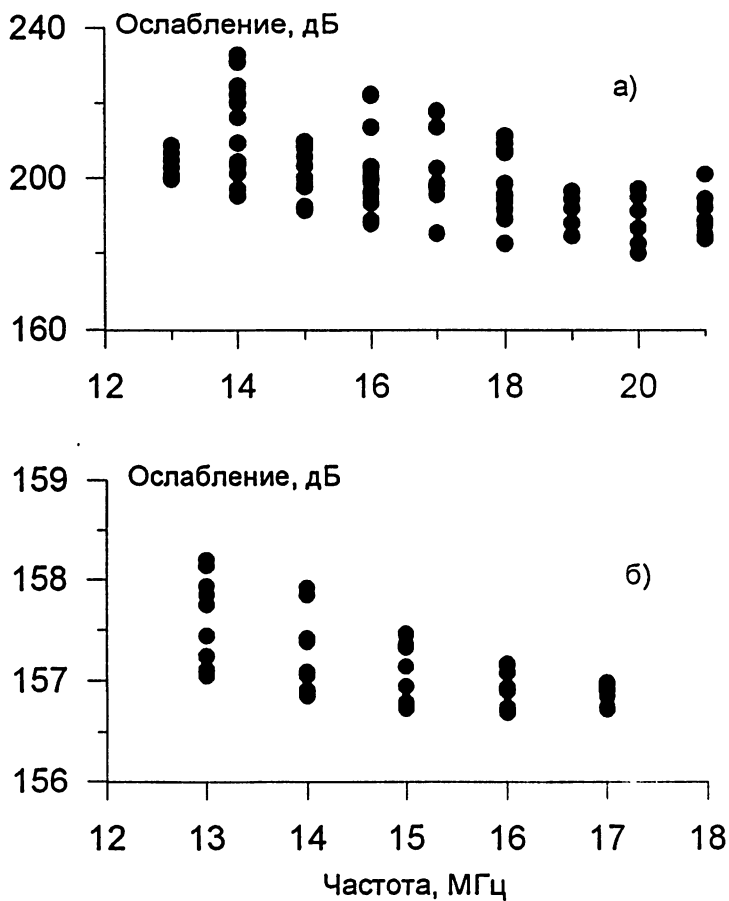


Рис.3 Частотная зависимость ослабления сигнала. Источник излучения на Земле (а) и в канале (б).

минатора на среднеширотном пункте [9], где наблюдалась пологая частотная зависимость ослабления низкочастотной ветви КС характерная для волноводной моды распространения.

4 Моделирование рассеяния радиоволн на магнитноориентированных неоднородностях. Сопоставление с экспериментальными данными по широкополосному зондированию искусственной области возмущения

В ионосферных исследованиях широко используется радарный метод, основанный на локации мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации естественного/искусственного происхождения с помощью импульсного и непрерывного излучения КВ и УКВ сигналов. Вследствии замагниченности ионосферной плазмы мелкомасштабные неоднородности вытянуты вдоль силовых линий геомагнитного поля и рассеяние на них характеризуется ракурсной чувствительностью - энергия рассеянного излучения сосредоточена в узком угловом интервале $\Delta\Psi$ вблизи конуса зеркального отражения ($\Delta\Psi \sim \lambda/\ell_{\parallel}$, где λ - длина волны, ℓ_{\parallel} - продольный масштаб неоднородностей). В КВ диапазоне существенное влияние на выполнение ракурсных условий рассеяния оказывает рефракция радиоволн. Это обстоятельство необходимо учитывать при установлении связи наблюдаемых характеристик рассеянного сигнала с параметрами неоднородностей. В естественных условиях, например, при изучении рассеяния радиоволн в полярной и экваториальной ионосфере для выделения эффекта рефракции необходимо использовать узконаправленные, сканируемые по углам антенные системы. Задача изучения роли рефракции заметно упрощается, если локализовать область с рассеивающими неоднородностями, например, путем создания искусственных неоднородностей за счет воздействия на ионосферную плазму мощным пучком декаметровых радиоволн.

Пусть известны географические координаты передатчика (широта- φ_t , долгота- λ_t), приемника (φ_r, λ_r), а проекция центра рассеивающей области (РО) на поверхность Земли имеет координаты $\varphi_{\text{ц}}, \lambda_{\text{ц}}$. В расчетах область ионосферы, ответственная за рассеяние, задается в виде диска радиуса r_0 и толщиной d , положение которого по высоте может меняться в пределах ионосферного слоя. Считается, что рассеивающие неоднородности ориентированы вдоль силовых линий геомагнитного поля и занимают весь объем диска. Проводится расчет лучевых траекторий от излучателя до РО и от РО до приемного пункта.

Координаты $\varphi_{\text{тек}}, \lambda_{\text{тек}}$ рассеивающих центров в РО выбирают как

точки пересечения семейства окружностей (S_i), $i = 0, 1, 2, \dots, k$ с центром в излучателе (φ_t, λ_t) и пучка геодезических кривых ρ_i , $i = -N, \dots, 0, \dots, N$. Окружности S_0, S_k и кривые ρ_{-N}, ρ_N касаются границ РО. Кривая ρ_0 проходит через центр РО, а угол между любыми двумя соседними кривыми ρ_i и ρ_{i+1} равен Ψ/N , где Ψ - угол между ρ_0 и ρ_N , определяемый по формуле

$$\Psi = \arcsin\left(\frac{\sin r_o/R_o}{\sin D_o/R_o}\right), \quad (9)$$

где R_o - радиус Земли, D_o - расстояние между излучателем и проекцией центра РО на поверхность Земли.

При этом координаты $\varphi_{\text{тек}}, \lambda_{\text{тек}}$ рассчитываются по формулам

$$\varphi_{\text{тек}1,2} = \arcsin[\sin \varphi_t \cos(D_{\text{тек}}/R_o) + \cos \varphi_t \sin(D_{\text{тек}}/R_o) \cos(\chi_o \pm \delta\Psi)] \quad (10)$$

$$\lambda_{\text{тек}1,2} = \lambda_t + \arcsin \frac{\sin(D_{\text{тек}}/R_o) \sin(\chi_o \pm \delta\Psi)}{\cos \varphi_{\text{тек}}}, \lambda_{\text{тек}} > \lambda_t \quad (11)$$

$$\lambda_{\text{тек}1,2} = \lambda_t - \arcsin \frac{\sin(D_{\text{тек}}/R_o) \sin(\chi_o \pm \delta\Psi)}{\cos \varphi_{\text{тек}}}, \lambda_{\text{тек}} < \lambda_t \quad (12)$$

$$\chi_o = \arccos \frac{\sin \varphi_{\text{ц}} - \sin \varphi_t \cos(D_o/R_o)}{\cos \varphi_t \sin(D_o/R_o)} \quad (13)$$

Здесь $D_{\text{тек}}$ - проекция на поверхность Земли траектории луча от передатчика до текущей точки в РО, χ_o - азимутальное направление из передатчика на центр РО, $\delta\Psi$ - текущий азимутальный угол, отсчитываемый от направления на центр РО с дискретом Ψ/N .

Для каждой текущей точки (по шагу интегрирования) лучевой траектории, пересекающей РО, рассчитываются ракурсные условия рассеяния

$$\cos I \cos \alpha \cos \varphi_1 + \sin \alpha \sin I = \cos I \cos \beta \cos \varphi_2 + \sin \beta \sin I, \quad (14)$$

где I - наклонение магнитного поля в РО, α и β - углы, составляемые волновыми векторами соответственно падающей \vec{k}_o и рассеянной \vec{k}_s волн с горизонталью в РО, φ_1 и φ_2 - азимутальные углы между проекциями волновых векторов \vec{k}_o и \vec{k}_s и магнитного поля на горизонтальную плоскость соответственно.

Для восточного склонения δ магнитного поля имеем

$$\varphi_1 = \gamma_1 + \delta, (\lambda_{\text{тек}} > \lambda_t)$$

$$\varphi_1 = \gamma_1 - \delta, (\lambda_{\text{тек}} < \lambda_t)$$

$$\gamma_1 = \arccos \frac{\sin \varphi_t - \sin \varphi_{\text{тек}} \cos(D_{\text{тек}}/R_o)}{\cos \varphi_{\text{тек}} \sin(D_{\text{тек}}/R_o)} \quad (15)$$

$$\varphi_2 = 180^\circ - \gamma_2 + \delta, (\lambda_r > \lambda_{\text{тек}})$$

$$\varphi_2 = 180^\circ - \gamma_2 - \delta, (\lambda_r < \lambda_{\text{тек}})$$

$$\gamma_2 = \arccos \frac{\sin \varphi_r - \sin \varphi_{\text{тек}} \cos(D/R_o)}{\cos \varphi_{\text{тек}} \sin(D/R_o)} \quad (16)$$

Здесь D - проекция на поверхность Земли траектории луча от текущей точки РО до приемного пункта

$$\cos(D/R_o) = \sin \varphi_r \sin \varphi_{\text{тек}} + \cos \varphi_r \cos \varphi_{\text{тек}} \cos(\lambda_{\text{тек}} \pm \lambda_r) \quad (17)$$

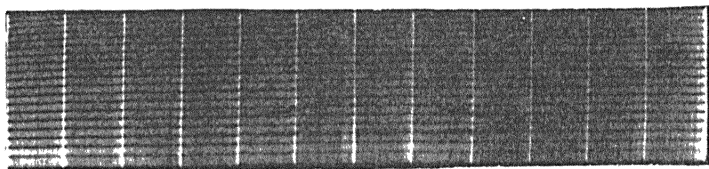
Затем для вычисленного из (14) угла β и соответствующих начальных условий проводится расчет лучевых траекторий между текущей точкой РО и приемным пунктом. Попадание в пункт приема контролируется с помощью условия $z_o / \tan |\beta_o| \leq C_p$, где z_o и β_o - высота и угол прихода рассеянного луча. Величина C_p определяется поперечными размерами на Земле зоны ракурсного приема рассеянных сигналов и составляет ~ 20 -40 км.

Программа позволяет рассчитывать геометрическое место точек внутри возмущенной области (зеркальную поверхность), ответственных за рассеяние для заданного положения излучателя и приемника. В этом случае выводятся на график географические координаты точек, удовлетворяющие условию ракурсного рассеяния радиоволн.

На основе разработанной программы было проведено моделирование экспериментальных данных по широкополосному зондированию модифицированной ионосферы. Эксперимент проводился в апреле 1982г. на трассе Мурманск-Киев [10]. В приемном пункте расположенном в п. Дымер Киевской области осуществлялся синхронный прием (на горизонтальную ромбическую антенну, ориентированную на область возмущения) сигналов станции НАИС, расположенной вблизи Мурманска. Передатчик НАИС работал в диапазоне частот 3.5-27.5 МГц. Время пробега по частоте составляло 2 минуты. Ионосфера возмущалась

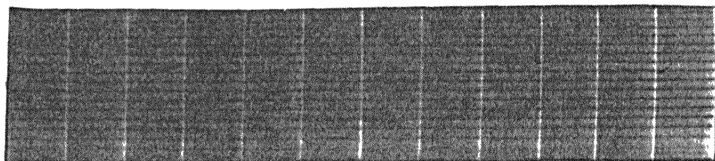
мощным пучком радиоволн с помощью нагревного стенда, расположенного в п. Зименки Нижегородской области. Нагревный передатчик мощностью 20 МВт работал на частоте волны накачки f_n близкой к критической частоте $f_o F_2$ ($f_n \leq f_o F_2$) циклами: 5 мин. - нагрев, 5 мин. - пауза. Во время работы мощного передатчика на ионограммах наклонного зондирования (НЗ) наблюдался дополнительный сигнал, обусловленный ракурсным рассеяние радиоволн на искусственных мелкомасштабных магнитноориентированных неоднородностях. Примеры ионограмм НЗ на трассе Мурманск-Киев в период работы нагревного стенда показаны на рис.4. Видно, что наряду с обычными модами

14 апреля 1982г.
19 час.32 мин.



22 час.32 мин.

Здел.
1мс



3.5 7.5 11.5 15.5 19.5 23.5 27.5

Частота МГц

Рис.4 Ионограммы наклонного зондирования на трассе Мурманск-Киев в период работы нагревного передатчика в п. Зименки Нижегородской области.

1F2, 2F2, 3F2 наблюдается дополнительная (ракурсная) мода - РМ, с задержкой ~ 2 мс относительно моды 1F2. РМ занимает интервал частот $\Delta f \sim 1$ МГц и превышает на 1-3 МГц максимально наблюдаемую частоту (МНЧ) моды 1F2. Следует отметить, что МНЧ РМ в целом коррелирует с поведением МНЧ 1F2.

На основе скорректированных прогнозных данных ионосферных параметров проводился синтез ионограмм прямого сигнала на трассе Мурманск-Киев и рассеянного сигнала на трассе Мурманск-Зименки-Киев. Корректировка состояла в подборе критической частоты f_oF_2 вдоль трассы для обеспечения примерного совпадения экспериментальных и расчетных значений МНЧ 1F2 прямой трассы Мурманск-Киев. Следует отметить, что в среднем скорректированные значения f_oF_2 превышали прогнозные на 20-40%. Затем с новыми значениями проводился синтез ионограмм рассеянного сигнала на трассе Мурманск-Зименки-Киев. В расчетах РО задавалась в виде диска радиуса 50 км и толщиной 20-40 км с центром над пунктом нагрева. Горизонтальные размеры диска определяются угловой шириной диаграммы антенны возмущающего передатчика, а его положение по высоте выбиралось исходя из условий проведения эксперимента (нагрев вблизи максимума слоя F_2). На рис.5 показаны синтезированные по скорректированным прогнозным данным ионограммы прямого и рассеянного сигналов. Сопоставление расчетных и экспериментальных ионограмм показывает их достаточно хорошее соответствие. Некоторое отличие относится к величине частотной протяженности ракурсной моды и связано, по всей вероятности, с неточностью задания интервала высот расположения эффективного объема рассеяния. Разработанная программа может быть использована в экспериментах по радарному зондированию мелкомасштабных неоднородностей естественного/искусственного происхождения, а также для корректировки ионосферной модели по результатам лоцирования области возмущения.

5. Расчет доплеровского сдвига частоты

Известно, что возникающие в атмосфере акустико-гравитационные волны различной природы распространяются на высоты ионосферы и являются источником перемещающихся ионосферных возмущений. Для детектирования движения ионосферных неоднородностей широко используется доплеровский метод. Он основан на индикации быстрых изменений фазового пути передаваемого сигнала и имеет высокую чув-

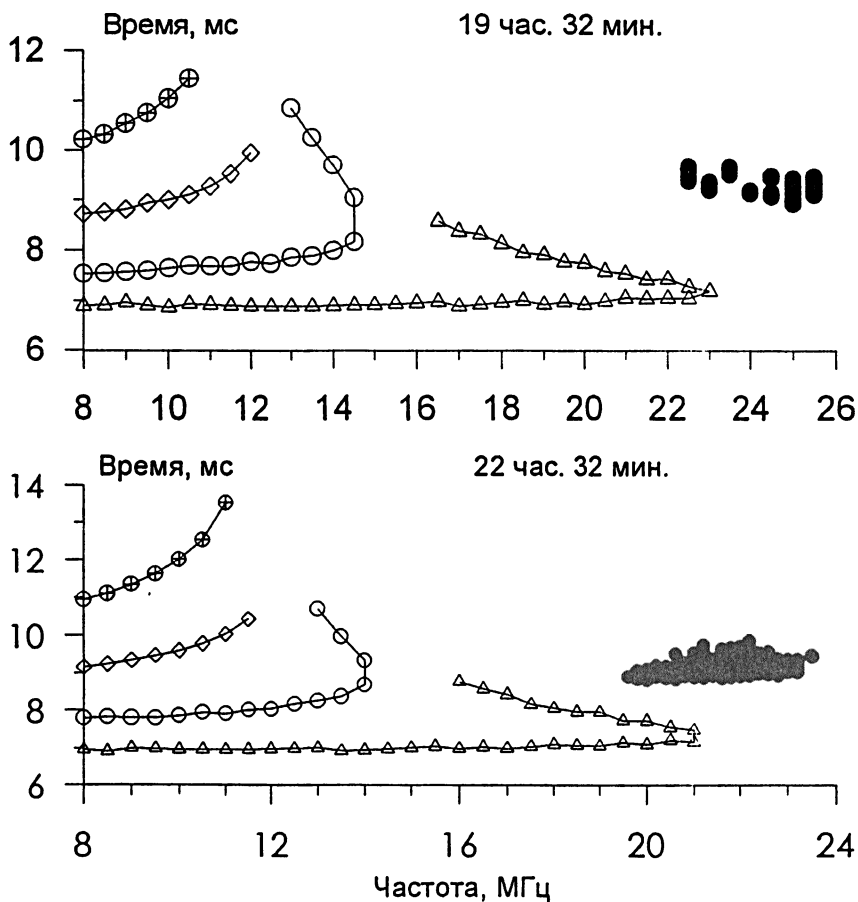


Рис.5 Синтезированные ионограммы наклонного зондирования на трассе Мурманск-Киев с учетом ракурсного рассеяния радиоволн от искусственной области возмущения, расположенной над п. нагрева (Зименки Нижегородской области).

ствительность. Доплеровский метод применяется при вертикальном, наклонном, возвратно-наклонном зондировании ионосферы. В настоящем разделе описывается связь доплеровского сдвига частоты (ДСЧ) принимаемого сигнала с параметрами движущейся неоднородности. Рассматривается случай наклонного зондирования, когда неоднородность движется поперек трассы. Для каждого дискретного положения движущейся неоднородности рассчитывается длина фазового пути. Затем для заданной горизонтальной составляющей скорости движения неоднородности вычисляются производные по времени от длины фазового пути между двумя последовательными положениями неоднородности и находится ДСЧ

$$\Delta f = -\frac{f}{c} \frac{dP}{dt} \quad (18)$$

В расчетах модель среды распространения задается в виде

$$N = N_o + \Delta N, \quad (19)$$

где N_o - регулярная составляющая электронной концентрации, ΔN - возмущение ионосферной плазмы. В расчетах возмущение задавалось в виде гауссоподобной крупномасштабной неоднородности

$$\Delta N = (\Delta N)_o \exp\left[-\left(\frac{x - x_o(t)}{\Delta x}\right)^2\right] \exp\left[-\left(\frac{z - z_o(t)}{\Delta z}\right)^2\right] \quad (20)$$

Здесь $(\Delta N)_o$ - возмущение в центре неоднородности, $(x_o(t), z_o(t))$ - текущие координаты центра движущейся неоднородности, $(\Delta x, \Delta z)$ - полутолщины возмущения по осям x и z соответственно (x - координата вдоль трассы, z - поперечная к x координата в плоскости распространения). При движении неоднородности поперек трассы для каждого положения неоднородности расчет осуществляется для слегка отличающихся ионосферных условий, соответствующих смещению неоднородности поперек трассы зондирования.

В расчетах горизонтальный и вертикальный размеры неоднородности приняты равными 10 км. Относительное отклонение электронной концентрации в центре неоднородности взято равным $\delta N = \frac{(\Delta N)_o}{N} = 15\%$. Расчеты ДСЧ выполнены для трассы Н.Новгород-Йошкар-Ола протяженностью 220 км. Параметры невозмущенной ионосферы были взяты следующие: $f_oF_2 = 5.6$ МГц, $hF_2 = 240$ км, $\Delta hF_2 = 50$ км, $f_oE = 1.9$ МГц, $hE = 110$ км, $\Delta hE = 15$ км. Частота зондирования

$f = 5.7$ МГц. Неоднородность располагалась в середине трассы на высоте отражения невозмущенной траектории. Горизонтальная скорость движения неоднородности поперек трассы взята равной 250 м/с. На рис. 6 показан график изменения с течением времени ДСЧ. Видно, что ДСЧ вначале растет до максимального положительного значения, затем падает до максимального отрицательного значения и в дальнейшем приближается к нулевому значению. Такой вид ДСЧ обусловлен тем, что вначале, когда неоднородность с положительным возмущением начинает пересекать трассу распространения, то за счет увеличения электронной концентрации уменьшается показатель преломления и соответственно уменьшается фазовый путь. Максимальный ДСЧ имеет место при наибольших градиентах изменения электронной концентрации. Изменение знака ДСЧ происходит, когда меняется знак изменения фазового пути.

Разработанная методика позволяет путем варьирования параметров движущейся неоднородности, ее расположения относительно области отражения, скорости движения моделировать реальные ситуации которые возникают при наличии ПИВ, а также моделировать влияние на спектральные характеристики КВ сигналов возмущений, возникающих при активном воздействии на атмосферу (взрывы, нагрев и др.).

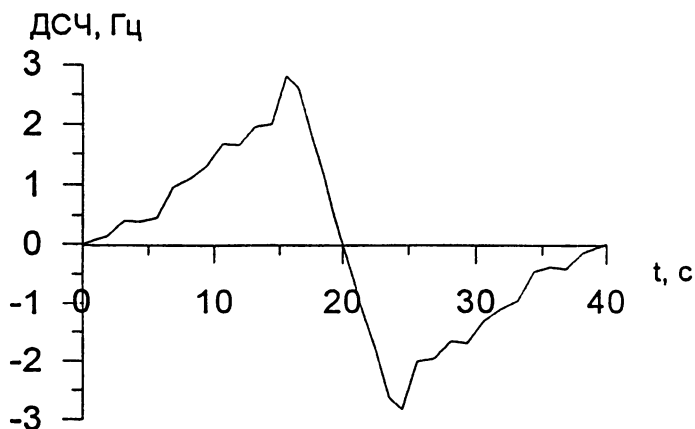


Рис.6 Динамика изменения доплеровского сдвига частоты на трассе Н.Новгород-Йошкар-Ола во время движения крупномасштабной неоднородности поперек трассы.

6. Заключение

Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом.

1. На основе разработанной программы проведено моделирование дисперсионных и амплитудно-частотных характеристик КС на трассе Хабаровск-Н.Новгород. Определена роль горизонтальных градиентов ионизации в формировании поля КС на трассах проходящих вблизи терминатора. Показано, что при малых углах α ($\sim 5 - 7^\circ$) составляемых трассой с терминатором (степень неоднородности трассы $q = \frac{(f_oF_2)_{max} - (f_oF_2)_{min}}{(f_oF_2)_{max} + (f_oF_2)_{min}} \leq 0.17$; здесь $(f_oF_2)_{max}$ и $(f_oF_2)_{min}$ - максимальное и минимальное значения критической частоты вдоль трассы распространения, взятые из прогноза, см. рис.2 а), преобладающим является скачковый способ распространения, характеризуемый увеличением групповой задержки с ростом частоты и существенным влиянием нижних слоев ионосферы на энергетику сигнала. При углах $\alpha \sim 10 - 15^\circ$ ($q \approx 0.25-0.3$) на трассе реализуются оптимальные условия для рефракционного захвата радиоволн в межслоевой канал FЕ и выхода из него на поверхность Земли. В то же время трасса остается достаточно однородной, чтобы удерживать захваченные в канал волны на значительной части трассы. Для волноводной моды характерно уменьшение групповой задержки с ростом частоты и более пологая частотная зависимость ослабления по сравнению со скачковой модой. При углах $\alpha > 15 - 20^\circ$ сильная неоднородность трассы ($q > 0.3$) приводит к снижению МНЧ, соответственно сильному поглощению скачковой моды в нижних слоях ионосферы и непрохождению КС (уровень сигнала лежит за порогом обнаружения).

2. На основе моделирования экспериментальных данных по широкополосному зондированию модифицированной ионосферы исследовано влияние регулярной рефракции на ракурсное рассеяние радиоволн на искусственных магнитоориентированных неоднородностях. Показано, что в диапазоне коротких радиоволн рефракция в значительной мере определяет частотную зависимость появляемости ракурсной моды. Разработанная программа может быть использована при постановке экспериментов и интерпретации результатов радарного зондирования мелкомасштабных неоднородностей естественного и искусственного происхождения.

3. Разработана программа расчета доплеровского сдвига частоты

при наклонном зондировании ионосферы при наличии движущейся крупномасштабной неоднородности. Программа может быть использована при разработке динамической модели ионосферного КВ канала.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований - грант N 95-02-03582-а и Госкомвуза РФ - грант N 95-0-8.1-4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахметьева Н.В., Жислин Г.М., Игнатъев Ю.А. и др. Расчет характеристик коротковолновых сигналов наклонного зондирования в трехмерно-неоднородной ионосфере.- Препринт N 275, Горький, НИРФИ, 1989, 49с.
2. Бахметьева Н.В., Брянцев В.Ф., Бубукина В.Н. и др. Техника средств связи, серия СС, 1991, вып.3, с.3
3. Альперт Я.Л. Геомагнетизм и аэрономия, 1963, т.3, N 4, с.626
4. Керблей Т.С., Ковалевская Е.М. О траекториях коротких радиоволн в ионосфере.- М.: Наука, 1974
5. Отчет рабочей группы МККР. Документ V1/21, Варшава, 1961
6. Гуревич А.В., Цедилина Е.Е. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн.- М.: Наука, 1979
7. Aggarval K.M., Nath N., Setty C.S.G.K. Planet. and Space Sci., 1979, v.27, N 6, p.753
8. Uryadov V.P., Ryabova N.V., Ivanov V.A., Shumaev V.V. J. Atmos.Terr. Phys., 1995, v.57, N 11, p.1271
9. Алебастров В.А., Гойхман Э.Ш., Заморин И.М. и др. Основы загоризонтной радиолокации.- М.: Радио и связь, 1984, 256с.
10. Вовк В.Я., Ерухимов Л.М., Максименко О.И. и др. Геомагнетизм и аэрономия, 1984, т.24, N 3, с.503