

Нижегородский научно-исследовательский радиофизический институт
Минобразования РФ

П р е п р и н т N 432

**МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРНОГО КАНАЛА СВЯЗИ С
ВОЛНОВОДНЫМИ МОДАМИ В УСЛОВИЯХ
МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМ
РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ**

Урядов В. П.
Понятов А. А.

Нижний Новгород 1997

Урядов В. П., Понятов А. А.

МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРНОГО КАНАЛА СВЯЗИ С ВОЛНОВОДНЫМИ МОДАМИ В УСЛОВИЯХ МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

// Препринт N 432. — Нижний Новгород: НИРФИ, 1997. —15 с.

УДК 550.388.2

Рассматривается модель ионосферного канала, включающего скачковые и полноводные моды для расчета надежности КВ радиосвязи. Получены выражения для оценки надежности КВ связи для 2-х лучевого канала. Представлены экспериментальные данные по модовой структуре сигнала на протяженных среднеширотных трассах в условиях естественной и искусственно возмущенной ионосферы. Проведены оценки надежности для различных параметров КВ сигналов.

1. Появившаяся в последние годы возможность управления дальним распространением КВ путем вывода на поверхность Земли волноводных мод за счет ракурсного рассеяния радиоволн на искусственных мелкомасштабных неоднородностях может представлять интерес с точки зрения повышения надежности КВ связи при использовании дополнительного канала распространения радиоволн [1]. В настоящей работе рассматривается модель ионосферного канала, когда наряду со скачковым механизмом реализуется механизм волноводного распространения и изложен подход к оценке надежности КВ радиосвязи в условиях модификации ионосферы мощным радиоизлучением.

Не нарушая общности изложения, для простоты анализа рассмотрим случай, когда существует только основная мода прямого сигнала и ракурсная мода, обусловленная выводом радиоволн из ИВК за счет рассеяния на искусственных мелкомасштабных неоднородностях. Согласно [2] надежность КВ связи для данного времени суток можно представить в виде

$$R = q_1 P_1 + q_2 P_2 + q_{12} P_{12}, \quad (1)$$

где q_1 и q_2 - вероятности наличия только первой и второй мод соответственно, P_1 и P_2 - вероятности превышения заданного отношения сигнал/помеха $(S/N)_o$, когда существует только первая и вторая мода соответственно, q_{12} - вероятность одновременного наличия обеих мод, P_{12} - вероятность того, что одновременно для обеих мод $(S/N) > (S/N)_o$.

Для оценки q и P используем нормальные законы распределения ежедневных вариаций ННЧ, МНЧ и (S/N) для отдельных мод сигнала и двумерный закон распределения соответствующих величин при одновременном наличии обеих мод

$$Z(x, p, \sigma) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma} \exp \left[-\frac{(x-p)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (2)$$

$$Z(x_1, x_2, p_1, p_2, \sigma_1, \sigma_2, \rho_{12}) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2(1-\rho_{12}^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2(1-\rho_{12}^2)}\left[\frac{(x_1-p_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\rho_{12}(x_1-p_1)(x_2-p_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(x_2-p_2)^2}{\sigma_2^2}\right]\right). \quad (3)$$

Здесь в качестве переменных x выступают величины: ННЧ, МНЧ, S/N. p - средние значения этих величин, σ - стандартное отклонение, ρ_{12} - межмодовый коэффициент корреляции ННЧ, МНЧ, S/N.

Принимая во внимание, что, как правило, вариации ННЧ и МНЧ независимы,¹ наличие скачковой моды 1 на частоте f можно представить в виде

$$Q_1 = \int_{-\infty}^f \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma_{1н}} \exp\left(-\left[\frac{(x_1 - \langle(\text{ННЧ})_{1>})}{2\sigma_{1н}^2}\right]^2\right) dx_1, \\ \int_f^{\infty} \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma_{1м}} \exp\left(-\left[\frac{(x_2 - \langle(\text{МНЧ})_{1>})}{2\sigma_{1м}^2}\right]^2\right) dx_2. \quad (4)$$

Аналогично, наличие ракурсной моды 2 в интервале частот МНЧ - ННЧ дается выражением

$$Q_2 = \int_{-\infty}^f \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma_{2н}} \exp\left(-\left[\frac{(x_1 - \langle(\text{ННЧ})_{2>})}{2\sigma_{2н}^2}\right]^2\right) dx_1, \\ \int_f^{\infty} \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma_{2м}} \exp\left(-\left[\frac{(x_2 - \langle(\text{МНЧ})_{2>})}{2\sigma_{2м}^2}\right]^2\right) dx_2. \quad (5)$$

Для проведения оценок выражения (4) и (5) удобно представить в виде

$$Q_1 = [0.5 + \Phi(l_{1н})][0.5 + \Phi(l_{1м})], \quad (6)$$

$$Q_2 = [0.5 + \Phi(l_{2н})][0.5 + \Phi(l_{2м})], \quad (7)$$

где $\Phi(l)$ - функция Лапласа

$$\Phi(l) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_0^l \exp(-u^2/2) du,$$

$$l_{1н} = \frac{f - \langle(\text{ННЧ})_{1>}}{\sigma_{1н}}, l_{1м} = \frac{\langle(\text{МНЧ})_{1>} - f}{\sigma_{1м}}, l_{2н} = \frac{f - \langle(\text{ННЧ})_{2>}}{\sigma_{2н}}, l_{2м} = \frac{\langle(\text{МНЧ})_{2>} - f}{\sigma_{2м}}.$$

¹МНЧ определяется в основном параметрами верхней ионосферы (слои F_2 и F_1), а ННЧ - поглощением в нижней ионосфере (слои D и E), чувствительностью аппаратуры и помеховой обстановкой.

Следует отметить, что для ракурсной моды 2 вариации ННЧ и МНЧ могут быть коррелированы. В этом случае наличие моды будет определяться двумерным нормальным законом распределения для ННЧ и МНЧ и записывается в виде

$$\bar{Q}_2 = \int_{-\infty}^f \int_f^{\infty} \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2(1-\rho_{12}^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2(1-\rho_{12}^2)} \left[\frac{(x_1 - \langle(\text{ННЧ})_2\rangle)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\rho_{12}(x_1 - \langle(\text{ННЧ})_2\rangle)(x_2 - \langle(\text{МНЧ})_2\rangle)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(x_2 - \langle(\text{МНЧ})_2\rangle)^2}{\sigma_2^2} \right]\right) dx_1 dx_2. \quad (8)$$

Здесь ρ - коэффициент корреляции между ПНЧ и МНЧ ракурсной моды. Для оценок величины ρ мы используем базу данных характеристик КВ сигналов, рассеянных на искусственных мелкомасштабных неоднородностях на радиолинии широкополосного импульсного зондирования Мурманск-Н.Новгород-Киев[3]. Согласно оценкам коэффициент корреляции между ННЧ и МПЧ ракурсной моды составляет значительную величину $\rho \sim 0,96$. Поэтому в дальнейшем наличие ракурсной моды будем определять с помощью (8).

Считая, что появление дополнительного волноводного канала не связано со скачковой модой и предполагая, что для скачковой моды 1 ННЧ и МПЧ не коррелированы, выражение для вероятности q_{12} одновременного наличия обеих мод 1 и 2 можно представить в виде

$$q_{12} = Q_1 \bar{Q}_2 \quad (9)$$

Тогда вероятность наличия только моды 1 равна

$$q_1 = Q_1 - q_{12} = Q_1(1 - \bar{Q}_2), \quad (10)$$

а только моды 2

$$q_2 = \bar{Q}_2 - q_{12} = \bar{Q}_2(1 - Q_1). \quad (11)$$

Как уже говорилось, предполагается, что ежедневные вариации мощности сигнала и помехи подчиняются нормальному закону. При этом стандартное отклонение отношения S/N можно представить в виде

$$\sigma_{s/n} = (\sigma_s^2 + \sigma_n^2 - 2\rho\sigma_s\sigma_n)^{1/2}, \quad (12)$$

где ρ - коэффициент корреляции между мощностью сигнала и помехи, σ_s и σ_n - стандартное отклонение мощности сигнала и помехи соответственно.

В КВ диапазоне уровень помех на Земле определяется в основном помехами от радиостанций расположенных в пределах зоны $\sim 1000 \dots 3000$ км от места приема и зависит от времени суток, сезона, географического положения, параметров приемной антенны. В точке приема происходит сложение сигналов, приходящих с различных направлений, так что наблюдается слабая корреляция между вариациями помех день ото дня. Поэтому принимаем, что $\rho = 0$ и

$$\sigma_{s/n} = (\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^{1/2}. \quad (13)$$

При этих условиях вероятность того, что отношение S/N превышает заданный уровень $(S/N)_o$ когда существует только мода 1 равна

$$P_1 = \int_{(S/N)_o}^{\infty} \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma_{p_1}} \exp \left[-\frac{(x - \langle (S/N)_1 \rangle)^2}{2\sigma_{p_1}^2} \right] dx, \quad (14)$$

где $\langle (S/N)_1 \rangle$ - среднее значение S/N для моды 1, σ_{p_1} - стандартное отклонение для S/N .

Аналогично для моды 2 можно записать

$$P_2 = \int_{(S/N)_o}^{\infty} \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma_{p_2}} \exp \left[-\frac{(x - \langle (S/N)_2 \rangle)^2}{2\sigma_{p_2}^2} \right] dx, \quad (15)$$

где $\langle (S/N)_2 \rangle$ - среднее значение S/N для моды 2, σ_{p_2} - стандартное отклонение для S/N . Следует отметить, что значение $(S/N)_o$ для каждой частоты связано со временем суток, сезона, типа используемой антенны и может быть установлено на основе регулярных наблюдений на исследуемой трассе. Преобразуя (14) и (15) аналогично (6) и (7) получаем

$$P_1 = 0.5 + \Phi(h_1), \quad (16)$$

$$P_2 = 0.5 + \Phi(h_2), \quad (17)$$

где $\Phi(h)$ - функция Лапласа

$$\Phi(h) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_0^h \exp(-u^2/2) du,$$

$$h_1 = \frac{\langle (S/N)_1 \rangle - (S/N)_o}{(\sigma_{p_1}^2 + \sigma_n^2)^{1/2}}, \quad h_2 = \frac{\langle (S/N)_2 \rangle - (S/N)_o}{(\sigma_{p_2}^2 + \sigma_n^2)^{1/2}}.$$

Когда существуют обе моды, то предполагается, что сигналы проходят через разные области, имеют некоррелированные набег фаз, так что мощность суммарного сигнала есть сумма интенсивностей обеих мод. При этом вероятность того, что отношение S/N суммарного сигнала превышает заданный уровень $(S/N)_0$ равна

$$P_{12} = 1 - \int_{-\infty}^{(S/N)_0} \int_{-\infty}^{(S/N)_0} \frac{1}{2\pi\sigma_{r_1}\sigma_{r_2}(1-\rho^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\frac{(x_1 - \langle(S/N)_1\rangle)^2}{\sigma_{r_1}^2} - \frac{2\rho(x_1 - \langle(S/N)_1\rangle)(x_2 - \langle(S/N)_2\rangle)}{\sigma_{r_1}\sigma_{r_2}} + \frac{(x_2 - \langle(S/N)_2\rangle)^2}{\sigma_{r_2}^2} \right]\right) dx_1 dx_2, \quad (18)$$

где ρ коэффициент корреляции между $(S/N)_1$ и $(S/N)_2$.

Следует отметить, что поскольку волноводная мода распространяется выше основных поглощающих слоев ионосферы, а интенсивность скачковой моды в значительной мере определяется поглощением в D и E слоях, то вариации величин $(S/N)_1$ и $(S/N)_2$ можно считать независимыми, т.е. коэффициент корреляции между ними $\rho = 0$. В этом случае вероятность того, что суммарный сигнал S/N превышает заданный уровень $(S/N)_0$ может быть представлена в виде

$$P_{12} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2). \quad (19)$$

После подстановки (9), (10), (11) и (19) в (1) получим

$$R = Q_1 P_1 + \tilde{Q}_2 P_2 (1 - Q_1 P_1). \quad (20)$$

Из (20) следует, что при реализации в ионосфере волноводного распространения на частотах превышающих МПЧ скачковой моды, величина $Q_1 = 0$ и надежность КВ радиосвязи будет определяться выражением

$$R = \tilde{Q}_2 P_2, \quad (21)$$

т.е. дополнительным каналом распространения.

Выражения (1)–(21) могут быть использованы для оценки надежности КВ связи при наличии 2-х мод сигнала.

2. В настоящем разделе представлены некоторые экспериментальные данные, иллюстрирующие модовую структуру сигнала на протяженных среднеширотных трассах Хабаровск-Н.Новгород, Хабаровск-Йошкар-Ола в условиях естественной ионосферы, а также на трассе

Хабаровск-"Сура"-Темрюк (Краснодарский край) в условиях модификации ионосферы мощным радиоизлучением. Эти данные используются в дальнейшем для оценки надежности КВ связи.

Измерения в естественных условиях проводились в марте-апреле 1988г. на трассе Хабаровск-Н.Новгород, в сентябре 1997г. на трассе Хабаровск-Йошкар-Ола. Излучение непрерывных ЛЧМ сигналов осуществлялось в полосе частот 6-26,6 МГц на горизонтальную ромбическую антенну РГ $\frac{65}{4}$ 1($\lambda_0 = 19$ м). В Н.Новгороде прием проводился на горизонтальную ромбическую антенну РГ $\frac{65}{4}$ 1($\lambda_0 = 18$ м), в Йошкар-Оле - на широкополосный горизонтальный диполь. В качестве примера на рис.1 показаны ионограммы НЗ на трассе Хабаровск-Йошкар-Ола, зарегистрированные до (рис.1а) и после (рис.1б) магнитной бури. Из сравнения рисунков 1а и 1б видно, что в результате послебурового ионосферного эффекта солнечной вспышки (магнитная буря началась 03.09.1997г. в 18.20 UT) произошло уменьшение максимальной наблюдаемой частоты (МПЧ) с 21 МГц до 17 МГц, а распространение на трассе осуществлялось только верхним лучом вследствие сильного поглощения нижнего луча из-за дополнительной ионизации D и E слоев мощным корпускулярным излучением Солнца. В невозмущенных условиях на данной трассе, в основном, наблюдались 2-х, 3-х и 4-х скачковые моды, распространяющиеся через F-слой ионосферы. Идентификация мод производилась путем сопоставления экспериментальных и расчетных ионограмм. Измеренные зависимости вероятности приема отдельных мод сигнала от времени суток в умеренно-спокойных условиях на трассе Хабаровск-Н.Новгород показаны на рис.2. Из рис.2а видно, что в период с 06.00 до 20.00 мск наибольшей была вероятность приема моды 3F2; в среднем она составляла величину $p \sim 80-100\%$. В значительной мере это связано с оптимальными диаграммами антенн для излучения/приема данной моды. С 20.00 до 22.00 наибольшей была вероятность приема моды 2F2 с $p \sim 90\%$. Мода 4F2 наблюдалась в основном с 08.00 до 18.00 мск с $p \sim 50-70\%$. С точки зрения многолучевости и оценки надежности КВ связи представляют интерес данные о вероятности приема одновременно нескольких мод, например, 2F2 и 3F2, 2F2 и 4F2, 3F2 и 4F2, а также 2F2, 3F2 и 4F2. Эти зависимости приведены на рис.2б и рис.2в соответственно.

Проведенные исследования позволили выявить общие закономерности поведения основных характеристик ионосферного радиоканала. На рис. 3 представлены усредненные по всем дням наблюдений диапазоны частот прохождения (от ННЧ до МНЧ) мод 2F2, 3F2 и 4F2 в зависи-

мости от времени суток. Пунктирной линией на рисунках показаны расчетные МПЧ на основе данных долгосрочного прогноза. Для моды 2F2 точками отмечены случаи превышения МНЧ верхней границы диапазона частот ЛЧМ зонда. Как можно видеть из рисунков, наибольшая протяженность по частоте $\Delta f = \text{МНЧ} - \text{ННЧ}$ для всех мод наблюдается в период с 10.00 до 16.00 мск и составляет в среднем $\sim 3\text{-}5$ МГц, $5\text{-}7$ МГц и $7\text{-}10$ МГц для мод 4F2, 3F2 и 2F2 соответственно. В вечерние часы $\sim 18.00\text{-}22.00$ мск протяженность по частоте всех мод заметно падает, до $\sim 1\text{-}4$ МГц. Из рисунков видно также, что расчетные значения МПЧ меньше экспериментальных МНЧ в среднем на $\sim 1\text{-}3$ МГц для моды 4F2 и на $\sim 2\text{-}4$ МГц для моды 3F2.

Измерения на базе ЛЧМ ионозонда в условиях модификации ионосферы мощным радиоизлучением проводились в марте 1991г. на трассе Хабаровск-нагревный стенд "Сура" (Нижегородская область)-Темрюк (Краснодарский край). Время работы было выбрано с 22.00 до 06.00 мск, когда на трассе для данного сезона (равноденствие) существовал максимальный отрицательный градиент электронной концентрации, обеспечивающий захват радиоволн в ионосферный волновод. Вывод радиоволн из канала осуществлялся за счет механизма ракурсного рассеяния на искусственных мелкомасштабных неоднородностях, возбуждаемых мощным декаметровым радиоизлучением нагревного стенда "Сура". Прием ЛЧМ сигналов осуществлялся в Темрюке на антенну РГ $_{\frac{65}{4}}^{\text{65}}$ 1 ($\lambda_0 = 19\text{м}$), ориентированную на область возмущения. В приемном пункте во время работы нагревного стенда наблюдались дополнительные моды как на частотах ниже 2F2 МНЧ, так и на частотах выше 2F2 МНЧ прямого сигнала радиолинии Хабаровск-Темрюк. На рис.4 представлены результаты измерений диапазона частот прохождения прямого сигнала моды 2F2 и диапазона частот ракурсной моды (РМ). Точками здесь обозначены МНЧ, крестиками - ННЧ прямого сигнала, а горизонтальными линиями - диапазон частот РМ. Из рисунка видно, что после 24.00 мск (это соответствует значениям отрицательного градиента критической частоты вдоль трассы $f_oF2 < -2 \times 10^{-2}$ МГц/100км) РМ наблюдается, в основном, на частотах, превышающих 2F2 МНЧ прямого сигнала, т.е. имеет волноводное происхождение. Волноводный канал имеет ряд преимуществ, в том числе, более высокую помехозащищенность и скрытность и может быть использован для повышения надежности дальней КВ связи.

3. Используя выражения (1) – (21) и экспериментальные данные, полученные на трассе Хабаровск - "Сура" - Темрюк, проведем оценку

надежности КВ связи для различных участков диапазона частот 2-х лучевого канала, включающего скачковую и волноводную моды, реализуемых в условиях модификации ионосферы мощным радиоизлучением (см. рис.4). Оценку сделаем для двух моментов времени: для 22.50 мск, когда дополнительный канал наблюдается, в основном, на частотах ниже МНЧ прямого сигнала и для 01.15 мск, когда волноводная мода регистрируется на частотах выше $2F_2$ МНЧ. В эксперименте диаграммы направленности передающей и приемной антенн были ориентированы на область возмущения. При этом амплитуда рассеянного сигнала волноводного происхождения практически совпадала с амплитудой прямого сигнала, т.е. потери на рассеяние компенсировались разницей в коэффициентах усиления антенн (прямой сигнал излучался и принимался в боковой лепесток антенн) и разницей в потерях на поглощение скачковой и волноводной мод. Для каждой моды отношение сигнал/помеха $(S/N)_1$, $(S/N)_2$ составляет в среднем по диапазону частот ~ 8 дБ. Согласно измерениям, стандартные отклонения МНЧ и ННЧ обеих мод сигнала близки между собой и составляют значения 7% и 10% (относительно средних значений) соответственно. В расчетах пороговое значение отношения $(S/N)_0$ взято равным 6 дБ. Величина стандартного отклонения сигнала обеих мод принята равной $\sigma_{s,1} = \sigma_{s,2} = 2$ дБ, а стандартного отклонения помех $\sigma_n = 3$ дБ.

Таблица 1

t, мск	22.50		01.15		
мода 1					
< ПНЧ >, МГц	8,7		6,5		
σ_n , МГц	0,87		0,65		
< МНЧ >, МГц	18,6		18,0		
σ_m , МГц	1,3		1,26		
мода 2					
< ННЧ >, МГц	13,3		16,75		
σ_n , МГц	1,33		1,675		
< МНЧ >, МГц	18,0		21,0		
σ_m , МГц	1,26		1,47		
f, МГц	8,9	15,0	8,0	17,5	20,0
R	0,42	0,88	0,70	0,71	0,535

В таблице 1 представлены экспериментальные данные для 2-х луче-

вого канала в условиях модификации ионосферы мощным радиоизлучением и приведены результаты расчета надежности КВ связи, выполненные на основе (1) - (21) для ряда частот ионосферного канала.

Согласно расчетам, обе моды дают заметный вклад в надежность, когда частота выбранного ионосферного канала связи не попадает на края диапазона прохождения КВ сигнала. Из таблицы видно также, что наличие управляемого дополнительного канала на частотах выше МНЧ прямого сигнала обеспечивает приемлемую надежность КВ связи и может быть использовано при решении ряда практических задач дальнего ионосферного распространения радиоволн.

В заключении заметим, что изложенный подход к расчету надежности КВ связи легко обобщается на случай многолучевого 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.

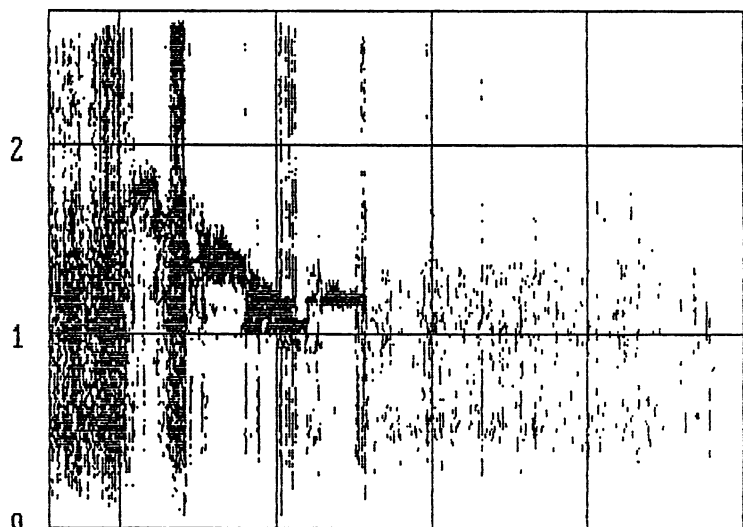
ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.А., Рябова Н.В., Урядов В.П., Шумаев В.В. Тезисы докладов Международной конференции: 100-летие начала использования электромагнитных волн для передачи сообщений и зарождения радиотехники. Москва, 1995г., ч.2, с.32.
2. Lie R.Y., Bradley P.A. IEE Proc. 1985, v.132, pt.F, N2, p.111
3. Вовк В.Я., Ерухимов Л.М., Максименко О.И. и др. Геомагнетизм и аэрономия, 1984, т.24, N 3, с.503

$t, \text{мс}$



a



б

$f, \text{МГц}$

10.0

20.0

30.0

Рис.1 Примеры ионограмм ЛЧМ НЗ ионосферы на трассе Хабаровск-Йошкар-Ола. (а) - 03.09.1997г., 11.51 мск, (б) - 04.09.1997г., 11.51 мск.

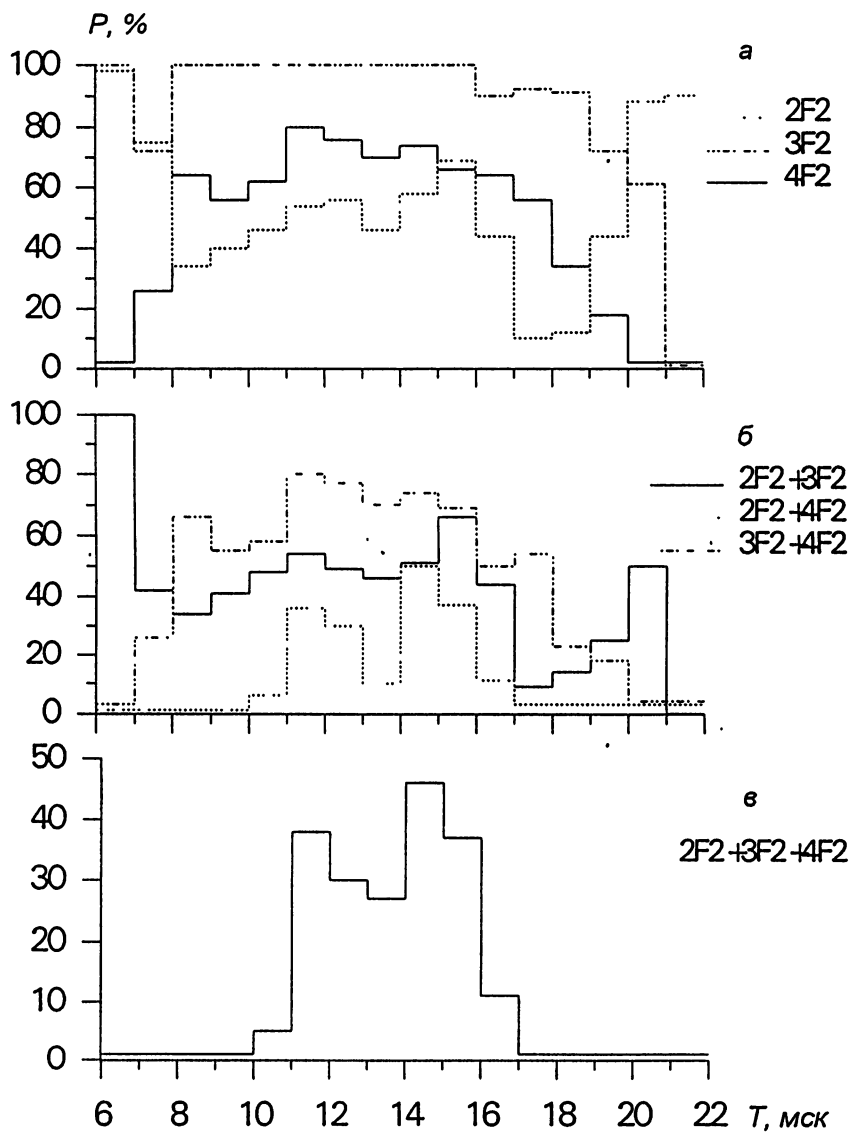


Рис.2 Зависимость вероятности приема отдельных мод (а) и одновременного приема различных мод (б,в) сигнала от времени суток на трассе Хабаровск-Нижний Новгород, март 1988г.

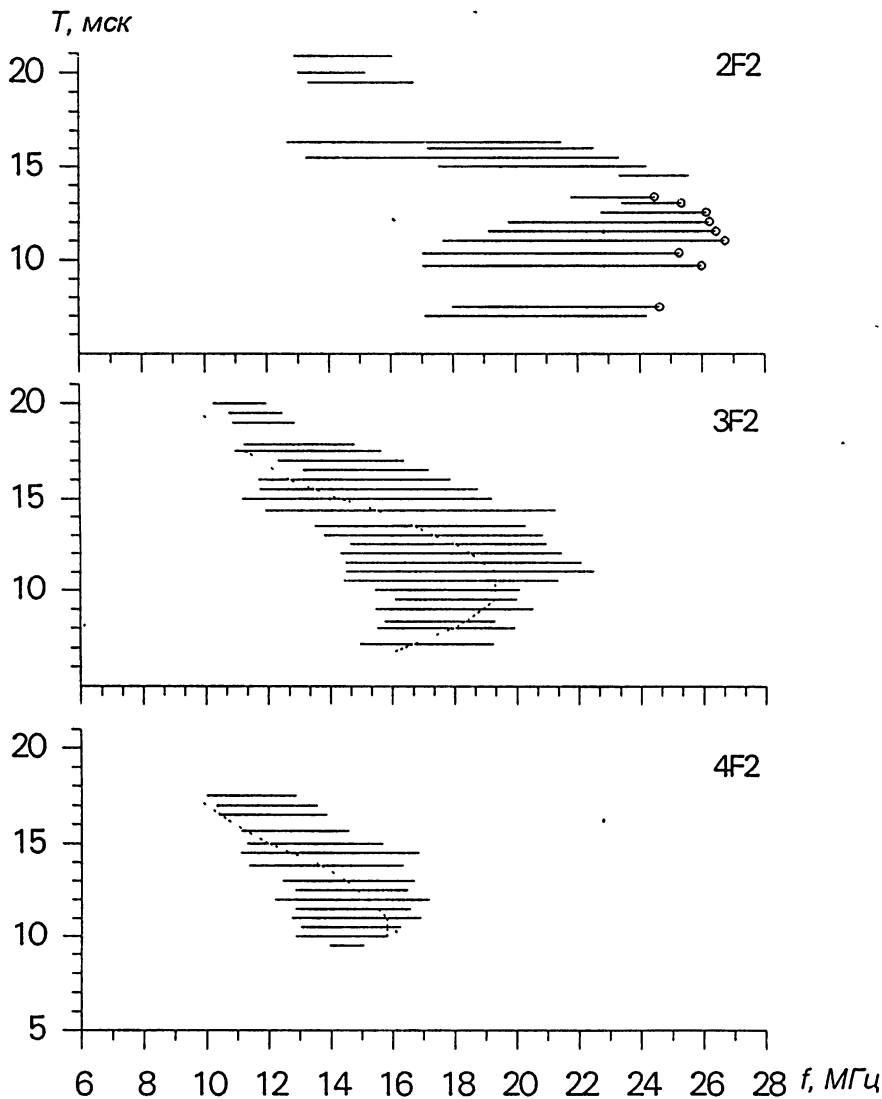


Рис.3 Зависимость диапазона частот прохождения различных мод сигнала от времени суток на трассе Хабаровск-Нижний Новгород; расчетные МПЧ показаны пунктиром.

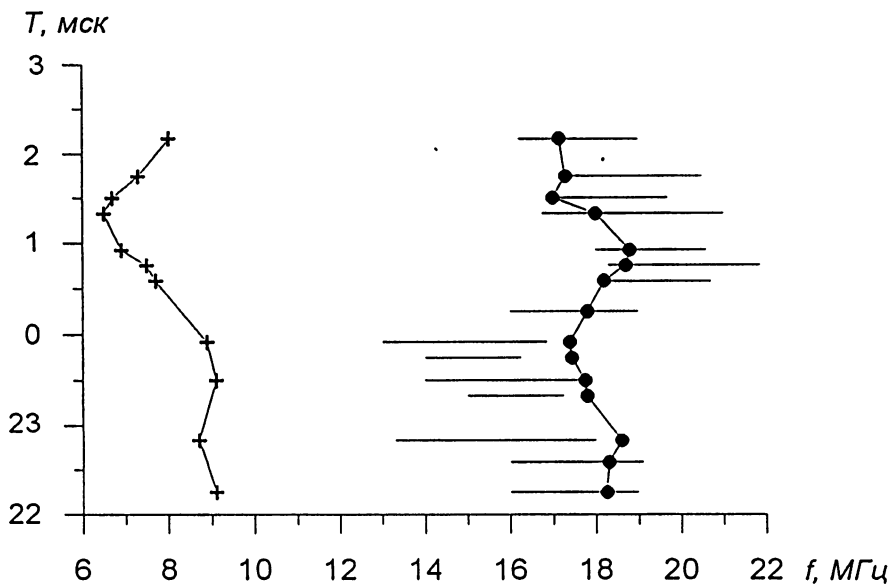


Рис.4 Временные вариации 2F2 ННЧ (крестики) и 2F2 МНЧ (точки) прямого сигнала на трассе Хабаровск-Темрюк и диапазона частот ракурсной моды (горизонтальные линии) на трассе Хабаровск-"Сура"-Темрюк; март 1991г.