



УДК 621.371.25

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИНВАРИАНТЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРИДЦАТИМИНУТНОГО ПРОГНОЗА МАКСИМАЛЬНО ПРИМЕНИМЫХ ЧАСТОТ НА ТРАССАХ КИПР – МОСКВА И ИНСКИП – МОСКВА

Ю.К. Калинин¹, А.Ю. Репин¹, Е.Н. Хотенко¹, А.В. Щелкалин¹¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, г. Москва, Россия

Рассматриваются статистические инварианты погрешностей тридцатиминутного прогноза МПЧ на трассах Кипр – Москва и Инскип – Москва. Сформированы по два суточных массива погрешностей при различных уровнях солнечной активности. Используются различные схемы прогноза: инерционный, линейный и т.д. Получено, что во всех случаях среднеквадратичная относительная погрешность прогноза составляет 7 %, а минимальные значения асимметрии и эксцесса имеют место при линейном прогнозе. Рассмотрены схемы расчета погрешностей прогноза при переходе к меньшим временным интервалам прогнозирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: МАКСИМАЛЬНО ПРИМЕНИМАЯ ЧАСТОТА, ТРИДЦАТИМИНУТНЫЙ ПРОГНОЗ, СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИНВАРИАНТЫ.

DOI: 10.54252/2304-7380_2021_31_52

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование ионосферы в качестве элемента тракта передачи информации на расстояния более нескольких сотен километров для ряда радиотехнических систем декаметрового диапазона сопровождается требованием знания состояния ионосферы в упреждающие моменты времени. В зависимости от особенностей систем время упреждения (прогноза) может быть различным: от года до нескольких минут. В данной работе предполагается рассмотреть схему прогноза на среднеширотных трассах декаметрового диапазона, когда прогнозируемой величиной является максимально применимая частота (МПЧ), и время прогноза заключено в пределах 5 – 60 минут. Следует напомнить, что превышение рабочей частотой f величины МПЧ на 10 – 20 % приводит к попаданию точки наблюдения в так называемую «мёртвую зону». А это в свою очередь приводит к потерям энергии сигнала до 40 дБ [Калинин, 2012].

В исследовании анализируются четыре эмпирических суточных зависимости максимальной применимой частоты (МПЧ) в период весеннего равноденствия в годы с различной солнечной активностью в марте 2004 и марте 2007 годов, полученные на среднеширотных односторонних трассах Москва – Инскип (Англия) и Москва – Кипр. Координаты пунктов передачи Инскип – 53,93 с.ш., 2,85°з.д.; Кипр – 35°с.ш., 34°в.д., Москва (ИЗМИРАН) – 55,483°с.ш., 37,333°в.д. Использовались ЛЧМ – сигналы. Измерения проводились раз в 30 минут. Антенны на приёмном и передающем концах имели изотропную диаграмму направленности. В качестве данных солнечной активности взяты данные из прогноза числа Вольфа – 48 для марта 2004 и 11 для марта 2007 [Крашенинников, 2011].

2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИНВАРИАНТЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРИДЦАТИМИНУТНЫХ ПРОГНОЗОВ МПЧ

Пример записи результатов измерений для трансмеридиональной трассы приведен на рис. 1. Здесь же приведены данные изменчивости МПЧ долгосрочного прогноза при использовании моделей ионосферы СИМП и IRI.

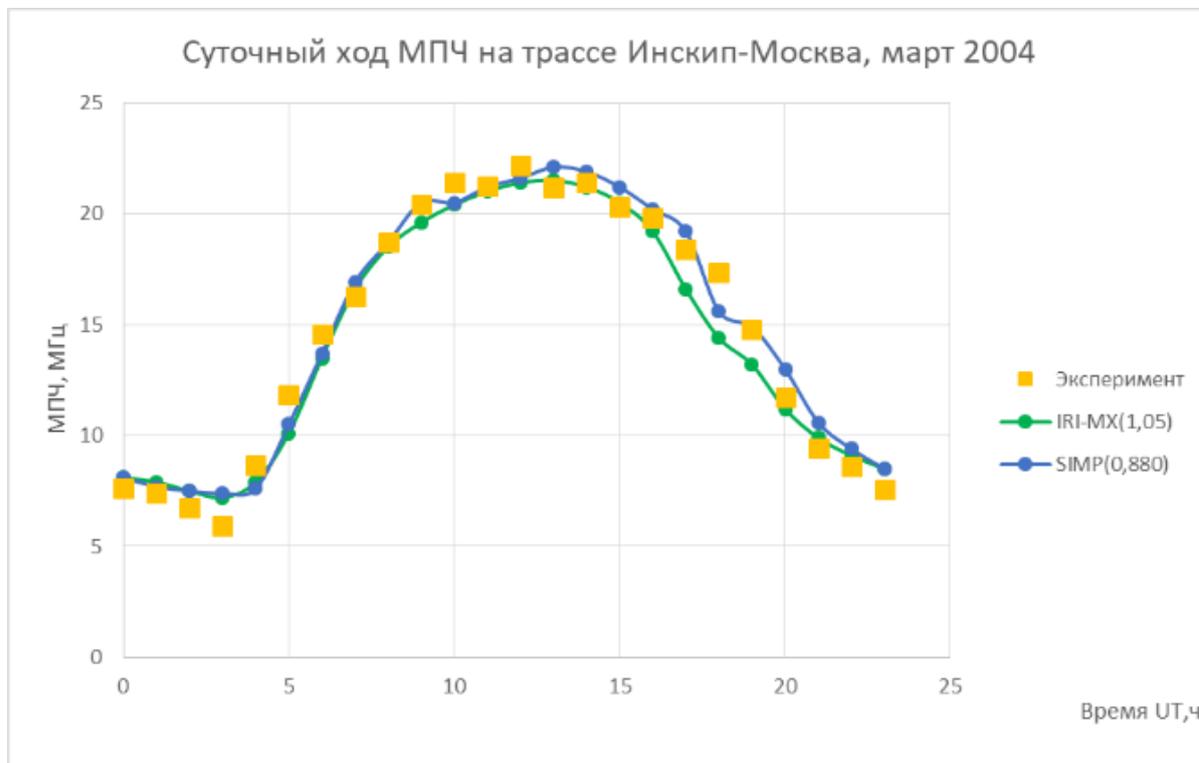


Рис. 1. Суточный ход МПЧ на трассе Инскип – Москва, март 2004 г.

В задачи проводимого рассмотрения входит получение данных о погрешностях разного рода прогностических схем МПЧ на 30 минут вперед. Для различных видов прогноза с номерами $i = 1, 2, 3, 4$ принимается, что:

$$\text{МПЧ}_{\text{прогн}}(t + 30\text{мин}) = \text{МПЧ}(t) + \Delta_i.$$

Первым видом прогноза рассматривался инерциальный. Для него $\Delta_1 = 0$. Линейный прогноз предполагает, что $\Delta_2 = \text{МПЧ}(t) - \text{МПЧ}(t - 30)$. Для $i = 3$ и 4 разности Δ_i строятся по результатам расчёта МПЧ с использованием модели СИМП и (в отдельных случаях) с использованием среднемесячной экспериментальной кривой $\text{МПЧ}_{\text{ср.мес}}$. Во всех случаях были образованы относительные погрешности прогноза $\delta\text{МПЧ}$ в соответствии с формулой:

$$\delta_j\text{МПЧ} = 2 (\text{МПЧ}_{\text{эксн}} - \text{МПЧ}_{\text{прогн}}) / (\text{МПЧ}_{\text{эксн}} + \text{МПЧ}_{\text{прогн}}).$$

Здесь $\delta_j\text{МПЧ}$ относительные разности между прогнозными и экспериментально наблюдаемыми значениями МПЧ на такте с номером j . Для суточных множеств $\{\delta_j\text{МПЧ}\}$ были рассчитаны значения четырёх статистических инвариантов – среднее, дисперсия D , асимметрия A и эксцесс E [Абрамовиц и др., 1979]. Ниже в таблицах 1 – 4 помещены расчётные значения $\sigma = D^{1/2}$, A и E для различных суток и различных трасс.

Таблица 1. Статистические инварианты погрешностей МПЧ инерциального прогноза

Характеристики трассы	σ	A	E
Кипр, 2004	0,067	0,24	0,3
Кипр, 2007	0,063	1,35	4,48
Инскип, 2004	0,073	- 0,11	0,22
Инскип, 2007	0,08	1,72	3,95
Итого по общей выборке	0,071		

Обращает а себя внимаание тот факт, что именно σ подвержена наименьшей изменчивости для различных трасс и различных суточных интервалов. В то время как третий и четвёртый статистические инварианты подвержены существенной изменчивости, выходящей за уровни значимости (0,35 для асимметрии A и 0,7 для эксцесса E).

В таблице 2 приведены значения σ , A , E при использовании схемы линейного прогноза.

Таблица 2. Статистические инварианты погрешностей МПЧ линейного прогноза

Характеристики трассы	σ	A	E
Кипр, 2004	0,067	0,016	1,05
Кипр, 2007	0,063	0,11	0,81
Инскип, 2004	0,076	0,06	-0,54
Инскип, 2007	0,095	-0,73	1,53
Итого по общей выборке	0,076		

Таблица 3. Статистические инварианты погрешностей прогноза с использованием модели СИМП

Характеристики трассы	σ	A	E
Кипр, 2004	0,057	0,25	0,24
Кипр, 2007	0,065	-0,029	1,62
Инскип, 2004	0,071	0,024	-0,36
Инскип, 2007	0,077	0,98	2,17
Итого по общей выборке	0,068		

Отметим, что по признаку σ попытки получить прогноз более высокого качества, чем инерционный, в случаях $i = 2, 3$ оказались безуспешными. Среднее значение σ по трём первым таблицам приблизительно равно 7 % [Калинин и др., 2015].

Проведено также исследование четвёртого вида прогноза с использованием среднемесячных данных. Имеющиеся экспериментальные усреднённые за месяц суточные зависимости позволили провести анализ прогноза только на 1 час вперёд, причём использовались усреднённые данные за исследуемый месяц. При этом $\Delta_4 = \overline{\text{МПЧ}}(t) - \overline{\text{МПЧ}}(t - 60)$, где $\overline{\text{МПЧ}}(t)$ – усредненная за месяц зависимость МПЧ. Результаты расчётов даны в таблице. 4. Среднее значение σ в этом случае оказалось равным 10 %.

Таблица 4. Статистические инварианты погрешностей прогноза с использованием среднемесячных данных о ходе МПЧ на различных трассах

Характеристики трассы	σ	A	E
Кипр, 2004	0,09	0,91	2,90
Инскип, 2004	0,11	0,57	1,48
Итого по общей выборке	0,10		

3. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ

При проведении аналогичных расчётов для часового прогноза среднее значений σ по трём первым видам прогноза составляет примерно 14 %. Сопоставляя эту величину со средним значением σ по трём приведенным выше таблицам, можно отметить, что уменьшение упреждающего времени прогноза вдвое примерно во столько же раз уменьшало среднеквадратичный разброс погрешностей краткосрочного прогноза МПЧ. Важно также отметить, что отнесение размеров радиуса крупномасштабной ионосферной неоднородности порядка 500 км к временному интервалу 30 мин, то есть 0,5 часа, приведёт к оценке кажущейся скорости объекта $v_k \approx 1$ тыс. км/час. По порядку величины это совпадает с данными о скорости движения сейсмогенных и антропогенных макромасштабных неоднородностей в среднеширотной ионосферной области $F2$ [Калинин, 2012]. Такая же оценка, относящаяся к обычным природным неоднородностям, получена в более ранней работе [Сергеенко, 1973]. В этих совпадениях можно увидеть подтверждение представлений о влиянии на тридцатиминутный прогноз ионосферных неоднородностей, соизмеримых по размерам с протяжённостью ионосферной области, существенной для распространения радиоволн.

Содержащиеся в приведенных выше таблицах данные о величине СКО МПЧ можно свести к двум цифрам. Так для времени прогноза $T_{пр} = 60$ мин величина $\sigma = 14\%$, а для $T_{пр} = 30$ мин величина $\sigma = 7\%$. Этот результат отражён на схеме, представленной на рис. 2 [Акимов и др., 2017]. На этой схеме по оси абсцисс отложена величина $T_{пр}$ по убывающей шкале в минутах от 60 мин до нуля. По оси ординат отложена величина σ , равная среднеквадратичному отклонению относительной погрешности инерционного прогноза МПЧ – $F2$.

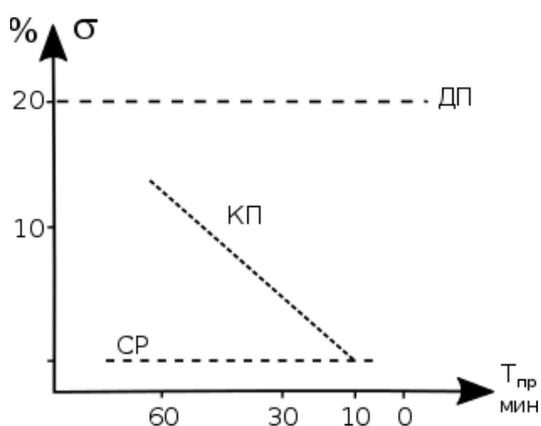


Рис. 2. Схема зависимости среднеквадратичного отклонения относительной погрешности σ инерционного прогноза МПЧ – $F2$ от времени прогнозирования $T_{пр}$

– линейная связь между МПЧ и D' – групповым путём радиосигнала на скачковой траектории [http://rp.iszf.irk.ru/esceir/lchm/vozmlchm.htm], см. рис. 3, позволяют утверждать, что такой же будет относительная погрешность определения D' .

Далее необходим пересчёт величины D' в величину дальности по земле D . Однако при наличии функционирующей линии НЗ такой пересчет не требуется, поскольку координаты передатчика при НЗ, как правило, известны. А так как для трасс протяжённостью 1,5 – 3 тыс. км справедливо соотношение $D'/D \approx (1,04 - 1,1)$ [Чернов, 1971], оценку погрешности D' можно принять в качестве оценки сверху погрешности D . Тем самым определено важнейшее свойство тактового прогноза – равенство относительных погрешностей определения МПЧ и длины трассы D :

$$\frac{\delta \text{МПЧ}}{\text{МПЧ}} = \frac{\delta D}{D}.$$

На этой плоскости нанесены две горизонтальные пунктирные прямые. Верхняя прямая со значком ДП соответствует погрешности долгосрочного прогноза МПЧ – $F2$ безотносительно к нижней шкале. Нижняя прямая со значком СР (собственный разброс) соответствует среднеквадратичному отклонению МПЧ(t) для дискретных значений времени t от собственного скользящего трёхчасового среднего. Наклонная пунктирная прямая проведена через точки (60 мин; 14 %) и (30 мин; 7 %). Экстраполяция этой прямой до минимальной длительности такта определения МПЧ с использованием ЛЧМ сигналов, который можно оценить примерно равным 5 мин, приведёт к допустимой погрешности определения порядка одного процента. Данные о свойствах ДЧХ сигналов ВНЗ

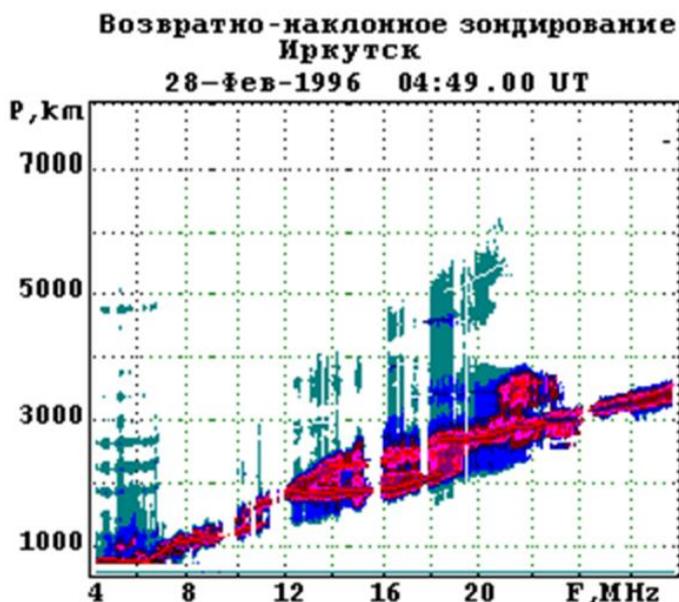


Рис. 3. ИONOграмма возвратно-наклонного зондирования

И если допустимая погрешность определения длины трассы равна 1 %, то это означает, что такой же величине должна быть равна допустимая погрешность тактового прогноза МПЧ. Данные рис. 2 позволяют утверждать, что длительность такта не должна превышать пяти минут. Следует отметить, что эта величина также допускает геофизическую интерпретацию. Напомним, что в [Калинин, 2012] размеры неоднородностей, обуславливающие размытие фокусировок оценены, как величина $1 \sim 2 \cdot 10^4$ м. Это значение, отнесённое к скорости горизонтального дрейфа ионосферы $V_d = 100$ м/с, даст характерную оценку времени изменения случайной компоненты МПЧ, равное 200 с., что по порядку совпадает с временем пятиминутного такта.

Следует также отметить, что важная в приложениях характеристика – вероятность больших отклонений, например, в 3σ существенно возрастает при отклонении закона распределения от закона Гаусса. Такие отклонения можно характеризовать величиной эксцесса E . Так для нормального закона ($E = 0$) вероятность отклонения, превышающего 3σ , характеризуется величиной порядка 10^{-4} . А, например, для экспоненциального распределения $W_E = (2\sigma)^{-1} \cdot \exp(-|x|/\sigma)$, для которого $E = 3$, соответствующая величина имеет порядок 10^{-3} . Это может быть существенно для некоторых систем, что заставляет отдавать предпочтение линейной схеме прогноза.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение статистических инвариантов четырёх суточных массивов погрешностей тридцатиминутного прогноза МПЧ на трассах Кипр-Москва и Инскип – Москва позволило установить ряд неочевидных результатов. Прежде всего, для всех вариантов прогнозных схем (инерционная, линейная и т.д.) относительная среднеквадратичная погрешность оказалась одинаковой, равной 7 %. Третий и четвёртый статистические инварианты, асимметрия и эксцесс минимальны для схемы линейного прогноза. Рассмотрена также схема экстраполяции к меньшим временным интервалам прогноза.

ЛИТЕРАТУРА

- *Абрамовиц М., Стеган И.* Справочник по специальным функциям. – М.: Наука, 1979. 832 с.
- *Акимов В.Ф., Калинин Ю.К.* Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов. – М.: Техносфера. 2017. 493 с.
- *Калинин Ю.К.* Вопросы ионосферной геофизики и радиофизики. - Обнинск: ВНИИГМИ – МЦД. 2012. С. 260.
- *Калинин Ю.К., Котонаева Н.Г., Перминова Е.С., Михайлов В.В.* Тридцатиминутный прогноз максимально применимой частоты на односкачковых трассах. Международная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн», ИРЭМВ – 2015, Дивногорск, 28 июня – 3 июля, 2015.
- *Крашенинников И.В.* Прогнозирование ионосферного распространения радиоволн на основе решения прямой и обратной задач многочастотного наклонного радиозондирования ионосферы. – М.: Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. ИЗМИРАН. 2011.
- *Сергеенко Н.П.* О перемещающихся крупномасштабных неоднородностях в ионосфере // Геомагнетизм и аэрномия. 1973. т.13. №3. с.186.

- Черно́в Ю.А. Возвратно-наклонное зондирование ионосферы. – М.: Связь, 1971. 204 с.
- Центр коллективного пользования Восточно-Сибирского центра исследования ионосферы Земли: [Электронный ресурс] // Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук. Иркутск. 2001-2002. URL:<http://rp.iszf.irk.ru/esceir/pres/lchm/vozmlchm.htm>. (Дата обращения: 01.04.2018).

STATISTICAL INVARIANTS OF ERRORS OF THE THIRTY-MINUTE FORECAST OF THE MAXIMUM APPLICABLE FREQUENCIES ON THE RADIO TRACKS CYPRUS – MOSCOW AND INSKIP – MOSCOW

Kalinin Yu. K., Repin A. Yu., Khotenko E. N., Shchelkalin A.V.

Statistical invariants of errors of the thirty-minute forecast of the maximum applicable frequencies on the radio tracks Cyprus – Moscow and Inskip – Moscow (routes) are considered. Two daily arrays of errors were formed at different levels of solar activity. Various forecasting schemes are used: inertial, linear, etc. It is found that in all cases, the root-mean-square relative error of the forecast is 7%, and the minimum values of asymmetry and kurtosis take place with a linear forecast. The schemes of calculation of forecast errors during the transition to a smaller time interval of forecasting are considered.

KEYWORDS: MAXIMUM APPLICABLE FREQUENCIES, THIRTY-MINUTE FORECAST, STATISTICAL INVARIANTS.