

## ПРОСТРАНСТВЕННО-МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ПРИЕМ ПРИ ИОНОСФЕРНОМ GPS-МОНИТОРИНГЕ ЗАПУСКОВ РАКЕТ

Предложен способ определения характеристик ионосферных возмущений (ИВ) акустической природы, основанный на пространственно-временной обработке рядов полного электронного содержания (ПЭС), восстановленных по двухчастотным GPS-измерениям, выполненным в заданном регионе по различным лучам «приемник — ИСЗ GPS». Способ позволяет определить фазовую скорость, угол места и азимут прихода ионосферного возмущения. Оценка эффективности способа проведена при определении характеристик ионосферного возмущения, вызванного запуском ракеты-носителя «Протон» 5 июля 1999 года. Исследована работа предложенного алгоритма при различных значениях отношения сигнал/шум в исходных рядах ПЭС.

### 1. Введение

Ионосфера является уникальным чувствительным детектором различных процессов естественного и антропогенного характера, протекающих на поверхности Земли и в ее атмосфере. К таким воздействиям относятся землетрясения, запуски ракет, промышленные взрывы, испытания ядерного оружия и др. Механизмы модификации атмосферы этими процессами достаточно сложны и многообразны, но во многих случаях значительная доля энергии исходного атмосферного возмущения оказывается сосредоточенной в ударной акустической волне (УАВ) [1-2]. Активно воздействуя на пространственно-временное распределение электронной концентрации ионосферы, УАВ проявляется в фазовых задержках, приобретаемых трансйоносферными навигационными сигналами GPS при их распространении от искусственного спутника Земли (ИСЗ) до приемника. В работах [3-8] подробно описана методика восстановления ПЭС ионосферы вдоль луча «приемник — ИСЗ GPS» по фазовым и групповым измерениям псевдодальности, выполненным на двух когерентно связанных частотах. В [7-8] был разработан метод определения основных параметров ионосферного отклика ударной волны (амплитуда, форма, период, фазовая и групповая скорость перемещения волнового пакета, угловые характеристики волнового вектора), основанный на анализе рядов ПЭС для трех лучей «приемник — ИСЗ GPS». Модификация этого метода [9-11] позволила использовать потенциал всей сети приемных станций в районе источника ИВ, а координаты источника определить с учетом сферичности фронта волны возмущения. Однако эти методы предпо-

лагают, что амплитуда ионосферных откликов УАВ значительно превышает фоновые шумовые колебания ПЭС. На практике такая ситуация складывается довольно редко, чаще шумовые колебания маскируют «полезный сигнал» ионосферного отклика УАВ. В настоящей работе предложен алгоритм оптимального пространственно-многоканального приема и оптимальной оценки характеристик акустического ИВ для случая, когда амплитуда ионосферного отклика УАВ соизмерима с амплитудой фоновых шумовых колебаний.

Рассмотрим общий случай, когда измерения производятся в интервале времени от  $t_1$  до  $t_2$  в заданном регионе по  $N$  лучам, образованным навигационными ИСЗ GPS и двухчастотными многоканальными приемниками GPS. Фазовые и групповые измерения этих приемников в виде стандартных RINEX-файлов поставляются в Интернет. С помощью разработанной в ИСЗФ СО РАН программы CONVTEC эти измерения преобразуются в ряды значений ПЭС  $I_i(t)$  вдоль каждого луча «приемник — ИСЗ GPS» и ряды азимута  $\alpha_{s,i}(t)$  и угла места  $\theta_{s,i}(t)$  этих лучей. На основании этих рядов необходимо дать оптимальные оценки пространственно-временных характеристик акустического ИВ.

### 2. Пространственно-многоканальный прием

#### 2.1. Приемная решетка

Полученное в соответствии с методикой [3-8] значение ПЭС носит интегральный характер вдоль всего луча «приемник — ИСЗ GPS», что вносит неопределенность при локализации в пространстве ионосферного отклика УАВ. Для устранения этой неопределенности считается, что значение ПЭС формируется в подйоносферной точке (ПТ) — точке пересечения луча «приемник — ИСЗ GPS» с плоскостью на высоте максимума ионизации F-области ионосферы (поскольку эта область вносит основной вклад в формирование ПЭС). Зададимся географическими координатами начала топоцентрической системы координат и преобразуем ряды азимута и угла места лучей «приемник — ИСЗ GPS» в ряды  $x_i(t)$  и  $y_i(t)$  топоцентрических координат соответствующих ПТ. Тогда, для  $N$  лучей имеем приемную решетку, состоящую из  $N$  элементов — ПТ. Полученная решетка является неэквиливантной (поскольку приемники GPS размещены без какого либо геометрического порядка, то и ПТ неупорядочены), динамической (в каждый момент времени положение спутников изменяется, что приводит к изменению координат ПТ), а элементы решетки характеризуются пространственно-избирательными свойствами, обусловленными «ракурсным эффектом» [7-8] (амплитуда ионосферного отклика УАВ в рядах  $I_i(t)$  максимальна в случае, когда луч «приемник — ИСЗ GPS» параллелен фронту волны ИВ). Эти осо-

бенности накладывают отпечаток на синтез алгоритма пространственно-многоканального приема.

## 2.2. Алгоритм пространственно-временной обработки

Ряды ПЭС  $I_i(t)$  являются реализациями случайного процесса и представляют собой аддитивную смесь следующих компонент:

$$I_i(t) = I_{T,i}(t) + \Delta I_{saw,i}(t, \alpha, \theta, V, \tau) + \Delta I_{n,i}(t),$$

где  $I_{T,i}(t)$  — низкочастотные вариации ПЭС (тренд), обусловленные регулярными (суточными и сезонными) изменениями электронной концентрации, а также крупномасштабными неоднородностями ионосферы;  $\Delta I_{saw,i}(t, \alpha, \theta, V, \tau)$  — вариации ПЭС, обусловленные акустическим возмущением электронной концентрации;  $\alpha$  — азимут,  $\theta$  — угол места волнового вектора УАВ;  $V$  — горизонтальная скорость УАВ;  $\tau$  — задержка ионосферного отклика УАВ в рядах  $I_i(t)$ ;  $\Delta I_{n,i}(t)$  — шумовые высокочастотные колебания ПЭС, обусловленные различного рода мелкомасштабными флуктуациями электронной концентрации. Можно считать, что мелкомасштабные флуктуации электронной концентрации распределены по Гауссову закону с нулевым математическим ожиданием [12], следовательно величина  $\Delta I_{n,i}(t)$  также имеет нормальное распределение. Поскольку период акустического ИВ априорно известен и не превышает 5 мин [3-8, 11], то для их выделения ряды  $I_i(t)$  подвергаются процедуре удаления линейного тренда с временным окном 5 мин, в результате чего получаем ряды  $\Delta I_i(t) = \Delta I_{saw,i}(t, \alpha, \theta, V, \tau) + \Delta I_{n,i}(t)$ , с которыми в дальнейшем будем проводить все операции. При этом  $\Delta I_{n,i}(t)$  становится центрированной Гауссовой случайной величиной. Для оценки неэнергетических неизвестных параметров «полезного сигнала», принимаемого на фоне нормального шума, достаточно проанализировать взаимокорреляционный интеграл входной реализации сигнала и шума и копии сигнала. Для пространственно-многоканального приема ионосферного отклика УАВ этот алгоритм сводится к отысканию корреляционного интеграла  $q$  от когерентной суммы всех рядов  $\Delta I_i(t)$  [11]:

$$q(\alpha, \theta, V, \tau) = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^N [\Delta I_i(t) F_i(\alpha, \theta, \alpha_s, \theta_s) B_i(t, \alpha, V, x, y)] R_0(t, \tau) dt,$$

где  $R_0(t, \tau)$  — опорный сигнал для центрального элемента приемной решетки;  $F_i(\alpha, \theta, \alpha_s, \theta_s) = \sin^2(\theta - (90^\circ - \theta_{s,i}) \cos(\alpha_{s,i} - \alpha))$  — амплитудный весовой множитель, обусловленный пространственно-избирательными свойствами элементов приемной решетки (диаграмма направленности элемента решетки представляет собой фигуру, полученную путем вращения графика  $\sin^2$ , выполненного в полярных координатах, вокруг луча «приемник — ИСЗ GPS»);  $B_i(t, \alpha, \theta, V, \tau)$  — весовой множитель фазировки, определяемый взаимным расположением  $i$ -го и центрального элемента приемной решетки, скоростью и направлением прихода ИВ. Весовой множитель фазировки определяется следующим выражением:

$$B_i(t) = \exp\left[\frac{-j2\pi(t_i - t_0)}{T}\right],$$

где  $t_0$  — временной отсчет ряда  $\Delta I_0(t)$  центрального элемента приемной решетки;  $t_i$  — временной отсчет  $i$ -го ряда  $\Delta I_i(t)$ ;  $T$  — период ИВ. Временной отсчет  $t_i$ , который необходимо просуммировать с отсчетом  $t_0$  опорного ряда  $\Delta I_0(t)$ , ищется из всего количества отсчетов ряда  $\Delta I_i(t)$  исходя из минимизации выражения:

$$V(t_i - t_0) - [(x_i - x_0) \cos \alpha + (y_i - y_0) \sin \alpha] = \min,$$

где  $(x_0, y_0)$  — координаты центрального элемента приемной решетки в момент времени  $t_0$ , а  $(x_i, y_i)$  — координаты  $i$ -ой ПТ в момент времени  $t_i$ . Поскольку приемная решетка является динамической, то весовой множитель фазировки необходимо вычислять для каждого отсчета рядов  $\Delta I_i(t)$ . Вычисленный корреляционный интеграл  $q(\alpha, \theta, V, \tau)$  суммарного сигнала и опорного сигнала центрального элемента  $R_0(t, \tau)$  подается на решающее устройство, которое формирует оптимальные оценки параметров  $\alpha$ ,  $\theta$ ,  $V$  и  $\tau$ .

## 2.3. Оценка характеристик ионосферного возмущения

Параметры  $\alpha$ ,  $\theta$ ,  $V$ ,  $\tau$  — неэнергетические и априорно равномерно распределены в пределах следующих интервалов:  $\alpha = 0^\circ \dots 360^\circ$ ,  $\theta = -90^\circ \dots 90^\circ$ ,  $V = 600 \dots 2000$  м/с,  $\tau = 0 \dots (t_2 - t_1)$ . Для получения оптимальной оценки этих параметров воспользуемся критерием максимума правдоподобия и будем считать, что максимальной правдоподобной оценкой этих параметров являются такие значения  $\hat{\alpha}$ ,  $\hat{\theta}$ ,  $\hat{V}$ ,  $\hat{\tau}$ , которые доставляют максимум функции  $q(\alpha, \theta, V, \tau)$ . Практически оценки находятся путем вычисле-

ния корреляционного интеграла для всех возможных сочетаний этих параметров. Значения параметров, при которых максимум корреляционного интеграла примет максимальное значение, считаются искомыми характеристиками ИВ. Такой алгоритм эквивалентен сканированию результирующей диаграммы направленности приемной решетки в заданных секторах обзора по азимуту и углу места и работе корреляционного приемника по параметрам  $V$  и  $\tau$ .

### 3. Общая характеристика и результаты эксперимента

Оценка эффективности предложенного алгоритма проведена на примере определения характеристик ионосферного возмущения, вызванного запуском ракеты-носителя (РН) «Протон» 5 июля (186 день) 1999 года. На рис.1 в географических координатах  $\Phi$  (широта) и  $\Lambda$  (долгота) показана

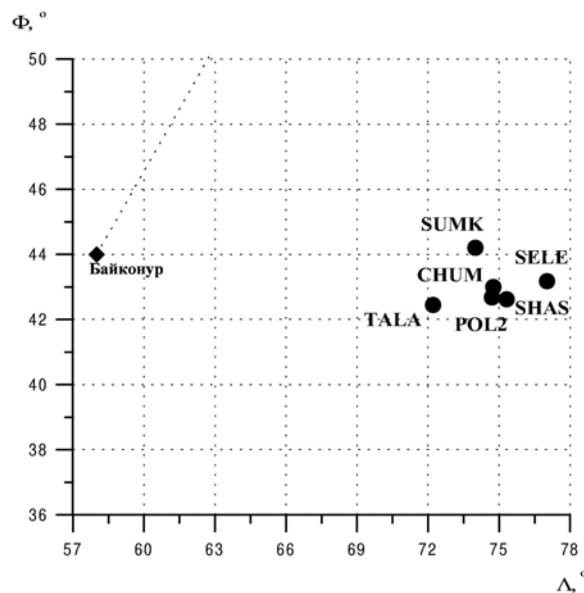


Рис. 1

геометрия эксперимента при этом запуске. Штриховая линия приблизительно соответствует горизонтальной проекции траектории полета ракеты с наклоном орбиты  $\Psi = 51,6^\circ$  (<http://www.ilslaunch.com>). Ромбом отмечено положение стартовой площадки. Положение и названия приемников GPS отмечены жирными точками и крупным шрифтом. В этом эксперименте измерения ПЭС проводились по  $N = 34$  лучам, образованным приемниками GPS и ИСЗ GPS с номерами PRN01, PRN14, PRN15, PRN25 и PRN29. Графики, поясняющие алгоритм пространственно-временной обработки полученных рядов ПЭС, приведены на рис. 2. Ряды  $\Delta I_i(t)$  для лучей «приемник — ИСЗ GPS» POL2 PRN14 и SELE PRN14 показаны на рис. 2а - 2б. График суммарного сигнала  $\Delta I_\Sigma(t)$ , полученного в ре-

зультате синфазного суммирования всех  $N$  рядов  $\Delta I_i(t)$  к ряду  $\Delta I_0(t)$  центрального элемента приемной решетки, а также опорный сигнал  $R_0(t, \tau)$  центрального элемента этой решетки, приведены соответственно на рис. 2в и 2г. Максимальное значение максимума корреляционного интеграла  $q(\alpha, \theta, V, \tau)$  в этом эксперименте достигнуто при следующих оценочных значениях параметров  $\hat{V} = 1600$  м/с,  $\hat{\alpha} = 160^\circ$ ,  $\hat{\theta} = 50^\circ$ ,  $t_1 + \hat{\tau} = 13.625$  ч UT. График ряда  $q(t)$  для этих значений параметров показан на рис. 2д. Значения  $\Delta I_i(t)$ ,  $\Delta I_\Sigma(t)$  измеряются в единицах TECU (TECU - общепринятая единица измерения ПЭС, равная  $10^{16}$  м<sup>-2</sup>), а значение  $q(t)$  и  $R_0(t, \tau)$  в относительных единицах. Величина радиальной скорости ИВ определяется как  $V_i = V \cos \theta$  [13] и составила для рассмотренного запуска 900 м/с, что соответствует скорости звука на высоте  $F$ -области ионосферы [13]. Полученное оценочное значение азимута  $\hat{\alpha} = 160^\circ$  распространения ИВ примерно соответствует азимуту нормали к горизонтальной проекции траектории полета РН  $\alpha = 147^\circ$ . Результаты проведенного эксперимента адекватны существующему представлению о механизме генерации ИВ при запуске ракеты [1-2], в соответствии с которым источником ИВ являет-

зультате синфазного суммирования всех  $N$  рядов  $\Delta I_i(t)$  к ряду  $\Delta I_0(t)$  центрального элемента приемной решетки, а также опорный сигнал  $R_0(t, \tau)$  центрального элемента этой решетки, приведены соответственно на рис. 2в и 2г. Максимальное значение максимума корреляционного интеграла  $q(\alpha, \theta, V, \tau)$  в этом эксперименте достигнуто при следующих оценочных значениях параметров  $\hat{V} = 1600$  м/с,  $\hat{\alpha} = 160^\circ$ ,  $\hat{\theta} = 50^\circ$ ,  $t_1 + \hat{\tau} = 13.625$  ч UT. График ряда  $q(t)$  для этих значений параметров показан на рис. 2д. Значения  $\Delta I_i(t)$ ,  $\Delta I_\Sigma(t)$  измеряются в единицах TECU (TECU - общепринятая единица измерения ПЭС, равная  $10^{16}$  м<sup>-2</sup>), а значение  $q(t)$  и  $R_0(t, \tau)$  в относительных единицах. Величина радиальной скорости ИВ определяется как  $V_i = V \cos \theta$  [13] и составила для рассмотренного запуска 900 м/с, что соответствует скорости звука на высоте  $F$ -области ионосферы [13]. Полученное оценочное значение азимута  $\hat{\alpha} = 160^\circ$  распространения ИВ примерно соответствует азимуту нормали к горизонтальной проекции траектории полета РН  $\alpha = 147^\circ$ . Результаты проведенного эксперимента адекватны существующему представлению о механизме генерации ИВ при запуске ракеты [1-2], в соответствии с которым источником ИВ являет-

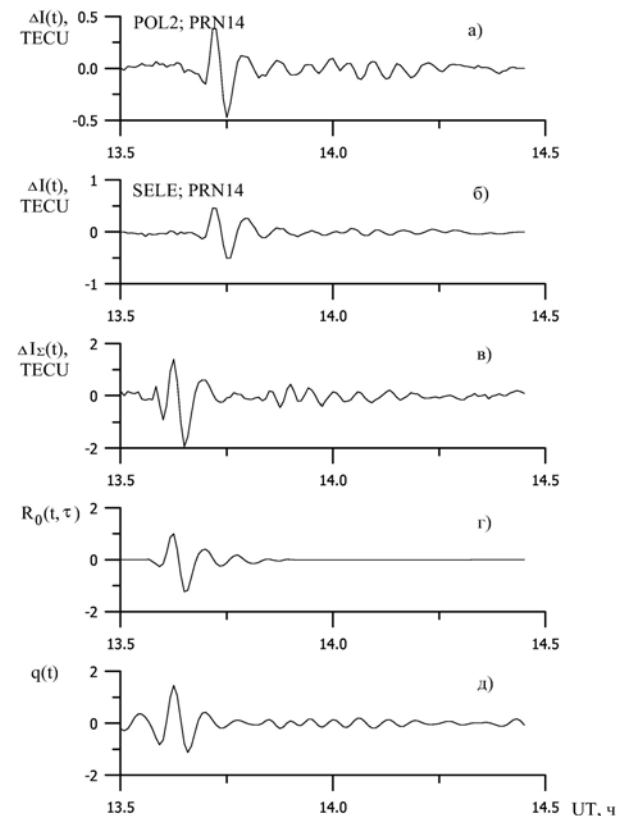


Рис. 2

зультате синфазного суммирования всех  $N$  рядов  $\Delta I_i(t)$  к ряду  $\Delta I_0(t)$  центрального элемента приемной решетки, а также опорный сигнал  $R_0(t, \tau)$  центрального элемента этой решетки, приведены соответственно на рис. 2в и 2г. Максимальное значение максимума корреляционного интеграла  $q(\alpha, \theta, V, \tau)$  в этом эксперименте достигнуто при следующих оценочных значениях параметров  $\hat{V} = 1600$  м/с,  $\hat{\alpha} = 160^\circ$ ,  $\hat{\theta} = 50^\circ$ ,  $t_1 + \hat{\tau} = 13.625$  ч UT. График ряда  $q(t)$  для этих значений параметров показан на рис. 2д. Значения  $\Delta I_i(t)$ ,  $\Delta I_\Sigma(t)$  измеряются в единицах TECU (TECU - общепринятая единица измерения ПЭС, равная  $10^{16}$  м<sup>-2</sup>), а значение  $q(t)$  и  $R_0(t, \tau)$  в относительных единицах. Величина радиальной скорости ИВ определяется как  $V_i = V \cos \theta$  [13] и составила для рассмотренного запуска 900 м/с, что соответствует скорости звука на высоте  $F$ -области ионосферы [13]. Полученное оценочное значение азимута  $\hat{\alpha} = 160^\circ$  распространения ИВ примерно соответствует азимуту нормали к горизонтальной проекции траектории полета РН  $\alpha = 147^\circ$ . Результаты проведенного эксперимента адекватны существующему представлению о механизме генерации ИВ при запуске ракеты [1-2], в соответствии с которым источником ИВ являет-

ся УАВ, представляющая собой конус Маха, ось которого совпадает с горизонтальным разгонным участком полета ракеты на высоте 100 км и более.

Проведенный эксперимент доказывает эффективность разработанного алгоритма определения параметров ИВ, но не показывает его преимущества перед ранее предложенными методами. В этом эксперименте максимальное отношение сигнал/шум во входных рядах  $\Delta I_i(t)$  составляет  $Q_{\max} = 21$ , поэтому найденные оценки параметров хорошо согласуются с результатами определения характеристик рассмотренного ИВ ( $V = 1882$  м/с,  $\alpha = 157^\circ$ ,  $\theta = 57^\circ$ ) методом разнесенного приема, работающим при больших отношениях сигнал/шум [7-8]. В связи с этим интересным представляется исследование динамики статистических характеристик оценок параметров ИВ, полученных предложенным методом, при более высокой интенсивности фоновых шумовых колебаний  $\Delta I_{n,i}(t)$  во входных рядах ПЭС. Ухудшение «помеховой» обстановки было смоделировано, для чего в процессе обработки ко входным измерениям  $\Delta I_i(t)$  добавлены ряды нормально распределенной случайной величины с заданной дисперсией и нулевым математическим ожиданием. Отношение сигнал/шум  $Q_i$  в каждом ряде определено как  $Q_i = A_{\max,i} / \sigma_i$ , где  $A_{\max,i}$  — максимальная амплитуда полезного сигнала в измерениях  $\Delta I_i(t)$  до их зашумления;  $\sigma_i$  — среднеквадратическое отклонение зашумленных рядов  $\Delta I_i(t)$  без учета влияния полезного сигнала. Максимальным значением отношения сигнал/шум  $Q_{\max}$  во входных рядах считается наибольшее из  $Q_i$ .

Для каждого значения отношения сигнал/шум во входных рядах  $\Delta I_i(t)$  проведено 10 измерений и получено математическое ожидание и дисперсия оценок каждого измеряемого параметра ИВ. При этом истинными значениями параметров ИВ считаются значения, полученные в исходном эксперименте при большом отношении сигнал/шум. Полученные результаты представлены на рис. 3 в виде графиков зависимости математического ожидания оценок  $M[\hat{\alpha}]$ ,  $M[\hat{\theta}]$ ,  $M[\hat{V}]$ ,  $M[\hat{\tau}]$  от величины  $Q_{\max}$  (рис. 3а - 3г) и графиков зависимостей относительного среднеквадратического отклонения (СКО) оценок этих параметров  $\sigma_{\hat{\alpha}}/\alpha$ ,  $\sigma_{\hat{\theta}}/\theta$ ,  $\sigma_{\hat{V}}/V$ ,  $\sigma_{\hat{\tau}}/\tau$  от  $Q_{\max}$  (рис. 3д - 3з). Из рисунка видно, что с уменьшением отношения сигнал/шум во входных рядах ПЭС относительное СКО оценок параметров ИВ постепенно увеличивается приблизительно до 0,2, а математическое ожидание этих оценок колеблется около истинного значения этих параметров в пределах погрешности метода. Погрешность метода определяется дискретом изменения соот-

ветствующих параметров при их переборе и в настоящем эксперименте составляет  $10^\circ$  по азимуту и углу места волнового вектора ИВ, 100 м/с по скорости и 0,008 ч по задержке отклика УАВ. На рис. 3а — 3г истинные значения параметров ИВ, а также верхняя и нижняя границы погрешностей

метода по соответствующим измеряемым параметрам, показаны пунктирными линиями. Указанная тенденция прослеживается до определенного порогового значения  $Q_{\max} \approx 5$ . При дальнейшем уменьшении отношения сигнал/шум математические ожидания параметров ИВ выходят за пределы погрешностей метода (т.е. оценки становятся смещенными), а значения относительного СКО оценок резко возрастает до 0,3 по параметрам  $\alpha$  и  $V$  и до 0,8 ... 0,9 по параметрам  $\theta$  и  $\tau$ . Полученное пороговое значение отношения сигнал/шум будем

Рис. 3

считать предельно допустимым, при котором еще возможно применение разработанного алгоритма определения параметров ИВ.

#### 4. Заключение

Основные результаты настоящей работы заключаются в следующем:

1. Разработан алгоритм оптимальной оценки пространственно-временных параметров ионосферного возмущения, регистрируемого на фоне Гауссовых шумовых колебаний ПЭС, вызванных мелкомасштабными неоднородностями ионосферы.
2. Результаты определения параметров ИВ при запуске РН «Протон» 5 июля 1999 г. адекватны существующим представлениям о механизме генерации ИВ при запусках ракет, что говорит о состоятельности оценок, полученных на основании предложенного алгоритма.
3. Установлено, что при отношении сигнал/шум во входных рядах ПЭС  $Q_{\max} \geq 5$  с точностью, определяемой погрешностью метода, оценки параметров ИВ, полученные на основании предложенного алгоритма, можно считать несмещенными. При этом точность оценок не хуже 20 %.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты N 99-05-64753 и 00-05-72026) и гранта ведущих научных школ Российской Федерации N 00-15-98509.

#### Литература

1. Нагорский П.М. Неоднородная структура области F ионосферы, образованная ракетами // Геомагнетизм и аэронавигация. 1998. Т.38. С.100-106.
2. Нагорский П.М. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. Томский государственный университет. Томск. 1998.
3. Calais E., Minster J.B. // GPS detection of ionospheric perturbations following the January 1994, Northridge earthquake. Geophysical Research Letters. 1995. V.22. P.1045-1048.
4. Calais E., Minster J.B. // GPS detection of ionospheric perturbations following a Space Shuttle ascent. Geophysical Research Letters. 1996. V.23. P.1897-1900.
5. Fitzgerald T.J. // Observations of total electron content perturbations on GPS signals caused by a ground level explosion. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 1997. V.59. P.829-834.
6. Calais E., Minster B.J., Hofton M.A., Hedlin M.A. H. // Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements. Geophysical Journal International. 1998. V.132. P.191-202.
7. Афраймович Э.Л., Косогооров Е.А., Плотников А.В. Труды VI международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь". Воронеж, 2000. Т.1. С. 462-474.

8. Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Palamarchouk K.S., Perevalova N.P., and Plotnikov A.V. // The use of GPS arrays in detecting shock-acoustic waves generated during rocket launchings. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2001. V.63. P. 1941-1957.
9. Афраймович Э.Л., Кирюшкин В.В., Чернухов В.В. Способ обнаружения, измерения фазовой скорости и направления прихода ионосферного возмущения. Заявка N 2000118491 от 20.07.2000. Решение о выдаче патента на изобретение от 15.01.2002 г.
10. Афраймович Э.Л., Кирюшкин В.В., Чернухов В.В. Способ обнаружения ионосферного возмущения и определения местоположения его источника. Заявка N 2000118492 от 20.07.2000. Решение о выдаче патента на изобретение от 15.01.2002 г.
11. Афраймович Э.Л., Чернухов В.В., Кирюшкин В.В. // Пространственно-временные характеристики ионосферного возмущения, обусловленного ударно-акустическими волнами, генерируемыми при запусках ракет. Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. N11. С. 1299-1307.
12. Чистякова Л.В. Статистические характеристики рассеянного сигнала при ВНЗ ионосферы - В кн.: Актуальные вопросы распространения декаметровых волн. ИЗМИРАН М.: 1973, С. 130-131.
13. Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978.

#### Краткие сведения об авторах:

Афраймович Эдуард Леонтьевич, 1940 г.р. Закончил Казахский Госуниверситет в 1965 г. Доктор физ.-мат. наук с 1983 г., профессор по специальности "радиофизика" с 1990 г., главный научный сотрудник Института солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, с 1991 г. Основные направления научных интересов Афраймовича Э. Л.: экспериментальная физика ионосферы и ионосферного распространения радиоволн; разработка новых эффективных методов радиозондирования ионосферы; исследования ионосферных искажений сигналов систем радиолокации, радиопеленгации и радионавигации.

Кирюшкин Владислав Викторович, 1971 г.р. Закончил Тамбовское Высшее Военное Авиационное Инженерное Училище в 1993 году. Основное направление научных интересов – распространение радиоволн, спутниковые радиотехнические системы навигации.