



УДК 621.391, 621.396, 621.369

*К. В. Власова, М. А. Никитин,  
А. С. Чугайнов, А. В. Кочмарский*

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОГО СИГНАЛА

Представлена методика оценки параметров двухлучевого ионосферного сигнала методом максимального правдоподобия. Приведены результаты модельных экспериментов, а также расчеты реальных ионосферных сигналов на трассе Москва – Калининград.

78

The technique of an estimation of parameters of a dual-beam ionospheric signal is presented by a method of the maximum credibility. Results of modeling calculations and results of calculations of real ionospheric signals on line Moscow – Kaliningrad are resulted.

**Ключевые слова:** ионосфера, распространение радиоволн, метод максимального правдоподобия, фазовая плоскость.

**Key words:** ionosphere, distribution of radio-waves, method of the maximum credibility, phase plane.

При длительностях зондирующих сигналов менее секунды в точку приема приходит несколько радиоимпульсов с временными задержками  $\sim 400$  мкс. В этом случае ионосферный сигнал становится сложным. Он состоит из ряда радиоимпульсов, отраженных от разных областей ионосферы, с частичными наложениями во времени. Методика оценки параметров такого ионосферного сигнала дана в статье «Модель ионосферного сигнала с мультипликативной помехой», опубликованной в данном журнале (см. с. 85). В нашей работе продолжен анализ ее возможностей. Представлены результаты модельных экспериментов и расчетов параметров ионосферного сигнала на трассе Москва – Калининград. Полученные при этом данные отображены на фазовой плоскости. Показана возможность фазового уточнения частоты сигнала и начальной фазы радиоимпульсов. В отличие от корреляционного анализа начальная фаза оценивается на интервале радиоимпульса, а не в точке начала радиоимпульса.

В статье «Модель ионосферного сигнала с мультипликативной помехой» представлена методика оценки параметров ионосферного сигнала, состоящего из ряда радиоимпульсов, отраженных от разных областей ионосферы. Продолжим анализ возможностей данного метода на примере двухлучевого ионосферного сигнала. Частота  $\omega$  оценивается выражением



$$C' = \frac{\sum_{n=1}^N (y_{n+2} + y_n) y_{n+1}}{\sum_{n=1}^N y_{n+1}^2} = \frac{\overline{(y_{n+2} + y_n) y_{n+1}}}{\overline{y_{n+1}^2}}, \quad (1)$$

где  $C' = \exp(i\omega\Delta t)$ .

Для оценки амплитуды и фазы сигнала запишем функционал правдоподобия:

$$\Delta I_n = \sum_{m=0}^M |\hat{y}_{n+m} - \hat{U}' \exp(i\omega t_{n+m})|^2. \quad (2)$$

Индекс  $m$  выполняет операцию суммирования на интервале обработки информации  $\Delta t$  ( $M = 20, \Delta t = 20$  мкс). Индекс  $n$  определяет скользящий характер обработки. Дифференцируя (2) по  $\hat{U}'$  и приравнявая дифференциал к нулю, получим оценочное значение комплексной амплитуды  $\hat{U}'$ :

$$\hat{U}'_n = \overline{\hat{y}_{n+m} \exp(-i\omega t_{n+m})}. \quad (3)$$

Черта сверху означает суммирование на интервале  $\Delta t = 20$  мкс. Выражение (3) справедливо для всех трех областей ионосферного сигнала за исключением переходных, где нет соответствия правой и левой частей функционала. На рисунке 1 показана зависимость оценочной фазы сигнала от времени. На интервале времени, где существует сигнал, дисперсия фазы небольшая. Отмечаются различия фаз первой, второй и третьей областей сигнала, а также регулярный наклон фазовой зависимости, связанный с неточностью оценки частоты  $\omega$ . Наличие этого наклона позволяет провести коррекцию оценки частоты по фазе. Для этого из соотношения

$$\varphi(t) = \Delta\omega t + \varphi_0, \quad (4)$$

определяется погрешность частоты  $\Delta\omega$  и добавляется к первоначальной оценке  $\omega' = \omega + \Delta\omega$ .

В результате частота  $\omega'$  существенно уточняется, наклон линий сводится к нулю и фазы всех трех областей оказываются независимыми от времени (рис. 2). Таким образом, имеется возможность оценить начальные фазы ионосферного сигнала в моменты времени  $t_{01}, t_{02}, t_{01} + T$ . Фазы трех областей сигнала  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  могут быть представлены следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \varphi_{01}, \\ \varphi_2 &= \varphi_{01} + \omega(t_{02} - t_{01}) - \varphi_{02}, \\ \varphi_3 &= \varphi_{02} + \omega(t_{01} + T), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\varphi_{01}, \varphi_{02}, t_{01}, t_{02}$  — начальные фазы и время приема первого и второго радиоимпульсов. При выполнении операции «коррекция частоты»



ты» в выражениях (5) частота полностью исключается и фазы трех областей сигнала  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  однозначно оказываются связанными с начальными фазами радиоимпульсов  $\varphi_{01}, \varphi_{02}$ .

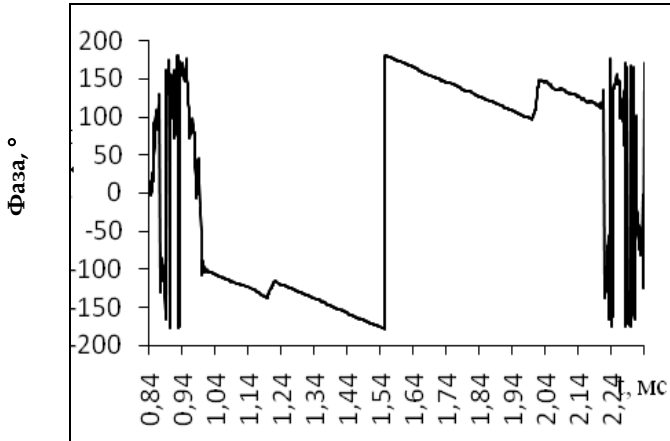


Рис. 1

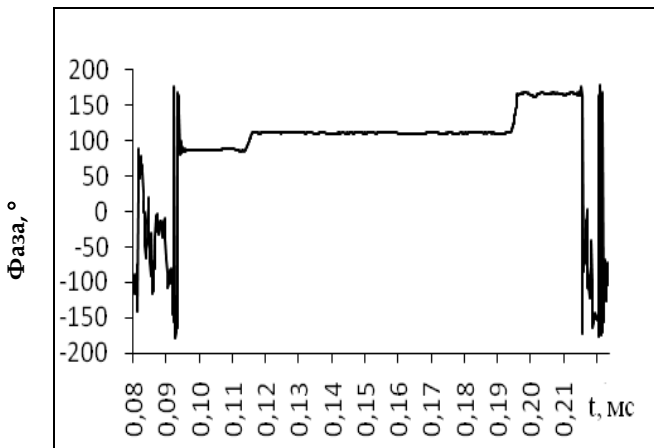


Рис. 2

Амплитуды трех областей ионосферного радиосигнала оцениваются по выражению (3). На рисунке 3 показана зависимость амплитуд от времени.

Первая область дает возможность оценить амплитуду первого  $U_1$  радиоимпульса, третья – второго  $U_2$ , а вторая – амплитуду  $U_{1,2}$ :

$$U_{1,2} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\varphi_{02} - \varphi_{01})}. \quad (6)$$

В результате параметры двухлучевого ионосферного сигнала могут быть оценены.

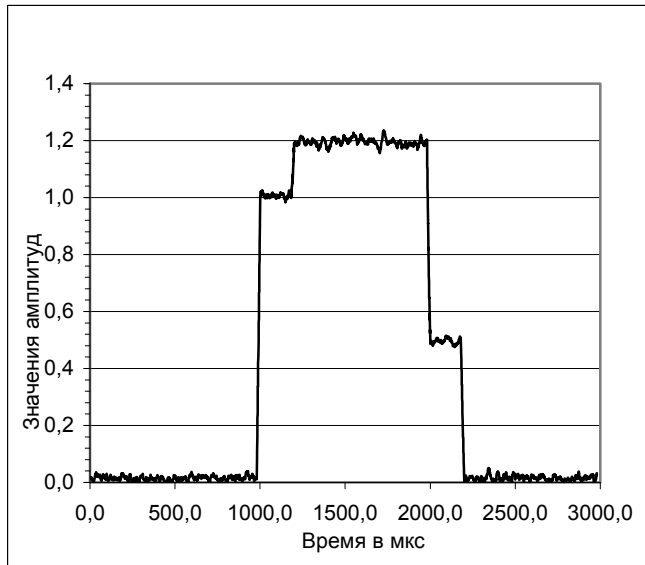


Рис. 3

Статистика получаемых решений показана на рисунке 4, изображающем фазовую плоскость, на которой точками представлены квадратурные компоненты  $U \cos(\varphi)$  и  $U \sin(\varphi)$ . В результате совокупность точек в области нуля определяет распределение шума в отсутствии сигнала. При наличии сигнала отображаются три области с соответствующими амплитудами и фазами. Отношение «сигнал/шум» в данном случае равно 27 дБ. Статистика параметров сигнала (амплитуд и фаз) при уменьшении данного отношения до 13 дБ показана на рисунке 5.

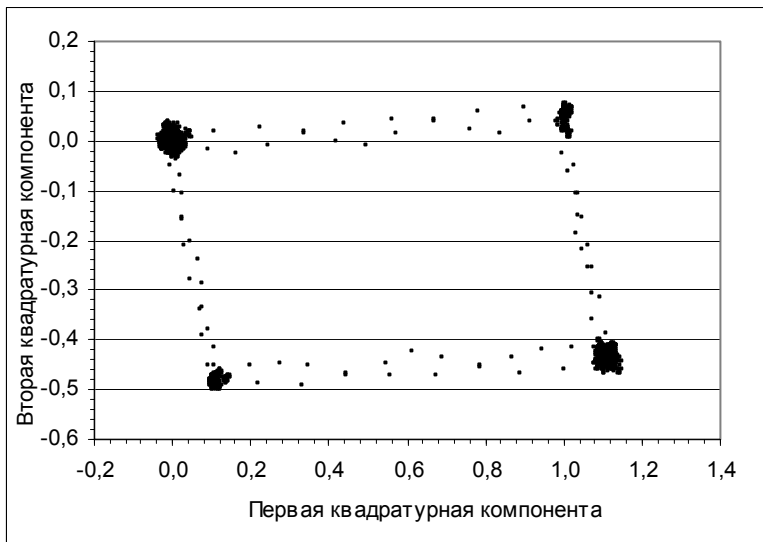


Рис. 4

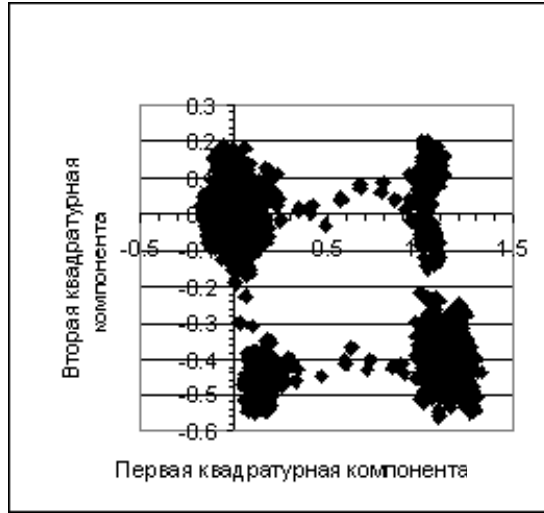


Рис. 5

Дисперсия амплитуды и фазы увеличилась, однако вполне возможно выделение областей сигнала и оценка средних значений амплитуд и фаз.

Фазовая плоскость является основой для обнаружения сложного, многолучевого импульсного ионосферного сигнала и анализа его структуры. Она может быть преобразована в двумерную поверхность плотности распределения амплитуды фазовых точек сигнала. Кроме того, на фазовой плоскости совокупность радиоимпульсов в комплексной форме имеет простой вид. Последовательные отсчеты сигнала в первой области можно записать как

$$\hat{U}_{1n} = U_{01} \exp(i(\omega t_n + \varphi_{01})), \quad t_{01} < t_n < t_{02}.$$

Во второй области

$$\hat{U}_{2n} = U_{01} \exp(i(\omega t_n + \omega t_{02} + \varphi_{01})) + U_{02} \exp(i(\omega t_n + \varphi_{02})), \quad t_{02} < t_n < t_{01} + T.$$

В третьей –

$$\hat{U}_{3n} = U_{02} \exp(i(\omega t_n + \varphi_{02})), \quad t_{01} + T < t_n < t_{02} + T.$$

Если исключить частоту  $\omega$ , то в комплексном виде в первой, второй и третьей областях сигнала выражения будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \hat{U}_1 &= U_{01} \exp(i\varphi_{01}), \\ \hat{U}_2 &= U_{01} \exp(i\varphi_{01}) + U_{02} \exp(i\varphi_{02}), \\ \hat{U}_3 &= U_{02} \exp(i\varphi_{02}). \end{aligned} \quad (7)$$

Это основа для анализа сложной многолучевой структуры ионосферного сигнала. При наличии трехлучевой структуры выражения (7) запишутся в виде



$$\begin{aligned}
 \hat{U}_1 &= U_{01} \exp(i\varphi_{01}), \\
 \hat{U}_2 &= U_{01} \exp(i\varphi_{01}) + U_{02} \exp(i\varphi_{02}), \\
 \hat{U}_3 &= U_{01} \exp(i\varphi_{01}) + U_{02} \exp(i\varphi_{02}) + U_{03} \exp(i\varphi_{03}), \\
 \hat{U}_4 &= U_{02} \exp(i\varphi_{02}) + U_{03} \exp(i\varphi_{03}), \\
 \hat{U}_5 &= U_{03} \exp(i\varphi_{03}).
 \end{aligned} \tag{8}$$

Решая данную систему относительно комплексных амплитуд радиоимпульсов, можно оценить структуры ионосферного сигнала.

В таблице представлены оценки параметров двухлучевого сигнала в зависимости от отношения «сигнал/шум». В первой ее строке даны модельные значения параметров двухлучевого ионосферного сигнала. В остальных строках представлены оценочные данные сигнала в зависимости от отношения «сигнал/шум».

#### Результаты модельных исследований структуры сигнала

Сигнал/шум, дБ	$U_1, \text{В}$	$\varphi_1, ^\circ$	$t_{01}, \text{мс}$	$U_2, \text{В}$	$\varphi_2, ^\circ$	$t_{02}, \text{мс}$	$f, \text{кГц}$
Модельные данные	1	10	1	0,5	90	1,2	215
33	1,0089	9,58	1	0,499	89,96	1,2	215,0015
27	1,012	9,94	1	0,498	89,8	1,2	215,0007
21	1,019	10,7	1	0,494	89,8	1,198	214,9991
18	1,027	10,1	1	0,489	88,9	1,193	215,0013
15	1,035	9,75	1	0,485	87,6	1,191	215,0027
13	1,04	9,65	1	0,48	85,9	1,19	215,0041
12	1,04	-1,009	1,01	0,479	64,5	-	215,0322
33	1,0089	9,58	1	0,499	89,96	1,2	215,0015

Оценим с точки зрения теории оптимального приема погрешности параметров двухлучевого ионосферного сигнала.

Согласно теории [1; 2], дисперсии амплитуды  $D_U$ , начальной фазы  $D_{\varphi_0}$ , частоты  $D_f$  и времени приема  $D_{t_0}$  оцениваются выражением Рао – Крамера

$$D_f = \frac{\sigma^2}{|\hat{U}|^2 NT^2 (2\pi)^2}, \quad D_U = \frac{\sigma^2}{N}, \quad D_{\varphi_0} = \frac{\sigma^2}{|\hat{U}|^2 N}, \quad D_{t_0} = \frac{\sigma^2}{|\hat{U}|^2 N\omega^2}, \tag{9}$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия шума;  $N$  – количество некоррелированных по шуму отсчетов;  $T$  – длительность интервала обработки;  $\omega$  – круговая частота.

Принимая  $\sigma = 0,1$ ,  $f = 215$  кГц,  $T = 20$  мкс, получим следующие среднеквадратичные отклонения:  $SKO_{U_1} = 0,006$ ,  $SKO_{U_2} = 0,006$ ,  $SKO_{\varphi_{01}} = 1,14^\circ$ ,  $SKO_{\varphi_{02}} = 2,29^\circ$ ,  $SKO_f = 0,44$ ,  $SKO_{t_0} = 5 \cdot 10^{-3}$ . Данные погрешности параметров сигнала, в принципе, соответствует оценкам Рао – Краме-



ра. Исключением является время приема первого радиоимпульса  $t_{01}$  которое имеет погрешность  $\sim 3$  мкс, что не соответствует оценке Рао — Крамера. Однако это близко к оценке Вудворда, определяющей дисперсию времени приема по огибающей радиоимпульса:

$$D_{t_0} = \frac{\sigma^2 T}{|\bar{U}|^2 N (2\pi)^2}. \quad (10)$$

$SKO_{t_0}$ , рассчитанное согласно этой формуле, дает значение 0,2 мкс.

Таким образом, модельные расчеты показали возможность оценки параметров двухлучевого импульсного ионосферного сигнала с высокой точностью. Применение метода оценки параметров ограничено отношением «сигнал/шум»  $\sim 13$  дБ.

84

#### Список литературы

1. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем : учебное пособие для вузов. М., 2003.
2. Пахотин В. А., Бессонов В. А., Молостова С. В., Власова К. В. Теоретические основы оптимальной обработки сигналов : курс лекций для радиопизических специальностей. Калининград, 2008.
3. Афраймович Э. Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. М., 1982.

#### Об авторах

Ксения Валерьевна Власова — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, Калининград.

E-mail: p\_ksenia@mail.ru

Михаил Анатольевич Никитин — д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: MNikitin@kantiana.ru

Александр Сергеевич Чугайнов — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: p\_ksenia@mail.ru

Алексей Викторович Кочмарский — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: p\_ksenia@mail.ru

#### About authors

Ksenia Vlasova — PhD, associate professor, Baltic State Academy, Kaliningrad.

E-mail: p\_ksenia@mail.ru

Mikhail Nikitin — Dr, professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: MNikitin@kantiana.ru

Alexander Chugajnov — PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: p\_ksenia@mail.ru

Aleksey Kochmarsky — PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: p\_ksenia@mail.ru