



Список литературы

1. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем: учеб. пособ. для вузов. М., 2003.
2. Книхута Е. В. Развитие методов доплеровской фильтрации ионосферных сигналов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Калининград, 2007.
3. Афраймович Э. Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. М., 1982.
4. Пахотин В. А., Бессонов В. А., Молостова С. В. и др. Теоретические основы оптимальной обработки сигналов: курс лекций. Калининград, 2008.

Об авторах

Валерий Анатольевич Пахотин — д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

Владимир Александрович Бессонов — канд. физ.-мат. наук, доцент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

Сергей Борисович Шаров — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

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

Authors

Valery Pakhotin — Dr., prof., I. Kant Baltic Federal University.

Vladimir Bessonov — Dr., I. Kant Baltic Federal University.

Sergey Sharov — PhD student, I. Kant Baltic Federal University.

Aleksej Kochmarskiy — PhD student, I. Kant Baltic Federal University.

УДК 621.391 + 621.396 + 621.369

**В. А. Бессонов, В. А. Пахотин
С. В. Молостова, А. С. Чугайнов**

МЕТОД ОБРАБОТКИ ИМПУЛЬСНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ СИГНАЛОВ

Представлен новый метод обработки импульсных ионосферных сигналов, основанный на положениях теории оптимального приема. Однако эти положения применены к разностному уравнению, полученному после преобразования принятого сообщения. Представлена теория метода обработки; приведены результаты модельных расчетов, иллюстрирующие эффективность метода обработки.

The new method of processing of pulse ionospheric signals is presented. It is based on positions of the theory of optimum reception. However these positions are applied to difference to the equation received after transformation of the accepted message. The theory of a method of processing is presented, the results of modeling calculations illustrating efficiency of a method of processing are resulted.



Ключевые слова: ионосфера, распространение радиоволн, теория оптимального приема, метод максимального правдоподобия, разностное уравнение.

Key words: an ionosphere, distribution of radio-waves, the theory of is optimum the reception, a method of the maximum credibility, difference the equation.

Введение

Для решения задачи выделения составляющих ионосферного сигнала при импульсном зондировании, как правило, используются радиоимпульсы с малыми длительностями. Если длительность зондирующего радиоимпульса меньше, чем разность времени запаздывания между радиоимпульсами, отраженными от различных областей ионосферы, тогда они являются ортогональными и можно использовать для оптимальной обработки метод корреляционной обработки. Для ионосферы при вертикальном, а также наклонном зондировании длительность радиоимпульсов достигает значения 50–100 мкс. При этом существенно снижается энергия сигнала и уменьшается отношение сигнал/шум. Полоса пропускания приемника в этом случае должна быть не менее 10–20 кГц. Такие технические условия соблюдаются в отдельных комплексах аппаратуры, предназначенных для исследования ионосферных процессов, например для получения ионограмм [3], определяющих структуру ионосферы. Однако для ионосферной радиосвязи, пеленгации и навигации, как правило, используются радиоимпульсы длительностью в десятки и сотни мс. В этом случае ионосферные радиоимпульсы, отраженные от разных областей ионосферы, становятся неортогональными и при использовании корреляционной обработки возникают существенные интерференционные погрешности. В области пеленгации ионосферных сигналов интерференционные погрешности могут достигать десятков градусов. В связи с этим в настоящей работе представлен метод обработки радиоимпульсов при их частичном наложении во времени (в области неортогональности).

Основы теории

Для решения задачи выделения составляющих ионосферного сигнала по времени запаздывания радиоимпульсов, отраженных от разных областей ионосферы, вначале перейдем от принятого сообщения к разностному уравнению, а затем применим положения теории оптимального приема [1, 2] к полученному разностному уравнению. Запишем принятое сообщение в виде:

$$\hat{y}_n = \sum_{m=1}^M \hat{U}_m(t) \exp(i\omega(t_n - t_m)) + \hat{U}_{шн}, \quad (1)$$

где \hat{U}_m — комплексная амплитуда m -радиоимпульса

$$\hat{U}_m = \begin{cases} \hat{U}_m, & \text{если } t \in t_m \div t_m + T; \\ 0, & \text{если } t \notin t_m \div t_m + T; \end{cases}$$

t_m — время приема m -радиоимпульса; T — длительность радиоимпульса.



Ионосферный сигнал (1) состоит из M -радиоимпульсов, отраженных от разных слоев ионосферы. Относительные времена запаздывания радиоимпульсов меньше длительности радиоимпульса $|t_n - t_m| < T$. Частота ω для всех радиоимпульсов на интервале $T = 30$ мс может считаться одинаковой. Доплеровские сдвиги частот от $0 \sim 0,5$ Гц на интервалах ~ 30 мс приводят к изменению разности фаз $\sim 0,5^\circ$ и могут не учитываться. При частичном наложении радиоимпульсов во времени создается особая структура сигнала, состоящая из последовательных областей. В каждой области вследствие суперпозиции радиоимпульсов сигнал имеет вид простой синусоиды с произвольными параметрами: амплитудой, фазой, временем приема. Области определены условиями. Для суперпозиции трех радиоимпульсов они запишутся следующим образом:

- первая область сигнала — $t_1 \leq t_n < t_2$;
- вторая — $t_2 \leq t_n < t_3$;
- третья — $t_3 \leq t_n < t_4$;
- четвертая — $t_1 + T \leq t_n < t_2 + T$;
- пятая — $t_2 + T \leq t_n < t_3 + T$.

В каждой области (индекс k) принятое сообщение имеет вид:

$$\hat{y}_{k,n} = \hat{U}_k \exp(i\omega(t_n - t_k)) + \hat{U}_{шн}. \quad (3)$$

Записывая выражение для $\hat{y}_{k,n+1}$ с учетом (3), можно получить разностное уравнение

$$\hat{y}_{k,n+1} = \hat{C} \hat{y}_{k,n}, \quad (4)$$

где $\hat{C} = \exp(i\omega Dt)$.

Составим функционал правдоподобия для разностного уравнения

$$D_k = \sum_{n=1}^{N-1} |\hat{y}_{k,n+1} - \hat{C} \hat{y}_{k,n}|^2. \quad (5)$$

Значение постоянной \hat{C}_k определяется с помощью дифференцирования функционала правдоподобия (5) и приравнивания дифференциала к нулю

$$\hat{C}_k = \frac{\overline{\hat{y}_{k,n+1} \hat{y}_{k,n}^*}}{|\hat{y}_{k,n}|^2}. \quad (6)$$

Черта сверху означает суммирование.

Постоянная \hat{C}_k определяется частотой ω . Следовательно, она одинакова для всех областей сигнала и индекс « k » можно исключить из (6). В результате получим выражение для оценки \hat{C} по всем отсчетам:

$$\hat{C} = \frac{\overline{\hat{y}_{n+1} \hat{y}_n^*}}{|\hat{y}_n|^2}. \quad (7)$$



Таким образом, оценивается частота ω сигнала. Для выявления структуры сигнала и оценки параметров запишем второй функционал в k -области:

$$Dl_k = \sum_{n=1}^N |\hat{y}_{k,n} - \hat{U}_k \exp(i\omega(t_n - t_k))|^2. \quad (8)$$

Дифференцируя (8) по амплитуде \hat{U}_k и приравнявая дифференциал нулю, получим уравнение правдоподобия:

$$\overline{\hat{y}_{k,n} \exp(-i\omega(t_n - t_k))} = \hat{U}_k. \quad (9)$$

Однако время t_k неизвестно. В связи с этим уменьшим интервал суммирования до минимального, например до 10 отсчетов:

$$\hat{U}_k = \sum_{n=k}^{k+10} \hat{y}_k \exp(-i\omega(t_n)). \quad (10)$$

Индекс k в этом случае будет иметь другой смысл — он станет обозначать отсчет, с которого начато суммирование. В результате будет осуществляться операция «скользящее суммирование» по всей выборке данных. В первой и остальных областях амплитуды и фазы станут постоянными значениями. На границах раздела областей будут переходные области длительностью 10 отсчетов. При такой процедуре обработки появляется возможность оценить структуру сигнала. Например, в первой, второй и третьей областях аналитическая запись трехмодового сигнала будет равна соответственно:

$$\begin{aligned} \hat{U}1 &= \hat{U}_1 \exp(i\omega(t - t_1)); \\ \hat{U}2 &= \hat{U}_1 \exp(i\omega(t_2 - t_1)) \exp(i\omega(t - t_2)) + \hat{U}_2 \exp(i\omega(t - t_2)); \\ \hat{U}3 &= \hat{U}_1 \exp(i\omega(t_3 - t_1)) \exp(i\omega(t - t_3)) + \\ &+ \hat{U}_2 \exp(i\omega(t_3 - t_2)) \exp(i\omega(t - t_3)) + \hat{U}_3 \exp(i\omega(t - t_3)) \end{aligned} \quad (11)$$

при $t \in t_1 \div t_2$.

Переходные области позволяют оценить время t_1, t_2, t_3 . Следовательно, при оцененных значениях t_1, t_2, t_3 по выражениям (11) можно восстановить амплитуды и фазы совокупности радиоимпульсов $\hat{U}_1, \hat{U}_2, \hat{U}_3$.

Структура сигнала может быть получена на основе функционала правдоподобия. Если постоянную \hat{C} из (6) подставить в функционал (5), то в области сигнала будет отмечаться глубокий минимум функционала с переходными областями на границах областей. По этим переходным областям можно оценить значения времени приема радиоимпульсов t_1, t_2, t_3 , а также $t_1 + T, t_2 + T, t_3 + T$.

Результаты модельных исследований метода оценки параметров по групповому запаздыванию

Рассмотрим возможности метода оценки параметров ионосферного сигнала по времени группового запаздывания на основе модельных



расчетов. Уточним методику расчета для двух составляющих сигнала. В результате временного наложения создаются три временных интервала, и принятое сообщение можно записать в виде:

$$y_n = \sum_{m=1}^3 U_m \cos[\omega(t_n - t_{0mn}) + j_{0m}] + U_{u,n}, \quad (12)$$

где U_m, j_{0m}, t_{0mn} – амплитуда, начальная фаза и время начала каждой из трех областей.

Используя последовательность отсчетов y_n, y_{n+1}, y_{n+2} , перейдем к разностному уравнению

$$y_{n+2} + y_n - 2y_{n+1} \cos(\omega\Delta t) = U'_{u,n}. \quad (13)$$

Данное выражение справедливо внутри каждой области сигнала. Оно содержит только один параметр $C' = 2 \cos \omega\Delta t$, который не зависит от номера n и значение которого во всех трех областях сигнала одинаковое (за исключением переходных областей). Однако на границе областей в пределах десяти последовательных отсчетов выражение (12) не верно. Шумовые $U'_{u,n}$ отсчеты при переходе к разностному уравнению меняются. Они, в принципе, должны увеличиться вследствие операции вычитания при переходе к разностному уравнению.

На основании (12) запишем логарифм функции правдоподобия:

$$\ln(L(\bar{Y})) = -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N |y_{n+2} + y_n - C'y_{n+1}|^2. \quad (14)$$

Дифференцируя (14) по параметру C' и приравнявая дифференциал к нулю, получим уравнение правдоподобия для оценки C' , а следовательно, и для оценки частоты ω :

$$C' = \frac{\sum_{n=1}^N (y_{n+2} + y_n)y_{n+1}}{\sum_{n=1}^N y_{n+1}^2} = \frac{\overline{(y_{n+2} + y_n)y_{n+1}}}{\overline{y_{n+1}^2}}. \quad (15)$$

Черта сверху означает суммирование по индексу n . Подставляя C' в (14), возводя в квадрат и нормируя на первое слагаемое, получим нормированное значение функционала правдоподобия

$$\Delta l = 1 - \frac{C' \overline{(y_{n+2} + y_n)y_{n+1}}}{\overline{(y_{n+2} + y_n)^2}}. \quad (16)$$

Исключая единицу из (16) и изменяя знак, получим функционал в виде:

$$\Delta = \frac{C' \overline{(y_{n+2} + y_n)y_{n+1}}}{\overline{(y_{n+2} + y_n)^2}}. \quad (17)$$

Данный функционал является основой для решения задачи выделения сигнала из шума, оценки времени начала и окончания сигнала и оценки внутренней структуры сигнала.



На рисунке 1 показана структура сигнала, состоящая из двух радиоимпульсов с частичным наложением во времени. Приняты следующие параметры сигнала: амплитуды радиоимпульсов $U_1 = 1$, $U_2 = 0,5$; начальные фазы радиоимпульсов $j_{01} = 10^\circ$, $j_{02} = 30^\circ$, время приема радиоимпульсов $t_{01} = 1$ мс, $t_{02} = 1,2$ мс, длительность радиоимпульсов $T = 1$ мс, частота $f = 215$ кГц, интервал между отсчетами $\Delta t = 1$ мкс. Если первая и третья области сигнала содержат информацию или о первом, или о втором радиоимпульсе, отраженном от ионосферы, то вторая область является областью интерференции. В результате энергия сигнала меняется в зависимости от соотношения амплитуд и разности фаз. Рассмотрим возможность обработки сигнала на основе выражения (17). Будем использовать скользящий интервал обработки суммирования длительностью до 20 отсчетов (20 мкс, T – длительность радиоимпульса).

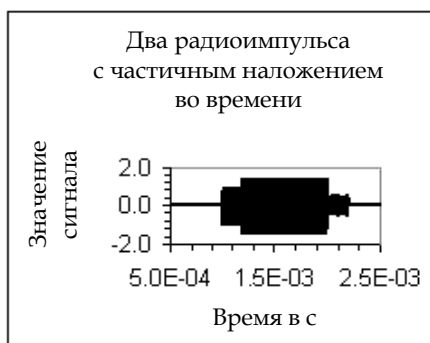


Рис. 1

На рисунке 2 показан функционал (17) в зависимости от времени. Он имеет вид трапеции с боковыми сторонами, которые формируются на интервале скользящей обработки $\Delta t_1 = 20$ мкс. Следовательно, боковые стороны трапеции фактически представляют собой переходные области от шума к сигналу и от сигнала к шуму. В верхней части зависимости функционала от времени отмечаются дополнительные переходные области. Их длительность по времени составляет 20 мкс. Они создаются за счет перехода от первой области сигнала ко второй и от второй к третьей. По этим переходным областям можно определить внутреннюю структуру сигнала. Если сигнал состоит из n радиоимпульсов, то переходных областей будет $n+2$.

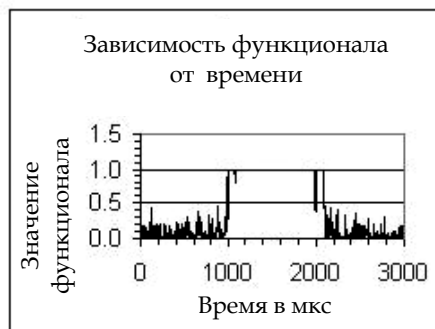


Рис. 2

Своеобразная особенность – дисперсия шума. Она существенна в области отсутствия сигнала и достаточно мала в области его расположения. Такая особенность характерна для метода минимальной дисперсии. Минимальная дисперсия в области расположения сигнала отмечается и для зависимости оцениваемой частоты от времени (рис. 3), а также для других оцениваемых параметров. Указанная особенность является основанием для вывода: метод максимального правдоподобия



Рис. 3

включает в себя метод минимальной дисперсии и фактически дает его обоснование.

Уровень нормированного функционала в области сигнала, исключая переходные области, равен единице. Это позволяет легко устанавливать пороговое значение, определяющее границы сигнала со сложной внутренней структурой. В таблице показаны результаты модельных

расчетов зависимости t_{01} и t_{02} от отношения сигнал/шум.

Результаты модельных расчетов

№ п/п	Отношение сигнал/шум, дБ	t_{01} , мкс	t_{02} , мкс
1	Модельные данные	1000	1200
2	47	1003	1203
3	27	1003	1203
4	21	1003	1198
5	18	1003	1193
6	15	1003	1191
7	13	1003	1190
8	12	1010	—
9	10	1013	—

По данным, представленным в таблице, оценка времени приема первого и второго радиоимпульсов удовлетворительная в области отношения сигнал/шум до 13 дБ. Ошибка не превышает 10 мкс.

Заключение

В настоящей работе представлен метод обработки ионосферного сигнала, состоящего из нескольких радиоимпульсов, отраженных от разных областей ионосферы и являющихся неортогональными по отношению друг к другу. Метод основан на положениях теории оптимального приема. Он позволяет оценить все параметры составляющих ионосферного сигнала. Модельные расчеты показали высокую точность оценок параметров сигнала при использовании разработанного метода вплоть до значения отношения сигнал/шум ~ 13 дБ.



Список литературы

1. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем: учеб. 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 радиофизических специальностей. Калининград, 2008.
3. Афраймович Э.Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. М., 1982.

Об авторах

Валерий Анатольевич Пахотин — д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

Владимир Александрович Бессонов — канд. физ.-мат. наук, доцент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

Светлана Валерьевна Молостова — канд. физ.-мат. наук, доцент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

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

Authors

Valery Pakhotin — Dr., prof., I. Kant Baltic Federal University.

Vladimir Bessonov — Dr., I. Kant Baltic Federal University.

Svetlana Molostova — Dr., I. Kant Baltic Federal University.

Alexander Chugainov — PhD student, I. Kant Baltic Federal University.