



УДК 621.391+ 621.396+ 621.369

**В. А. Пахотин, В. А. Бессонов
С. Б. Шаров, А. В. Кочмарский**

КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ ДЛЯ ПРИЕМА ИОНОСФЕРНЫХ СИГНАЛОВ

Представлен комплекс аппаратуры, разработанный для приема и обработки ионосферных сигналов. Показана структура импульсных ионосферных сигналов, полученная на трассе Москва – Калининград. Приведены результаты модельных исследований метода обработки ионосферных сигналов.

The complex of equipment developed for reception and processing of ionospheric signals is presented. The structure of pulse ionospheric signals received on a line Moscow – Kaliningrad is shown. Results of modeling researches of a method of processing of ionospheric signals are resulted.

Ключевые слова: комплекс аппаратуры, ионосферный сигнал, обработка.

Key words: complex of equipment, ionospheric signal, processing.

Введение

Ионосферные сигналы характеризуются значительной мультипликативной помехой, связанной с нестационарностью параметров сигнала. В связи с этим задача разрешения лучевой структуры оказывается достаточно сложной. Доплеровская фильтрация ионосферных сигналов [3], которая часто используется для разделения составляющих сигнала, не позволяет получать достоверную информацию о его параметрах. Доплеровская фильтрация с высоким разрешением [4] также оказывается малоэффективной. К настоящему времени методов обработки сигналов с мультипликативной помехой практически не существует. Поэтому единственная возможность решения задачи получения информации о составляющих ионосферного сигнала – переход в область, где мультипликативная помеха несущественна. Такой является область малых временных интервалов, когда нестабильность параметров составляющих сигнала достаточно мала. В связи с этим на кафедре радиофизики разработан комплекс аппаратуры для приема импульсных ионосферных сигналов длительностью менее секунды и разработки методов разделения составляющих сигнала по времени группового запаздывания.

Комплекс аппаратуры для приема ионосферных сигналов

При ионосферном распространении радиоволн в точку приема, как правило, приходит несколько лучей, отраженных от разных областей ионосферы. В результате при передаче радиоимпульсов вместо одного принимается суперпозиция радиоимпульсов с частичным наложением во



времени. Время приема каждого радиоимпульса связано со временем группового запаздывания и содержит ценную информацию о структуре ионосферы. В связи с этим возникает задача разработки и создания комплекса аппаратуры для приема ионосферных сигналов с оценкой времени приема. На рисунке 1 показана схема распространения лучей, отраженных от E-, F1-, F2-областей ионосферы. От точки излучения (1) распространяется один радиоимпульс. В связи с различием траекторий лучей радиоимпульсы в точку приема (2) приходят с относительным запаздыванием. К точке (2) подходят с соответствующим запаздыванием во времени три радиоимпульса. Если длительность радиоимпульса больше, чем временное запаздывание радиоимпульсов, то возникает сложная структура сигнала с частичным наложением во времени. Она показана на рисунке 2. Первая область содержит информацию о радиоимпульсе с минимальным временем распространения. Вторая область является суперпозицией двух радиоимпульсов; третья область — суперпозицией трех радиоимпульсов. Четвертая область содержит информацию о втором и третьем радиоимпульсах; пятая область — о третьем радиосигнале.

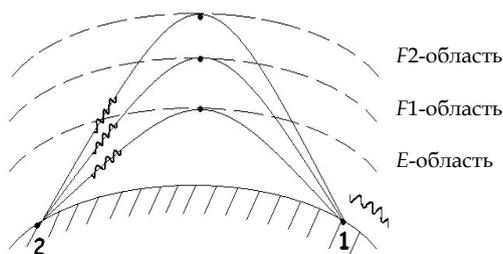


Рис. 1. Лучевые траектории в ионосфере

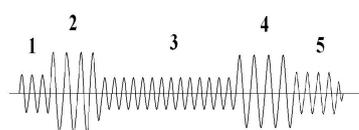


Рис. 2. Структура ионосферного сигнала

Для получения информации о структуре ионосферного радиосигнала к настоящему времени создан комплекс аппаратуры. Основа его — приемник «Катран» и устройство SIGMA с комплексом матобеспечения "ZET-Lab-Studio", которое позволяет создавать виртуальные приборы типа осциллограф, спектроанализатор, самописец. На рисунке 3 показана блок-схема комплекса аппаратуры. Кварцевый генератор с термостабилизацией обеспечивает стабильность шкалы времени $\frac{Dt}{T} \approx 10^{-8}$.

Однако кварцевый генератор ЭВМ обеспечивает меньшую стабильность отсчета времени $\frac{Dt}{T} \approx 10^{-7}$. Этого достаточно для относительных измерений времени прихода ионосферных радиоимпульсов. Но для абсолютных измерений времени приема такой стабильности недостаточно.



Рис. 3. Блок-схема комплекса аппаратуры



Антенна представляет собой вертикальный вибратор, установленный на крыше здания БФУ им. И. Канта. Длина вибратора переменная: от 3 м на частотах ~ 30 МГц до 5 м на частотах ~ 5 МГц. Изменение длины вибратора обеспечивается подстроечными элементами и частью верхних оттяжек. Для подключения вибратора к приемнику используется трансформаторный переход к кабелю типа РД, который практически исключает синфазную составляющую, наводимую сигналом на кабеле. Приемник «Катран» с синтезированной частотой гетеродинов обеспечивает точную настройку на рабочую частоту и возможность синхронизации частот гетеродина с помощью внешнего кварцевого генератора.

Для экспериментальных измерений времени приема радиоимпульсов была определена трасса Москва – Калининград протяженностью 1200 км. Излучающей радиостанцией выступила станция точного времени РВМ, которая работает по часовому расписанию на трех частотах: 4996, 9996 и 14996 кГц. По расписанию излучаются секундные и десятигерцовые импульсы, а также несущая частота. На рисунках 4 и 5 показаны различные случаи приема ионосферных сигналов (на рисунке 4 – случай приема однолучевого сигнала). Фронт принятого радиоимпульса имеет длительность $T=110$ мкс, что соответствует установленной полосе пропускания последнего каскада приемника $\Delta f = 9$ кГц.

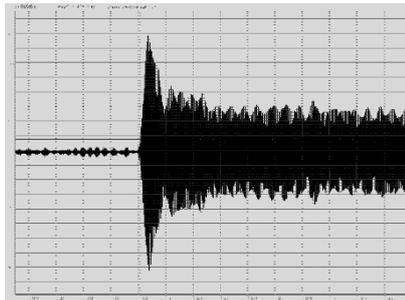


Рис. 4. РВМ, Москва, 3.03.2010 г., 15 ч, прием трех лучей

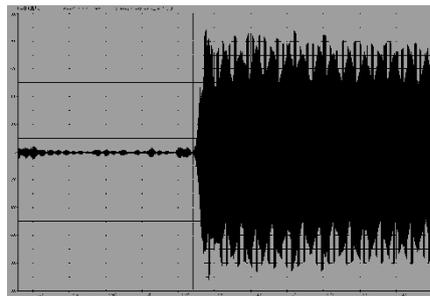
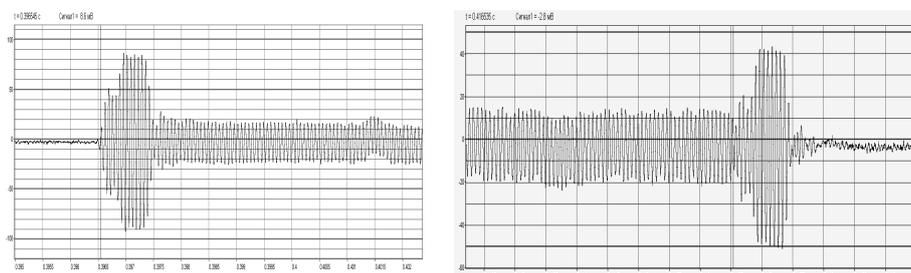


Рис. 5. РВМ, Москва, 3.03.2010 г., 16 ч, прием одного луча

На рисунке 5 показан случай приема трехлучевого сигнала. Можно выделить область времени ≈ 500 мкс, относящуюся к первому радиоимпульсу. Однако есть и вторая область – от 0,06 до 0,0607 с – длительностью 700 мкс, которую можно отнести к области суперпозиции двух первых радиоимпульсов. Далее следует область суперпозиции трех радиоимпульсов.

На рисунке 6, а показан случай приема трех лучей. Задержка первого радиоимпульса по отношению ко второму равна ≈ 400 мкс, второго по отношению к третьему ≈ 400 мкс. Конечная часть сложного радиоимпульса представлена на рисунке 6, б.

Таким образом, комплекс аппаратуры дает возможность получить информацию о временной структуре сложного радиоимпульса. Возникает задача создания метода для выявления временной структуры сигнала и оценки его параметров. Ориентировочные относительные времена задержек отдельных радиоимпульсов составляют $\approx 100 \div 500$ мкс.



а

б

Рис. 6. РВМ, Москва, 4.04.2010 г., 11 ч, прием трех лучей

Оценки параметров сигнала методом максимального правдоподобия

Основой метода оценки времени приема радиоимпульсов стала теория оптимального приема [1; 2]. Однако положения этой теории применяются не к принятому сообщению, а к разностному уравнению. Согласно методике проведены предварительные расчеты, которые представлены в таблице.

Расчетные данные в зависимости от дисперсии шума

Отношение сигнал/шум, дБ	U_1	U_2	φ_1 , град	φ_2 , град	t_1 , мс	t_2 , мс	f , кГц
34,4	1,02	0,51	10,7	84,2	1,5	4,5	1,5999
28,4	1,02	0,52	10,9	84,0	1,5	4,5	1,6
23,3	1,01	0,52	11,5	85,3	1,5	4,5	1,5999
21,5	1,01	0,52	11,7	159,4	1,5	4,6	1,5996
20,8	1,01	0,53	11,7	158,8	1,5	4,6	1,5997
19,4	1,0	0,52	11,9	-	1,5	4,8	1,599
18,3	1,0	0,52	12,3	-	1,5	4,8	1,5993
17,2	0,99	0,52	-24,5	-	1,4	4,8	1,5992
16,3	0,99	0,52	-24,2	-	1,4	4,8	1,5992
Модельные данные	1,0	0,5	10	80	1,5	4,5	1,6

В первой строке таблицы даны модельные данные, а в следующих представлены оценки амплитуд U_1 , U_2 , фаз φ_1 , φ_2 , времени приема t_1 , t_2 и частоты F в зависимости от отношения сигнал/шум. Обращает на себя внимание высокая точность оценки частоты на интервале 20 мс: $\Delta f \approx 0,8$ Гц. Оценки времени приема первого и второго радиоимпульсов отличаются от модельных значений на $0,1 \div 0,3$ мс даже при отношении сигнал/шум ≈ 16 дБ. Длительность радиоимпульсов принята $T=20$ мс, интервал обработки $\tau=0,625$ мс, интервал между отсчетами $\Delta t=62,5$ мкс.



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.