

**В. В. Мялковский, К. В. Власова  
Н. Л. Бузинский, В. А. Бессонов**

### **ИОНОСФЕРНАЯ СТАНЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ «ВЕКТОР»**

*Представлена структура станции вертикального зондирования «Вектор» и результаты корреляционной обработки данных. Для вертикального зондирования ионосферы используется сложный сигнал в виде M-последовательности, содержащий 16 позиций. Показаны пути дальнейшей модернизации станции. К ним относится расширение возможностей определения параметров сигналов при двукратном отражении от ионосферы.*

*The structure of station of vertical sounding "Vector" and results of correlation data processing is presented. For vertical sounding of an ionosphere the difficult signal in the form of the M sequence, containing 16 positions is used. Ways of further modernization of station are shown. They treat expansion of opportunities of determination of parameters of signals at twofold reflection from an ionosphere.*

**Ключевые слова:** ионосферное зондирование, радиоимпульс, оценка параметров, корреляционная функция, M-последовательность.

**Key words:** ionospheric sounding, radio impulse, assessment of parameters, correlation function, M-sequence.

Вертикальное зондирование ионосферы продолжает оставаться основным методом сбора информации об ионосфере. С помощью станций вертикального зондирования можно получить сведения обо всех изменениях электронной концентрации, происходящих в ионосфере. В связи с этим существует опорная сеть ионосферных станций вертикального зондирования ионосферы. Данные этих станций обобщаются в известных эмпирических моделях типа IRI. Они являются основой для расчета ионосферных линий связи, для оценки работоспособности



различных комплексов аппаратуры, работающих на основе ионосферных радиоволн.

Техника вертикального зондирования постоянно совершенствуется. На смену ионозондам с киловатными мощностями приходят компактные маломощные устройства на основе сложных сигналов. В этом случае они оказываются удобными для ионосферного обеспечения систем связи, для корректировки модели ионосферы в заданном регионе по реальным ионосферным данным.

### Описание станции вертикального зондирования «Вектор»

Блок-схема станции вертикального зондирования «Вектор» представлена на рисунке 1. Она содержит передающую и приемную антенны, излучатель и приемник. Передающая антенна типа антенны бегущей волны «Дельта» с вертикальным лепестком диаграммы направленности. Она установлена на крыше здания БФУ им. И. Канта и работает в широком диапазоне частот. В качестве приемной антенны используются два полуволновых вибратора, дополненные конструктивными элементами до конических вибраторов с целью расширения частотного диапазона. Два конических вибратора расположены перпендикулярно друг другу для приема эллиптически поляризованных волн, отраженных от ионосферы. На антенну подается сигнал  $\sim 400$  В по амплитуде. Приемник принимает радиосигналы, отраженные от ионосферы, усиливает их и преобразует по частоте. Промежуточная частота приемника равна 215 КГц.

63

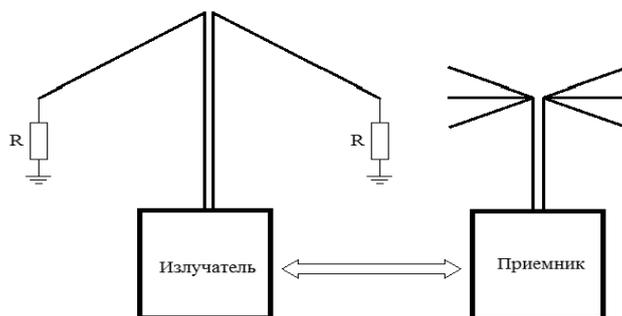


Рис. 1. Блок-схема станции вертикального зондирования «Вектор»

Излучатель (рис. 1) излучает М-последовательность радиоимпульсов (рис. 2). Длительность одной позиции 30 мкс. Длительность М-последовательности  $T = 480$  мкс. Интервал между отсчетами  $\Delta t = 0,2$  мкс, между излученными последовательностями — 6 мс. Этого достаточно, чтобы радиоволны даже три раза отразились от ионосферы. Рабочая частота меняется дискретно от 1 до 9 МГц.

На рисунке 3 продемонстрирована исходная М-последовательность, принятая приемником в момент излучения. Длительность одной позиции 30 мкс. Один отсчет равен 0,2 мкс. Длительность сложного сигнала 480 мкс. Неравномерность амплитуды связана с особенностью передачи энергии от излучателя к приемнику. На рисунке 4 показано исходное



сообщение, полученное на одной частоте, длительностью 6 мс без обработки. Такого рода сообщения принимаются приемником на фиксированной частоте. На рисунке 4 можно заметить отражение от ионосферы в виде двух М-последовательностей с частичным наложением во времени. Вторичное отражение от ионосферы просматривается слабо. На данной частоте наряду с сигналом принимается помеха.

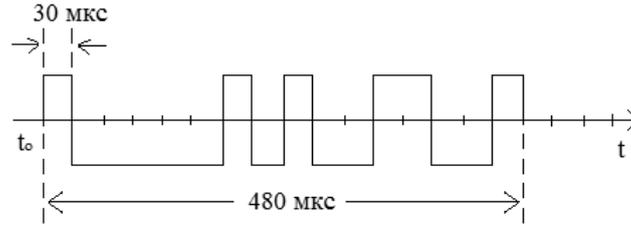


Рис. 2. М-последовательность радиоимпульсов

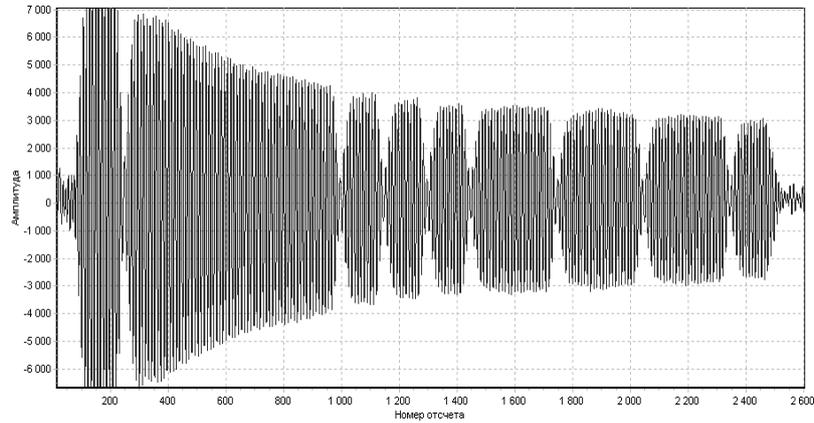


Рис. 3. Структура исходного сигнала – 16-позиционная М-последовательность

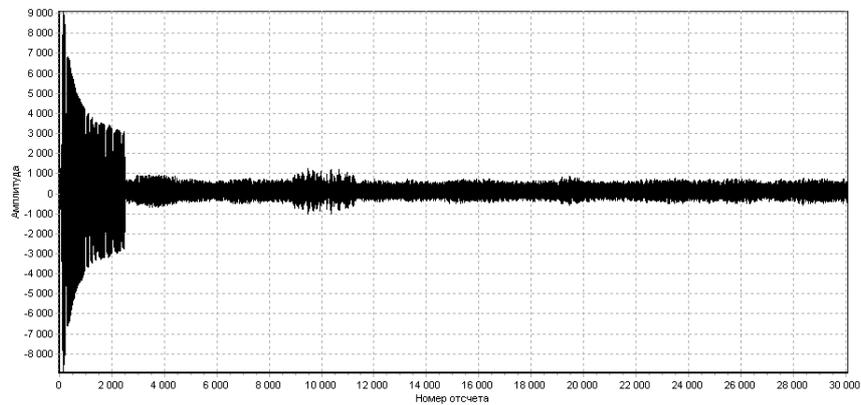


Рис. 4. Исходный сигнал, полученный на выходе приемника устройства вертикального зондирования ионосферы, без обработки



В результате корреляционной обработки (рис. 5) помеха практически исчезает. Корреляционная функция излученной М-последовательности с максимумом достигает значения  $\sim 1200$ . Через время  $\sim 2$  мс (расстояние 300 км) отмечается корреляционная функция отраженного от ионосферы сигнала. По амплитуде она приблизительно в 1000 раз слабее излученного сигнала. Если исходить из длительности корреляционной функции (более 800 мкс), она состоит из двух корреляционных функций с частичным наложением во времени. Вторичное отражение от ионосферы наблюдается через интервал времени  $\sim 4$  мс. Если разделить это время на 4 и учесть скорость электромагнитных волн, то получим ту же самую оценку расстояния —  $\sim 300$  км от земли до области отражения радиоволн. Амплитуда второго отражения от ионосферы не превышает  $\sim 10$ , т. е. ослабление составляет  $\sim 10$ .

65

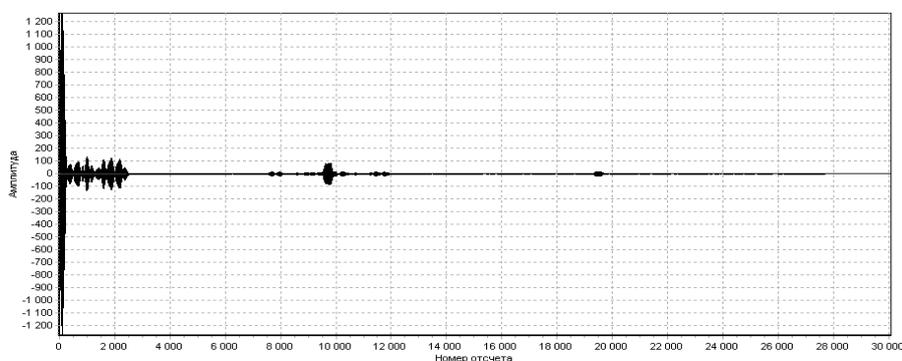


Рис. 5. Структура сигнала после корреляционной обработки

На рисунке 6 корреляционная функция при первом отражении от ионосферы показана в более крупном масштабе. Длительность основного максимума равна  $\sim 80$  мкс. Следовательно, временное запаздывание двух корреляционных функций будет  $\sim 20$  мкс. Если использовать для обработки метод максимального правдоподобия, то вполне можно разрешить эти две корреляционные функции, т. е. получить информацию о времени приема двух магнитоионных компонент, их амплитудах и фазах. При классической корреляционной обработке эти две М-последовательности не разрешаются.

При повышении частоты растет расстояние между областями отражения двух магнитоионных компонент в связи с приближением к критической частоте слоя ионосферы. В результате различие времени приема двух последовательностей становится больше. На рисунке 7 показана структура принятого сообщения без обработки. Шумовая составляющая хорошо просматривается. Однако отношение сигнал/шум имеет оценочное значение  $\sim 3$ . Отраженный от ионосферы сигнал содержит две М-последовательности с частичным наложением во времени.

После корреляционной обработки сообщения (рис. 8) шумовая составляющая не просматривается. Соотношение амплитуд излученного сигнала, сигналов при первом и втором отражениях от ионосферы сохраняется (соответственно 1000—100—10).

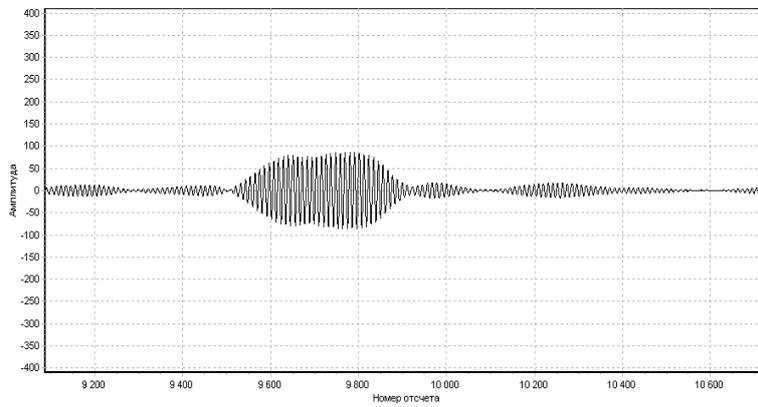


Рис. 6. Два отраженных от ионосферы сигнала после корреляционной обработки

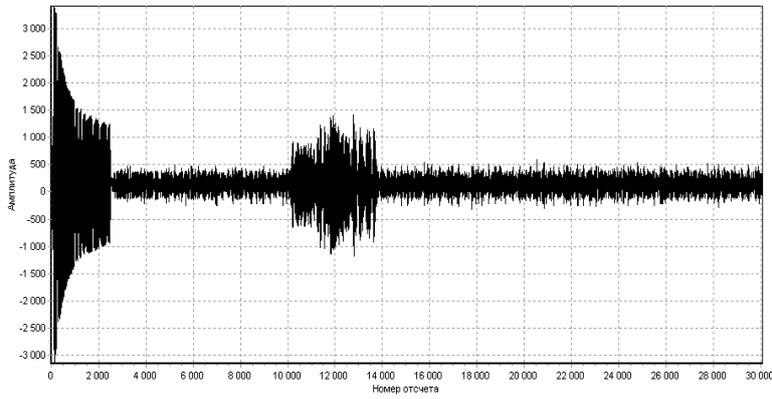


Рис. 7. Сигнал без обработки. Две М-последовательности с наложением во времени

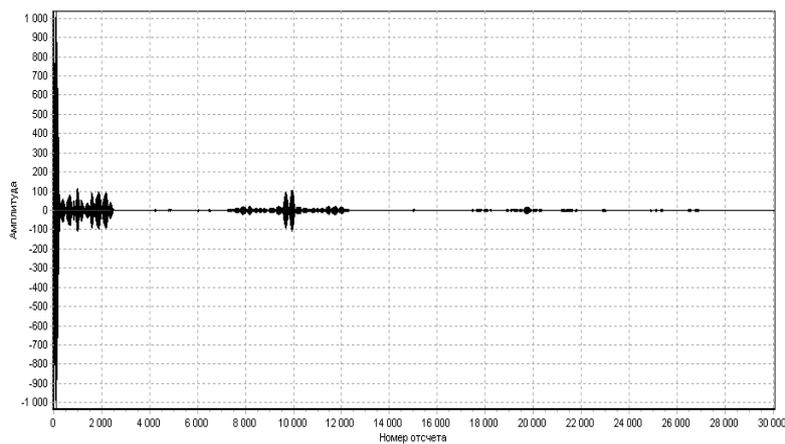


Рис. 8. Структура сигнала после корреляционной обработки



Два максимума корреляционных функций хорошо разделяются. Различие времени и приема последовательностей равно  $\sim 80$  мкс. Классическое разрешение по критерию Релея возможно, если разность времени приема более 60 мкс. При втором отражении от ионосферы отмечается лишь одна магнитоионная компонента. На рисунке 8 можно заметить отдельные точки на временной оси. Они не являются корреляционными сигналами и могут быть удалены. Каждое отражение от ионосферы должно иметь после обработки структуру корреляционной функции с максимумом и боковыми лепестками.

Это можно использовать для идентификации отражения от неоднородностей ионосферы, которые могут быть на фоне регулярных отражений. Следует отметить, что задача обнаружения сигнала после корреляционной обработки должна решаться с большой тщательностью и с учетом всей функции корреляции.

При приближении рабочей частоты к критической частоте слоя ионосферы (рис. 9) степень разрешения максимумов корреляционной функции увеличивается до 300 мкс. Амплитуда второй магнитоионной компоненты при первом отражении от ионосферы возрастает. Второе отражение от ионосферы практически незаметно.

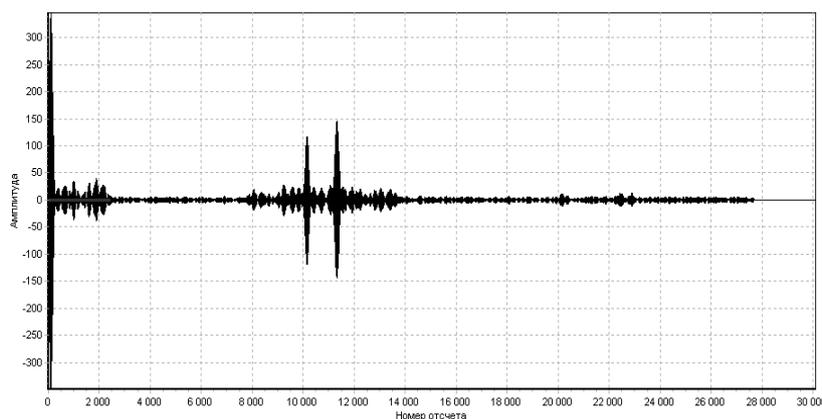


Рис. 9. Принятое сообщение после обработки

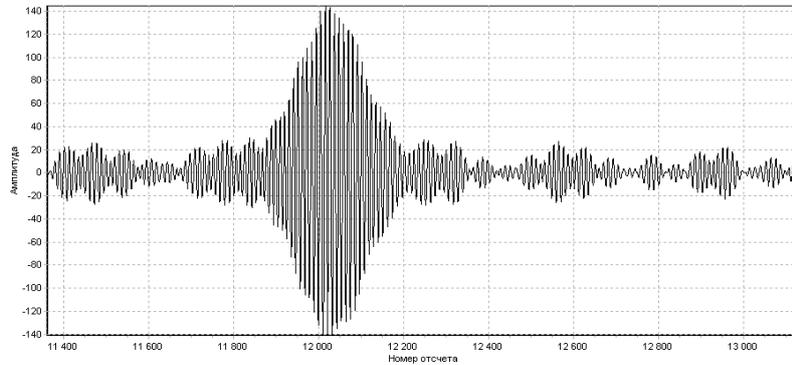
Вблизи критической частоты корреляционная функция одной магнитоионной компоненты уширяется. Так, на рисунке 10 показан первый максимум корреляционной функции одной М-последовательности. Вместо 60 мкс основание максимума имеет ширину 76 мкс. Это может быть связано или с наличием неоднородностей в области максимума ионосферы, или с уширением импульсов М-последовательностей вследствие сильной дисперсии.

Обработывая в целом принятые сообщения на совокупности частот, можно получить высотно-частотную ионограмму — зависимость отображения высот отражения от частоты.

При наличии радиостанций, работающих на отдельных частотах, возникают сильные помехи, которые не позволяют провести анализ отраженного сигнала. Корреляционная обработка уменьшает помеху. Однако выделение сигнала на фоне оставшейся части помехи оказыва-



ется сложным. Необходима дополнительная обработка адаптивным фильтром, который бы устранял помеху. В настоящее время пораженные помехой частоты исключают из рассмотрения.



68

Рис. 10. Частота вблизи критической частоты слоя

На рисунке 11 показана ионограмма, полученная в результате корреляционной обработки сложного сигнала. По вертикали отложена «кажущаяся» действующая высота области отражения в ионосфере. Она соответствует групповому пути радиоимпульса в ионосфере. Вблизи критической частоты групповая скорость радиоимпульса уменьшается. Это приводит к резкому возрастанию высоты отражения. На высоте 100 км просматривается «след» при отражении радиоимпульса от E – области ионосферы. Далее следует скачкообразное увеличение действующей высоты отражения за счет перехода области отражения к F<sub>2</sub> слою ионосферы. «След» от одной магнитоионной компоненты практически повторяет «след» от второй.

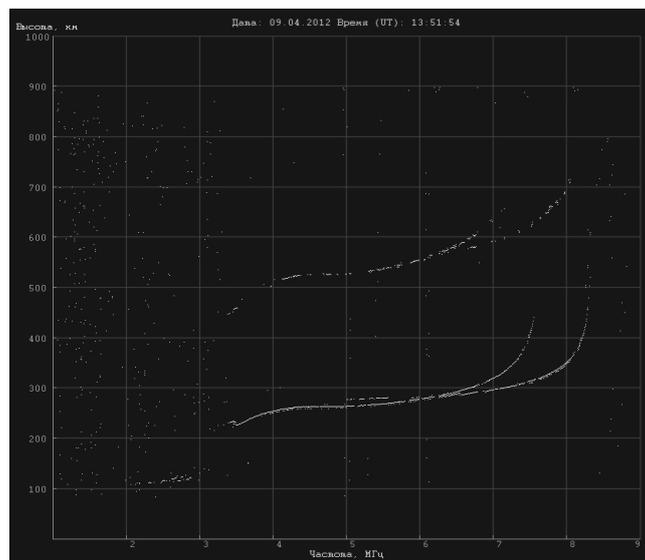


Рис. 11. Ионограммы вертикального зондирования ионосферы сложным сигналом



В средних широтах при вертикальном зондировании ионосферы распространение радиоволн происходит почти вдоль магнитного поля Земли (квазипродольное распространение). В этом случае показатель преломления для магнитоионных компонент определяется выражениями

$$n_{1,2}^2 = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega(\omega \pm \omega_{np})},$$

где  $\omega_0^2 = \sqrt{\frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m}}$ ;  $\omega_{np} = \frac{\mu_0 e H_{np}}{m}$  – продольная гирочастота.

Отражение обыкновенного луча идет от области на большей высоте по сравнению с высотой отражения необыкновенного луча. Обыкновенная волна представлена на ионограмме «следом», сдвинутым влево (рис. 11). «След» необыкновенной волны располагается правее.

По результатам анализа работы станции вертикального зондирования «Вектор» можно сделать следующий вывод: обработка сигналов при вертикальном зондировании может быть улучшена. Используя положения теории оптимального приема, можно решить задачу обнаружения сигнала, особенно при двукратном отражении от ионосферы, установив вероятность обнаружения отдельного импульса, отраженного от ионосферы. При этом возможно улучшение некоторых характеристик:

- 1) повышение точности оценки параметров сигнала (амплитуды, начальной фазы, времени приема);
- 2) увеличение разрешения двух отраженных от ионосферы радиопulses с частичными наложениями во времени;
- 3) поляризационное разрешение магнитоионных компонент;
- 4) увеличение отношения «сигнал – шум» за счет усреднения соседних данных при обработке;
- 5) создание адаптивного фильтра для фильтрации помех из принятого сообщения.

#### Список литературы

1. Авдюшин С.И. Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами. М., 2008.
2. Гинзбург В.Л. Теория распространения радиоволн в ионосфере // УФН. 1946. Т. 28, вып. 2–3.
3. Пахотин В.А., Бессонов В.А., Молостова С.В., Власова К.В. Теория оптимального приема. Калининград, 2007.
4. Райт У., Кнехт У., Дэвис К. Руководство по вертикальному зондированию. М., 1957.
5. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М., 1972.

#### Об авторах

Валентин Васильевич Мялковский – зам. начальника Инновационного дизайн-центра, Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи, Москва.  
E-mail: idc@niidar.ru

Ксения Валерьевна Власова – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, Калининград.  
E-mail: p\_ksenia@mail.ru



*В.В. Мялковский, К.В. Власова, Н.Л. Бузинский, В.А. Бессонов*

---

Николай Леонтиевич Бузинский — начальник бюро Инновационного дизайн-центра, Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи, Москва.  
E-mail: nikolai.nc@yandex.ru

Владимир Александрович Бессонов — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.  
E-mail: VBessonov@kantiana.ru

#### **About authors**

Valentin Myalkovsky — deputy head of innovative design center of NIIDAR, Moskov.  
E-mail: idc@niidar.ru

Ksenia Vlasova — PhD, ass. prof. of top BFFSA, Kaliningrad.  
E-mail: p\_ksenia@mail.ru

Nicholai Buzinsky, bureau chief of NIIDAR, Moskov.  
E-mail: nikolai.nc @ yandex.ru

Vladimir Bessonov — PhD, ass. prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.  
E-mail: VBessonov@kantiana.ru