

А.В. Бережной, В.Т. Поляков

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ДОПЛЕРОВСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Рассмотрены возможности регистрации кратковременных и незначительных ионосферных возмущений при наблюдении спектров несущих сигналов удаленных радиостанций. Показано, что могут быть обнаружены процессы с пространственными масштабами порядка длины волны наблюдаемого сигнала.

Ключевые слова: ионосфера, доплеровский метод, несущие радиостанций, масштабы неоднородностей.

A.V. Berezhnoj, V.T. Polyakov

THE LIMITING POSSIBILITIES
OF THE DOPPLER SOUNDING OF THE IONOSPHERE

The possibilities of recording short-term and minor ionospheric disturbances when observing the spectra of carrier signals of remote radio stations are considered. It is shown that processes with spatial scales of the order of the wavelength of the observed signal can be detected.

Keywords: ionosphere, Doppler method, carriers of radio stations, scales of inhomogeneities.

О состоянии ионосферы и о некоторых процессах, в ней происходящих, весьма удобно судить, используя пассивный метод, по доплеровским спектрам несущих сигналов удаленных радиостанций [1].

В настоящее время существуют компьютерные программы, позволяющие получить спектр сигнала в реальном времени (SpectraLab, Spectran, Argo и т.д.). Большинство программ осуществляет быстрое преобразование Фурье и работает лишь на низких частотах, до 10 ... 15 кГц, определяемых параметрами АЦП звуковой карты компьютера.

При приеме сигнала несущей частоты удаленной радиостанции доплеровским методом могут быть обнаружены вертикальные перемещения отражающего слоя. Для этого мы использовали компьютерную программу Spectran, выложенную в Интернет для общего пользования итальянскими радиолюбителями.

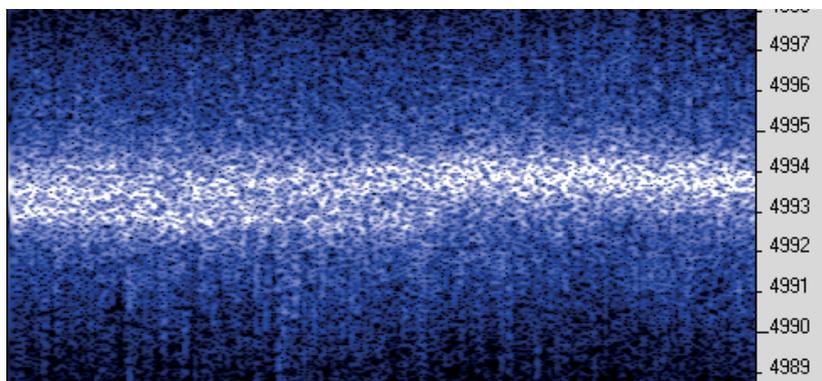
Для переноса спектра сигнала несущей удаленной радиостанции с ее номинальной частоты в КВ-диапазоне на низкую звуковую частоту, пригодную для работы компьютера, необходим радиоприемник, поддерживающий режимы CW (телеграф) и SSB (однополосная модуляция). Обычные бытовые радиовещательные приемники, поддерживающие только режим АМ (амплитудной модуляции), в этом случае непригодны.

Многие профессиональные и полупрофессиональные приемники также оказались непригодными из-за низкой частотной стабильности их гетеродинов [2]. Действительно, для отслеживания малых доплеровских изменений частоты принятого сигнала (порядка 0,1 Гц и менее) в КВ-диапазоне (частоты порядка 10^7 Гц) нужна относительная неста-

бильность частоты менее 10^{-8} . Она на два порядка меньше, чем необходимая при обычной радиосвязи. Радиовещательные станции имеют необходимую стабильность частоты, поскольку применяют эталоны в своих задающих генераторах. Использование эталонов частоты в радиоприемниках превращает аппаратуру для доплеровских ионосферных исследований в уникальную, дорогую и исключает ее широкое применение.

Попытка решения проблемы привела к разработке «метода биений» [3], в котором для получения низкочастотного сигнала используются биения между несущими двух соседних по частоте радиостанций. Метод открыл возможность использования простых бытовых АМ радиоприемников, даже детекторных [4]. Недостаток метода состоит в необходимости поиска пары подходящих станций с разносом частот 5 или 10 кГц, а также в том, что ионосферные возмущения сигналов на двух разных трассах наблюдаются одновременно.

Несмотря на указанные недостатки, метод позволил уверенно судить о состоянии ионосферы [5]. В качестве примера приведена спектрограмма биений сигналов двух дальневосточных радиостанций в диапазоне 40 м (рис. 1).



24 мая 2013. Начало 21:50, конец 22:20. Время заката в Москве. Настр. 7277.
7275 - KBS World Radio, 250 kW, 7280 - Voice of Vietnam, Hanoi, 100 kW.
Расстояние до обеих станций около 6700 км

Рис. 1. Спектрограмма сигнала биений от двух удаленных радиостанций

Длительность записи – полчаса, по горизонтали отложено время, по вертикали – частота биений. Если бы ионосферные искажения отсутствовали, на записи была бы горизонтальная прямая линия. В данном же случае ионосферные искажения велики, сигнал занимает полосу около 2 Гц и носит случайный характер. Создается впечатление, что он отражает не ионизированный слой, а отдельные глобулы или облака ионизированного газа, хаотически изменяющиеся во времени и перемещающиеся в пространстве.

Метод при выборе соответствующих трасс распространения сигнала позволил судить о включении нагретых стенов [6] и даже о локальных возмущениях ионосферы, вызванных запусками ракет [7]. На рисунке 2 показан фрагмент спектрограммы, записанный 28 августа 2015 г. Старт был в 14:44 МСК. Это время совпадает с началом фрагмента. На двух изображениях на рисунке 2 один и тот же кадр, но на правом обведено овалом возмущение ионосферы, произошедшее на 5-й минуте после старта.

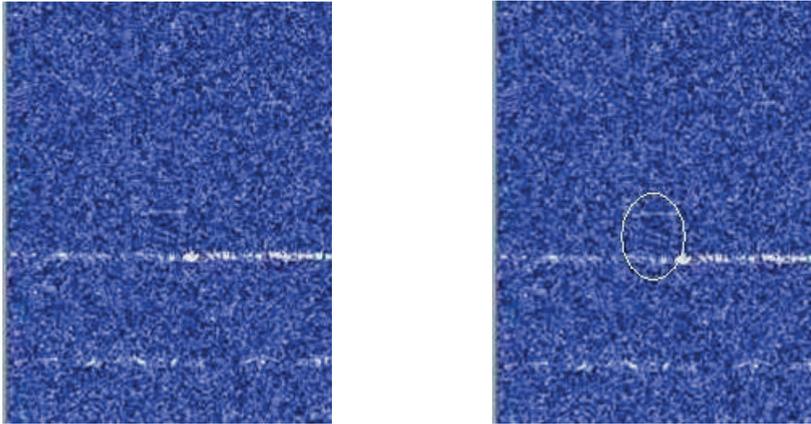


Рис. 2. Пример записи кратковременного ионосферного возмущения при старте ракеты «Протон» из Байконура. Прием двух китайских радиовещательных станций диапазона 16 м в Москве

Расчет показывает, что ракете нужно 3...4 минуты, чтобы достичь ионосферы, и еще минуты полторы, чтобы пройти сквозь нее. Возможно, верхняя горизонтальная линия длительностью около 1,5 минуты со сдвигом частоты около 2 Гц (скорость около 30 м/с) вызвана сносом основной струи выхлопа ракеты ионосферным ветром, а наклонные линии с уменьшающимся доплеровским сдвигом – отражениями сигнала от краев образовавшейся в ионосфере «дыры», расходящейся сначала быстро, а потом все медленнее.

Этот и ему подобные эксперименты показали большие перспективы [8] и необходимость теоретической оценки возможностей описанного доплеровского метода. Запишем величину доплеровского смещения частоты:

$$\Delta f = f_0 \frac{2V_{\text{слоя}}}{c} \cos \alpha, \tag{1}$$

где f_0 – несущая частота; $V_{\text{слоя}}$ – вертикальная компонента скорости отражающего слоя или точки; c – скорость света; α – угол между вертикалью и направлением падающего луча.

Особенность спектрального анализа состоит в том, что время наблюдения Δt и разрешающая способность по частоте Δf связаны соотношением

$$\Delta t \Delta f \geq 1. \tag{2}$$

Подставляя в это соотношение формулу (1), получаем

$$\frac{2V_{\text{слоя}}}{c} f_0 \cos \alpha \Delta t \geq 1. \tag{3}$$

Учитывая, что $\frac{c}{f_0} = \lambda$, где λ – длина волны, а $V_{\text{слоя}} \Delta t = \Delta S$, формулу (3) легко привести к следующему виду:

$$\Delta S \geq \frac{\lambda}{2 \cos \alpha}, \tag{4}$$

где ΔS – вертикальное перемещение отражающего слоя.

Формула (4) ясно показывает, что доплеровским методом могут быть обнаружены перемещения слоев порядка длины волны λ . Однако для реализации этой возможности необходимо правильно устанавливать время накопления данных (время наблюдения) и, соответственно, разрешающую способность программы спектроанализатора.

Литература

1. Крюков П.С., Поляков В.Т. Удаленный мониторинг прохождения радиоволн КВ-диапазона // Вестник Российского нового университета. 2014. № 4. С. 45.
2. Поляков В.Т. О стабильности частоты настройки телекоммуникационных приемников // Вестник Российского нового университета. 2014. № 4. С. 42.
3. Крюков П.С., Поляков В.Т. Метод биений в доплеровских ионосферных наблюдениях // Вестник Российского нового университета. 2014. № 4. С. 38.
4. Крюков П.С., Поляков В.Т. Детекторный прием на КВ и спектральный анализ сигналов // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 8. С. 44–50.
5. Крюков П.С., Поляков В.Т. Анализ состояния ионосферы и процессов в ее отражающих слоях по данным приема сигнала биений несущих вещательных КВ-станций // Вестник Российского нового университета. 2014. № 4. С. 34.
6. Крюков П.С., Поляков В.Т. Связь обширных ионосферных возмущений с работой нагревных стенов // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 8. С. 51–53.
7. Поляков В.Т. Детекторный видит пуски ракет! // CQ-QRP. 2016. № 53. URL: <http://qrp.ru/cqqr-magazine/1206-cq-qrp-53> (дата обращения: 18.05.2019).
8. Поляков В.Т. Методы и средства массового мониторинга ионосферы доплеровским методом // VII Всероссийские Армадовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: материалы Всероссийской научной конференции. Муром, 2017. С. 203–206.

Literatura

1. Kryukov P.S., Polyakov V.T. Udalennyj monitoring prokhozheniya radiovoln KV-diapazona // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. 2014. № 4. S. 45.
2. Polyakov V.T. O stabil'nosti chastoty nastrojki telekommunikatsionnykh priemnikov // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. 2014. № 4. S. 42.
3. Kryukov P.S., Polyakov V.T. Metod bienij v doplerovskikh ionosfernykh nablyudenyakh // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. 2014. № 4. S. 38.
4. Kryukov P.S., Polyakov V.T. Detektornyj priem na KV i spektral'nyj analiz signalov // Uspexi sovremennoj radioelektroniki. 2014. № 8. S. 44–50.
5. Kryukov P.S., Polyakov V.T. Analiz sostoyaniya ionosfery i protsessov v ee otrazhayushchikh sloyakh po dannym priema signala bienij nesushchikh veshchatel'nykh KV-stantsij // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. 2014. № 4. S. 34.
6. Kryukov P.S., Polyakov V.T. Svyaz' obshirnykh ionosfernykh vozmushchenij s rabotoj na-grevnykh stendov // Uspexi sovremennoj radioelektroniki. 2014. № 8. S. 51–53.
7. Polyakov V.T. Detektornyj vidit pусki raket! // CQ-QRP. 2016. № 53. URL: <http://qrp.ru/cqqr-magazine/1206-cq-qrp-53> (data obrashcheniya: 18.06.2019).
8. Polyakov V.T. Metody i sredstva massovogo monitoringa ionosfery doplerovskim metodom // VII Vserossijskie Armandovskie chteniya. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya, radiolokatsii, rasprostraneniya i difraktsii voln: materialy Vserossijskoj nauchnoj konferentsii. Murom, 2017. S. 203–206.