

П.С. Крюков<sup>1</sup>  
В.Т. Поляков<sup>2</sup>

P.S. Kryukov  
V.T. Polyakov

## МЕТОД БИЕНИЙ В ДОПЛЕРОВСКИХ ИОНОСФЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ

## METHOD OF BEATS IN DOPPLER IONOSPHERIC OBSERVATIONS

*В статье предложен метод выделения частот биений между несущими соседних по частоте вещательных станций, имеющих высокую стабильность частоты и работающих на строго определенных частотах в соответствии с сеткой КВ-вещания 5 кГц. Метод радикально упрощает и удешевляет технику приема.*

**Ключевые слова:** метод доплеровского радиозондирования ионосферы, биения, КВ, вещательные станции, стабильность частоты.

*We propose a method for extracting the beat frequency between adjacent carrier frequency broadcast stations already having high frequency stability and working at certain frequencies in accordance with the HF broadcasting grid 5 kHz. Method dramatically simplifies and reduces the cost of receiving technique.*

**Keywords:** method of Doppler radio sounding of the ionosphere, beats, HF, broadcast stations, frequency stability.

Широко известен метод доплеровского радиозондирования ионосферы. Его суть в том, что спектр принимаемого сигнала от удаленной радиостанции переносится приёмником в область низких частот, и затем анализируется компьютерной программой. Преимуществами метода являются высокая чувствительность к малым изменениям частоты, вызванных движением отражающих слоев и, как следствие этого, высокое разрешение, сравнительная простота и дешевизна аппаратных решений, возможность организации непрерывных наблюдений. Выбор определенных вещательных станций или маяков с известным местоположением позволяет отслеживать состояние трассы между приёмником и передатчиком, выявляя различные процессы в ионосфере, такие, как турбулентность, многолучевое распространение, гравитационные волны, перемещения и возмущения слоев.

Доплеровский метод предполагает получение спектрограмм несущей частоты сигнала. Особенно подходят для этой цели несущие радио-

вещательных станций. При использовании современной техники и специальных программ возможна частичная или полная автоматизация.

Получение спектрограмм возможно на экспериментальной установке, отвечающей минимальным требованиям, т.е. содержащей КВ-приёмник, работающий в диапазоне 0,7...30 МГц и имеющий функцию приёма одной боковой полосы (SSB) и персональный компьютер (ПК) со звуковой картой, работающей в диапазоне звуковых частот от 20 Гц до 20 кГц. В порядке эксперимента приёмник настраивался на сигнал удалённой (1500...2500 км) АМ радиостанции, при помощи функции SSB выделялся сигнал несущей частоты, регистрируемый с точностью не хуже единиц герц. Далее, поступая на ПК через звуковую карту, сигнал с помощью специального ПО (программа «Спектран») преобразовывался в «водопад», графически отображающий спектр сигнала и происходящие с ним процессы (размытие, смещение по частоте, и прочее). Графическое представление позволяет наглядно оценивать и анализировать состояние участка ионосферы между приёмником и передатчиком. Возможно архивирование спектрограмм.

Рассмотрим более подробно процесс обра-

<sup>1</sup> Аспирант НОУ ВПО «Российский новый университет».

<sup>2</sup> Кандидат технических наук, профессор НОУ ВПО «Российский новый университет».

ботки и преобразования и фильтрации сигнала в типовом коротковолновом (КВ) приёмнике, предназначенном для демодуляции однополосных (SSB) сигналов, применяющихся почти исключительно в служебной и любительской КВ-радиосвязи.

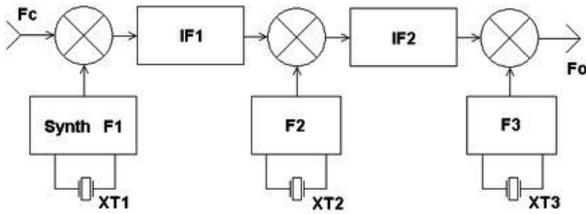


Рис. 1. Типовая схема коротковолнового SSB приёмника

Типовая схема коротковолнового SSB приёмника показана на (рис. 1). Сигнал от антенны с частотой  $F_c$  поступает на вход первого смесителя (перемножителя) сигналов (смесители обозначены кружками с косым крестом). На другой его вход подается сигнал перестраиваемого гетеродина, или синтезатора частоты  $IF_1$ . На выходе первого смесителя образуется сигнал первой ПЧ  $IF_1$ . В современных приёмниках ее обычно выбирают выше максимальной частоты принимаемого диапазона, т.е. выше 30 МГц, что сужает диапазон перестройки первого гетеродина и позволяет обойтись минимальной фильтрацией на входе приёмника. Первое преобразование частоты происходит по закону  $IF_1 = F_1 - F_c$ . Обычно значение  $IF_1$  выбирают в диапазоне 50...90 МГц. Фильтры первой ПЧ  $IF_1$  позволяют лишь подавить зеркальную частоту второго преобразователя. Частотный план сигналов в приёмнике показан на (рис. 2).

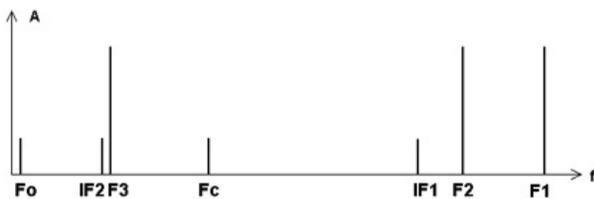


Рис. 2. Частотный план сигналов в приёмнике

Второй преобразователь с кварцевым гетеродином  $F_2$  переносит сигнал с фиксированной  $IF_1$  (высокой) на также фиксированную  $IF_2$  (низкую, обычно 450...500 кГц) по закону  $IF_2 = F_1 - IF_1$ . Здесь происходит основная фильтрация и усиление сигнала. После тракта второй ПЧ может быть установлен детектор АМ для приема радио-

вещательных станций, либо третий преобразователь частоты с кварцевым гетеродином  $F_3$  для переноса спектра сигнала в область звуковых частот  $F_0$  при приеме SSB или телеграфных (CW) сигналов. Именно этот режим и используют при наблюдении доплеровских спектров, поскольку программы для ПК и их звуковые карты рассчитаны для работы на низких частотах.

Главным препятствием для широкого использования стандартных супергетеродинных КВ-приёмников, подобных описанному выше, для наблюдения и регистрации доплеровских спектров явилась низкая стабильность их гетеродинов. Действительно, изменение частоты любого из гетеродинов (или всех) на  $dF$  немедленно приводит к такому же изменению выходной (регистрируемой) частоты  $F_0$ . Вот, например, как выглядит спектрограмма сигнала (рис. 3) при приеме профессиональным аппаратом IC-706МКII. Изменения частоты на 3,5 Гц с периодом около 5 минут, совсем не воспринимаемые на слух, совершенно портят спектрограмму. Как оказалось, флуктуации частоты  $F_0 = 1522$  Гц вызваны работой вентилятора, охлаждающего микропроцессор синтезатора частоты!

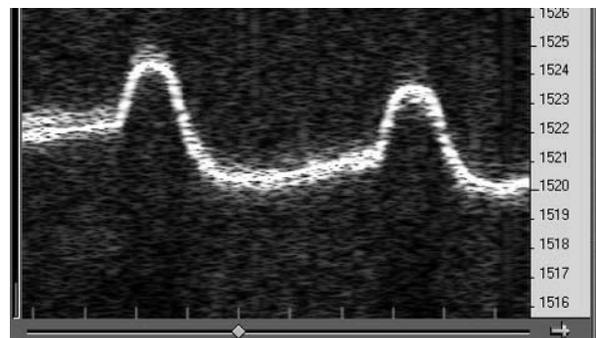


Рис. 3. Спектрограмма сигнала станции TWR Europe (Науэн, Германия, 100 кВт, 1634 км от Москвы), приёмник ICOM IC-706МКII, антенна Vertical – 5,4 м, частота сигнала – 7215 кГц, 08:45 UTC, 12:45 LT

Поиск путей решения проблемы привел к идее вообще отказаться от использования стабильных опорных частот в приёмнике. Мысль, напросившаяся сама собой, состоит в использовании несущих радиостанций. Они расположены в соответствии со строгой сеткой вещания  $\times 5$  ГГц, и их частота по ГОСТ должна устанавливаться с точностью не хуже  $\pm 10$  Гц. Стабильность частоты радиовещательных КВ-станций лучше  $10^{-8}$ , что составляет менее 1 Гц на 100 МГц! Следовательно, дрейф частоты принимаемого сигнала на частотах 2...30 МГц может составлять от 0,02 до 0,3 Гц в худшем случае. Доплеровское смещение, вызываемое движени-

ем ионосферы, даже на одном скачке может быть намного больше. Итак, эталоны уже в эфире!

Спектран можно программно настроить на частоту биений между несущими радиостанций 5 или 10 кГц. Частота выборок должна быть, по крайней мере, вдвое выше частоты биений. В Спектроне есть частоты выборок 11025 и 22050 Гц. Максимальное разрешение при этом – 0,042 и 0,084 Гц. Как показала практика, сетка частот радиовещательных станций на КВ с шагом 5 кГц соблюдается не слишком строго, и приходилось наблюдать частоты биений от 4950 до 5050 Гц. Чаще всего – в районе 4975 Гц, и это заставляет усомниться в точности установки частот в самом Спектроне (должно бы быть 5000 Гц).

Приёмник должен иметь АМ детектор и полюсу пропускания не менее 5 кГц. Настраивать его надо примерно посередине между несущими станций или с некоторым сдвигом настройки в сторону более слабой станции. Телеграфный гетеродин вообще не нужен – для выделения биений приёмник включают в режим АМ. Теперь стабильность его гетеродинов не имеет значения, ведь частота биений определяется исключительно частотами двух соседних радиостанций. Открылась потрясающая возможность использовать для ионосферных исследований любые дешёвые приёмники, включая китайские с верёвочным верньером и без цифровой шкалы!

Процесс образования биений двух сигналов в амплитудном (АМ) детекторе общеизвестен, тем не менее, проследим за происходящим процессом. Пусть на входе детектора действует сумма сигналов:

$$S(t) = u_{\text{вх}} = a_1 \cos(\omega_1 t) + a_2 \cos(\omega_2 t).$$

Вольтамперную характеристику (ВАХ) диодов детектора представим степенным рядом для вычисления тока через диод  $I_0$ :

$$I_0 = Su_{\text{вх}} + Tu_{\text{вх}}^2 + \dots,$$

где  $S$  – крутизна ВАХ;

$T$  – её кривизна.

Подставляя  $S(t)$ , получаем, что за эффект детектирования, т.е. выделение постоянной составляющей сигнала, отвечает лишь кривизна ВАХ  $T$ , в то время как крутизна  $S$  отвечает лишь за нагрузку детектором предыдущих каскадов, поскольку  $\frac{1}{S}$  соответствует сопротивлению диода в рабочей точке. Выписывая компоненты постоянного тока и низких частот, содержащиеся в токе детектора (высокочастотные компоненты отфильтровываются на выходе детектора), имеем:

$$I_0 = \left(\frac{1}{2}\right)T(a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t).$$

Последний член как раз и является сигналом биений между несущими радиостанций с частотой 5, 10 или (реже) 15 кГц. Видим, что частота биений  $(\omega_1 - \omega_2)$  зависит только от собственных частот радиостанций и совершенно не зависит от частоты настройки гетеродинов приёмника.

Конечно, желательно, чтобы одна из станций была местной, тогда её сигнал будет чистым и не искажённым ионосферой. К сожалению, такое бывает редко. В случае же двух дальних станций Спектран регистрирует суммарный доплеровский сдвиг обоих сигналов, и суммарное уширение их спектров. Сигналы ведь приходят из разных мест разными путями, и их искажения в ионосфере не одинаковы, поэтому они суть независимые случайные величины. Частотный план сигналов показан на (рис. 4).



Рис. 4. Частотный план сигналов

Первые же опыты дали замечательный результат. В качестве примера на (рис. 5) показан спектр сигнала биений (спектрограмма) между несущими двух дальних радиостанций в диапазоне 41 м. Использовался тот же IC-706, но в режиме АМ, с шириной полосы пропускания более 10 кГц.

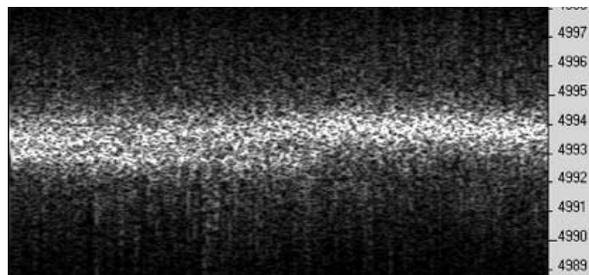


Рис. 5. Спектрограмма биения 7277 кГц 24.05.13. Начало 21:50, конец 22:20. Время заката в Москве. Метки минутные. 7275 – KBS World Radio, 250kW, 7280 – Voice of Vietnam, Hanoi, 100kW. Расстояние до обеих станций около 6700 км

Видно значительное уширение спектра, вызванное турбулентностями в ионосфере, наличие нескольких треков, характерное для многолучевого распространения и «длинная ионосферная волна» с периодом больше длительности кадра (полчаса).

### Литература

1. Крюков П.С., Поляков В.Т. Попытка создания портативной приемной КВ-установки

для доплеровских ионосферных исследований // Цивилизация знаний: труды XIV Международной конференции, г. Москва, 26–27 апреля, 2013. – М. : РосНОУ, 2013.

2. Поляков В.Т. Доплеровские ионосферные наблюдения [Электронный ресурс] // CQ-QRP 2013 № 43. – URL: <http://qrp.ru/files/literature/category/15-cqqrq?download=290%3Acq-qrp-43> (дата обращения 03.05.2014).