

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАДИОМЕТЕОРНАЯ УСТАНОВКА
ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДИНАМИКИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА ВЫСОТАХ
80 – 105 КМ ПО СИГНАЛАМ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ
НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОГО РАДИО**

Введение

Современные задачи исследования мезомасштабной структуры динамических процессов на высотах метеорной зоны атмосферы Земли (80 – 105 км) требуют наличия сети из радиометеорных наблюдательных пунктов с расстоянием между узлами в сотни километров [1]. Отчасти такие исследования могут быть выполнены по данным сети «пассивных» метеорных РЛС, использующих в качестве зондирующих присутствующие в эфире радиосигналы диапазона 30 – 100 МГц, например сигналы телевизионного вещания (СТВ) I – III радиоканалов [2 – 5] (номинальные значения частот несущих радиосигналов видеоизображения составляют 49,75; 59,25; 77,25 МГц). Отказ от собственного передающего устройства в этих системах позволяет значительно уменьшить себестоимость проведения радиометеорных исследований. Существенным преимуществом СТВ по сравнению с другими доступными радиосигналами является их большая энергия (мощность телевизионных передатчиков, ТВ РПУ, составляет десятки – сотни киловатт) и высокая стабильность частоты несущей, не меньше единиц герц на интервалах времени, равных среднестатистической длительности отраженных от метеорных следов сигналов (0,1 с) [3 – 5].

Для оценки среднечасовой скорости ветра, осредненной по всей толще метеорной зоны, каждый приемный пункт такой сети должен обеспечить:

1) обнаружение СТВ, отраженных от метеорных следов, в условиях реальной помеховой обстановки. Как было получено ранее в ходе экспериментальных исследований, уровень отраженных радиосигналов составляет единицы микровольт [3 – 5], полоса частот, в которой выполняется обнаружение: не менее 32 кГц относительно рабочих значений частот телевизионных радиопередатчиков, излучающих принимаемые сигналы (для идентификации отраженных СТВ необходимо, чтобы помимо сигнала несущей принималась также как минимум одна пара боковых гармоник строчных синхронизирующих импульсов (ССИ), имеющих частоту повторения 15,625 кГц);

2) анализ спектра отраженных радиосигналов на временных интервалах, равных их длительности (сотни миллисекунд – единицы секунд) и оценку доплеровского сдвига частоты (ДСЧ) несущей, вызванного дрейфом метеорного следа под действием ветровых движений нейтральных воздушных масс. Результаты предыдущих работ по моделированию и экспериментальному исследованию данного способа оценки скорости ветра показывают, что величины ДСЧ сигналов, отраженных от метеорных следов, составляют по модулю не более 100 Гц [3]. Также в данных работах показано, что для получения оценок амплитуд и фаз полусуточных приливных колебаний среднечасовой скорости ветра с погрешностью в 10 %, среднеквадратическое отклонение погрешности оценки ДСЧ должно составлять единицы герц (2 Гц) [4 – 6].

Как показывают полученные ранее экспериментальные результаты [3 – 5], помеховая обстановка, в условиях которой необходимо осуществлять прием и обработку отраженных сигналов, характеризуется:

1) наличием сигналов-помех, уровни которых на 40 – 60 дБ превышают уровни отраженных сигналов. При этом центральные частоты сигналов-помех отстоят от несущих отраженных сигналов менее чем на 1/3 октавы, их спектры часто имеют структуру, схожую со

спектром отраженного сигнала (например, в случае, когда в качестве помехи выступает сигнал станции радио- или телевизионного вещания соседнего радиоканала);

2) наличием импульсных широкополосных помех, длительность которых сравнима с временем существования метеорного следа, а уровень (в пределах полосы пропускания радиоприемного устройства, РПрУ) превосходит ожидаемые уровни отраженных сигналов;

3) прохождением СТВ от выбранного телевизионного радиопередатчика за счет механизмов дифракции вокруг сферической поверхности Земли и ионосферного рассеяния [7, 8] (далее «ионосферно-земные сигналы»). Уровень таких сигналов иногда сравним с уровнем сигналов, отраженных от метеорных следов.

Процесс распознавания и измерения параметров отраженных от метеорных следов сигналов (в том числе и оценку величины ДСЧ) удобно реализовать методами цифровой обработки. Исходными данными для такой обработки являются отсчеты принимаемого сигнала, полученные в результате его аналого-цифрового преобразования непосредственно на радиочастоте, либо после переноса спектра на промежуточную частоту РПрУ. Так, например, в [2 – 5] предлагается использовать РПрУ супергетеродинного типа с промежуточной частотой в 6,5 МГц.

Стоимость устройств накопления отсчетов принимаемых сигналов и их обработки определяется частотой дискретизации и разрядностью используемого аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В связи с этим видится рациональным построение РПрУ по схеме программно-определяемого (SDR) приемника прямого преобразования с выделением реальной I и мнимой Q компонент комплексной огибающей принимаемого радиосигнала [9, 10]. Из-за того, что требуемая частота дискретизации сигналов I и Q компонент равна полосе радиосигнала (в данной задаче не менее 32 кГц) и не зависит от величины его несущей частоты, в качестве АЦП для I и Q компонент может быть использована звуковая карта (ЗК) типовой офисной ЭВМ. Благодаря этому задача аналого-цифрового преобразования и обработки принимаемых радиосигналов потенциально может быть решена средствами вычислительной техники общего применения, без привлечения специализированных дорогостоящих устройств оцифровки, работающих с частотами дискретизации в десятки–сотни мегагерц и имеющих стоимость в несколько тысяч долларов США.

Описание экспериментальной установки для радиометеорного мониторинга динамики атмосферы Земли по сигналам телевизионного вещания

На рис. 1 приведена структурная схема экспериментальной установки, предназначенной для отработки технических решений, связанных с мониторингом динамики атмосферы Земли по СТВ. Данная установка представляет собой результат совершенствования аналогичного экспериментального оборудования [3 – 5] с целью минимизации его себестоимости.

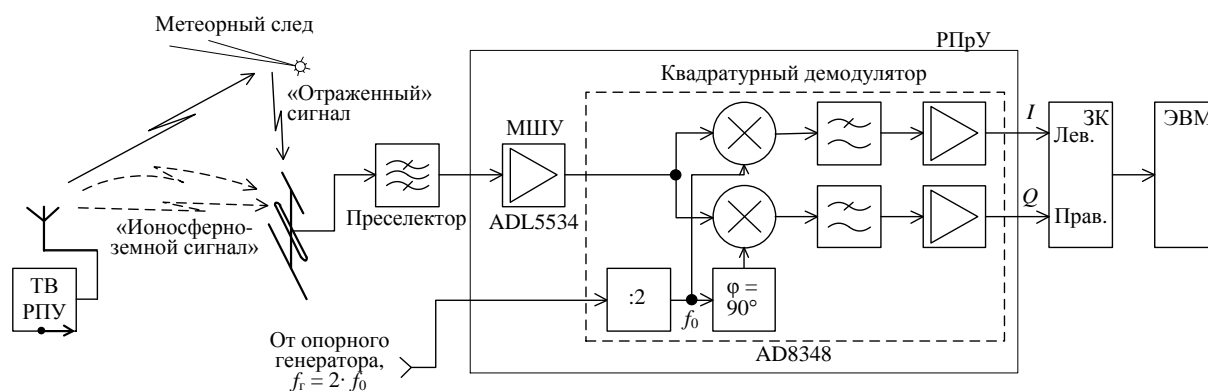


Рис. 1

Для защиты радиоприемного устройства от забития [11] мощными радиосигналами от окрестных радиостанций, работающих на соседних частотах, в качестве преселектора в

экспериментальной установке используется пятизвеневой полосовой фильтр на спиральных резонаторах [12]. Основные характеристики преселектора:

- частота настройки: 59,25 МГц;
- полоса пропускания: 0,4 МГц;
- полоса подавления: начиная с $\pm 2,75$ МГц относительно частоты настройки;
- ослабление в полосе подавления: не менее 60 дБ.

Радиоприемное устройство построено на базе интегрального малошумящего 20 дБ – усилителя ADL5534 [13] и квадратурного демодулятора AD8348 [14]. За счет применения малошумящего усилителя величина пороговой чувствительности установки (приведенная ко входу преселектора с сопротивлением 50 Ом) составляет -115 дБВ или -130 дБВ в полосе 100 кГц или 100 Гц соответственно.

Квадратурный демодулятор обеспечивает:

- выделение I и Q компонент комплексной огибающей принимаемого радиосигнала. Формирование квадратурных гетеродинных напряжений выполняется встроенными в интегральную микросхему средствами из сигнала от опорного генератора;

- усиление сигналов I и Q компонент на 40 дБ.

Вносимые демодулятором фазовые и амплитудные ошибки в выделенные I и Q компоненты принимаемого сигнала составляют $0,5^\circ$ и 0,25 дБ соответственно [14].

Сигналы I и Q с выхода РПрУ подаются через буферные усилители на левый и правый каналы звуковой карты Creative Labs SB0490. Звуковая карта обеспечивает:

- ограничение полосы сигналов I и Q компонент до 48 кГц;
- синхронное аналого-цифровое преобразование сигналов I и Q компонент с частотой дискретизации 96 кГц и разрядностью 24 бита;
- передачу отсчетов оцифрованных сигналов на ЭВМ для сохранения и дальнейшей обработки.

Погрешность оценки частоты спектральных компонент в радиочастотном спектре принимаемого сигнала определяется:

- 1) длительностью отраженного сигнала [15, 16];
- 2) величинами нестабильности генераторов гетеродинного напряжения установки и тактирования АЦП звуковой карты (частота тактирования АЦП используемой звуковой карты составляет 6 МГц) [16];
- 3) временем непрерывного накопления отсчетов «отраженного» радиосигнала или его длительностью [15, 16];
- 4) используемым алгоритмом получения спектра [17, 18];
- 5) соотношением сигнал/помеха [17, 18].

Для проведения испытаний установки, в целях минимизации материальных затрат на оборудование, в качестве источника сигнала гетеродинного напряжения использовался генератор сигналов высокочастотный Г4-107. Нестабильность данного генератора составляет $\pm 150 \cdot 10^{-6}$ на временном интервале в 15 мин (т. е. 9 кГц при настройке приемника на 60 МГц). Информация о нестабильности генератора на меньших временных интервалах отсутствует (в том числе на временном интервале в десятые доли секунды, что соответствует среднестатистической длительности сигнала, отраженного от метеорного следа). Однако, как будет показано в ходе экспериментальных исследований, величина этой нестабильности не препятствует выявлению ДСЧ отраженных сигналов.

Дрейф частот опорного генератора и тактирования АЦП ЗК, вызванный их нестабильностью на временных интервалах более десятых долей секунды, компенсировался за счет приема ионосферно-земных сигналов от используемых ТВ РПУ. Для этого ДСЧ сигнала, отраженного от метеорного следа, определялся как разность одновременно принимаемых компонент отраженного сигнала и ионосферно-земного сигнала.

Следует отметить, что в случае отсутствия возможности приема ионосферно-земных сигналов, значительно ужесточаются требования к источнику гетеродинного напряжения.

В этом случае его нестабильность должна быть не хуже 10^{-8} на временных интервалах более сотен миллисекунд, что позволит оценивать ДСЧ как разность между величиной несущей частоты отраженного сигнала и номинальной рабочей частотой ТВ РПУ – источника отраженного сигнала [4, 5].

При проведении испытаний экспериментальной установки частота опорного генератора (f_z) задавалась исходя из следующих соображений:

1) согласно техническим требованиям по использованию микросхемы AD8348 [14]:

$$f_z = 2 \cdot f_0,$$

где f_0 – величина центральной частоты принимаемого радиосигнала;

2) для обеспечения того чтобы в полосу частот, анализируемую установкой, попадали несущие и как минимум две боковые компоненты ССИ каждого используемого СТВ:

$$f_0 - (f_{0\text{ ТВ РПУ}} \pm f_{\text{ССИ}}) < f_{\text{сзк}},$$

где $f_{0\text{ ТВ РПУ}}$ – рабочая частота ТВ РПУ, сигнал которого используется в качестве зондирующего; $f_{\text{ССИ}}$ – частота строчных синхронизирующих импульсов (ССИ), $f_{\text{ССИ}} = 15625$ Гц;

3) для обеспечения того, чтобы ни одна из несущих частот сигналов не попадала после квадратурной демодуляции на постоянную составляющую, которая впоследствии фильтруется входными цепями звуковой карты:

$$f_0 \neq f_{0\text{ ТВ РПУ}},$$

отстройка величины f_0 от $f_{0\text{ ТВ РПУ}}$, должна составлять не менее 20 Гц.

Результаты испытаний экспериментальной установки

Испытания экспериментальной установки (рис. 1) были выполнены в период с октября по декабрь 2013 г.

Для наблюдения за радиометеорами выбран диапазон частот второго телевизионного радиоканала (номинальная величина несущей частоты сигнала видеоизображения $f_{0\text{ II ном}} = 59,25$ МГц) [4, 5, 19]. Такой выбор обусловлен тем, что в г. Харьков и Харьковской области отсутствует телевизионное вещание на частотах II радиоканала. Этим исключается «забитие» отраженных от метеорных следов сигналов сигналами прямого прохождения с явно преобладающим уровнем (на 40 дБ и более). Ближайшие ТВ РПУ, вещающие в выбранном диапазоне частот и имеющие мощность $P_{\text{изл}}$ более 20 кВт, расположены в г. Старый Оскол ($f_{0\text{ СтОск}} = f_{0\text{ II ном}} - 10,4$ кГц = 59,239583 МГц, $P_{\text{изл}} = 20$ кВт), г. Брянск, г. Борисоглебск ($f_{0\text{ БрБо}} = f_{0\text{ II ном}} + 10,4$ кГц = 59,260417 МГц, $P_{\text{изл}} = 36$ и 40 кВт), г. Киев ($f_{0\text{ К}} = f_{0\text{ II ном}}$, $P_{\text{изл}} = 340$ кВт). Перечисленные ТВ РПУ находятся на расстояниях 173, 380, 436, 414 км соответственно. Все перечисленные ТВ РПУ, за исключением ТВ РПУ в г. Борисоглебск, излучают сигнал горизонтальной поляризации. Поляризация сигнала ТВ РПУ г. Борисоглебск – вертикальная [20].

Расположение приемной антенны установки выбиралось так, чтобы:

1) был возможен прием сигналов, отраженных от метеорных следов в области над местом размещения антенны [2, 4, 5]. Для этого максимум диаграммы направленности антенны ориентировался вертикально вверх, Е-плоскость антенны располагалась так, чтобы она совпадала с поляризацией отраженных СТВ. Так, в частности, для проведения измерений, Е-плоскость антенны располагалась в меридиональной плоскости, поскольку наиболее вероятные источники зондирующего сигнала (ТВ РПУ г. Киев и г. Старый Оскол [19, 20]) имеют горизонтальную поляризацию и расположены на Западе и Северо-Востоке относительно места установки антенны;

2) был возможен прием ионосферно-земных сигналов от используемых ТВ РПУ. Для этого антенна располагалась так, чтобы свести к минимуму экранирующее влияние строений на распространение данного класса сигналов (на крыше девятиэтажного дома (50°01'N, 36°22'E г. Харьков), все остальные устройства, входящие в состав экспериментальной уста-

новки, размещались на седьмом этаже того же дома и соединялись с антенной фидерной линией длиной в 50 м).

В ходе испытаний использовалась приемная антенна типа III-элементный волновой канал. Частота настройки антенны: 59,25 МГц ($f_{0_II_ном}$), коэффициент усиления антенны: 6 дБ, ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ: 140° в Н-плоскости и 80° в Е-плоскости.

Накопление и обработка отсчетов принимаемых сигналов, полученных в ходе испытаний, выполнялись следующим образом:

1. Накопление отсчетов комплексной огибающей принимаемого радиосигнала фрагментами по 1-2 часа с помощью звукового редактора «Cool Edit Pro». Сохранение выполнялось в виде стерео файла формата Windows PCM (WAV). Частота дискретизации составляла 96 кГц, разрядность 16 бит, сигналы I и Q компонент комплексной огибающей принимаемого сигнала записывались в левый и правый каналы звукового файла соответственно;

2. Выявление по накопленным отсчетам комплексной огибающей компонент спектра, соответствующих несущим частотам ионосферно-земных сигналов от используемых ТВ РПУ;

3. Просмотр спектрограмм комплексной огибающей в узкой (1 кГц) полосе относительно выявленных несущих частот ионосферно-земных сигналов и обнаружение кратковременных «всплесков», которые могут соответствовать сигналам, отраженным от метеорных следов;

4. Анализ спектрограмм комплексной огибающей обнаруженных «всплесков» и их амплитудно-временных характеристик. Идентификация этих «всплесков» как СТВ, отраженных от метеорных следов, или же отнесение их к помехам.

Пункты 2 – 4 приведенного плана обработки выполнялись в пакете программ MatLAB R2009a.

На рис. 2 приведен типовой вид спектра комплексной огибающей принимаемого сигнала, построенный по сохраненным в WAV-файле отсчетам его I и Q компонент на временном окне в 10 с. За счет того, что длительность временного окна много более времени существования метеорного следа (0,1 с), приведенный рисунок позволяет оценить спектр сигнала, на фоне которого выполняется обнаружение СТВ, отраженных от метеорных следов. На данном рисунке штриховкой выделена полоса частот, в которой впоследствии были выявлены сигналы несущих частот отраженных СТВ.

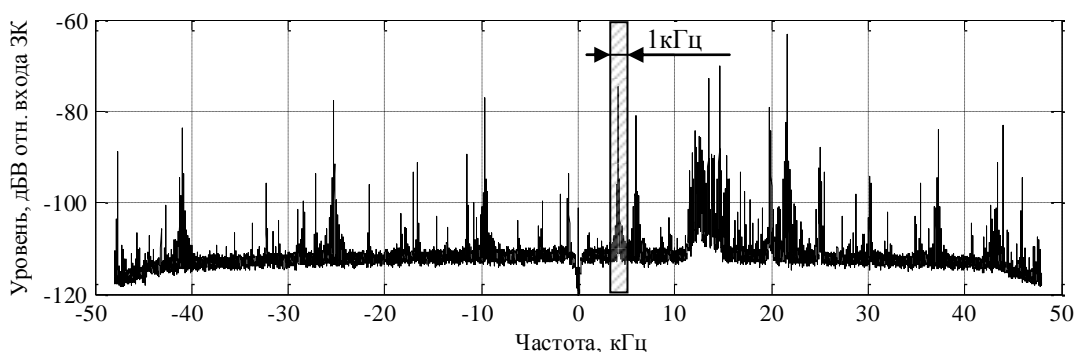


Рис. 2

Спектр сигнала, представленный на рис. 2, обнаруживает ряд максимумов, соответствующих:

- 1) несущим частотам ионосферно-земных сигналов от различных ТВ РПУ;
- 2) боковым компонентам этих сигналов, отстоящих от несущих на величины, кратные частотам кадровых и строчных синхронизирующих импульсов (КСИ и ССИ);
- 3) компонентам различных сигналов помех.

Из-за использования в установке в качестве источника гетеродинного напряжения генератора Г4-107 с низкими показателями нестабильности и погрешности установки частоты (см. предыдущий раздел), возникают сложности с выделением в получаемом спектре компонент, соответствующих несущим частотам ионосферно-земных сигналов от используемых ТВ РПУ. Абсолютные значения частоты каждой компоненты спектра могут быть определены только с погрешностью в единицы – десятки килогерц, чего недостаточно для идентификации максимума спектра как сигнала несущей исключительно по критерию равенства его частоты одной из номинальных величин рабочих частот ТВ РПУ, сигналы которых могут быть приняты антенной установки.

В связи с этим максимум в полученном спектре принимался за сигнал несущей радиосигнала видеоизображения СТВ только при выполнении ряда дополнительных условий:

- 1) данный максимум имеет боковые, отстоящие на 50 Гц (то есть является несущей радиосигнала, модулированного по амплитуде последовательностью КСИ);
- 2) данный максимум имеет максимальный уровень среди других максимумов с частотами:

$$f = f_i \pm n \cdot 15625 \text{ Гц},$$

где f_i – частота анализируемой компоненты спектра, Гц; n – целое число.

Последнее условие гарантирует, что выбранная компонента является сигналом несущей среди спектральных компонент радиосигнала, модулированного по амплитуде последовательностью ССИ.

Пример регистрации сигнала, который может быть идентифицирован как СТВ, отраженный от метеорного следа, показан на рис. 3, где: a , b – спектрограммы сигнала (контурная и трехмерная поверхности); v – амплитудно-временная характеристика сигнала (временная вариация модуля комплексной огибающей отраженного сигнала); z – спектральная диаграмма принимаемого сигнала до (внизу) и во время (вверху) существования отраженного сигнала. Для приведенных спектрограмм размер окна быстрого преобразования Фурье составлял 38400 отсчетов (длительность окна 0,4 с при частоте дискретизации 96 кГц), взаимное перекрытие соседних временных окон – 75 %. На спектрограммах видна несущая ионосферно-земного сигнала (непрерывная вертикальная линия максимума спектра) и короткий, не более секунды, «всплеск», состоящий из несущей и боковых компонент КСИ отраженного сигнала. Причем видно, что компоненты отраженного сигнала и ионосферно-земного сигнала смещены друг относительно друга на десятки герц, что может быть объяснено эффектом Доплера из-за дрейфа метеорного следа под действием ветровых движений нейтральных воздушных масс.

Амплитудно-временные характеристики зарегистрированных сигналов (пример см. рис. 3, v) обнаруживают все признаки, характерные для радиосигналов, отраженных от метеорных следов [21, 22]:

- а) резкое нарастание амплитуды и последующее ее убывание с характерными дифракционными вариациями;
- б) стабильность частоты (фазы) компонент спектра, соответствующих отраженному сигналу.

В качестве примера на рис. 4 приведены типовые спектрограмм сигналов-помех, которые ошибочно могут быть приняты за СТВ, отраженные от метеорных следов. Спектрограмма рис. 4, a соответствует случаю, когда спектр «всплесков» имеет квази-постоянный уровень и не обнаруживает явно выраженных боковых с частотой следования КСИ. На рис. 4, b приведен случай «раздвоения» и вариация уровня ионосферно-земного сигнала предположительно вследствие движения ионосферной неоднородности или появления какого-либо воздушного объекта [23].

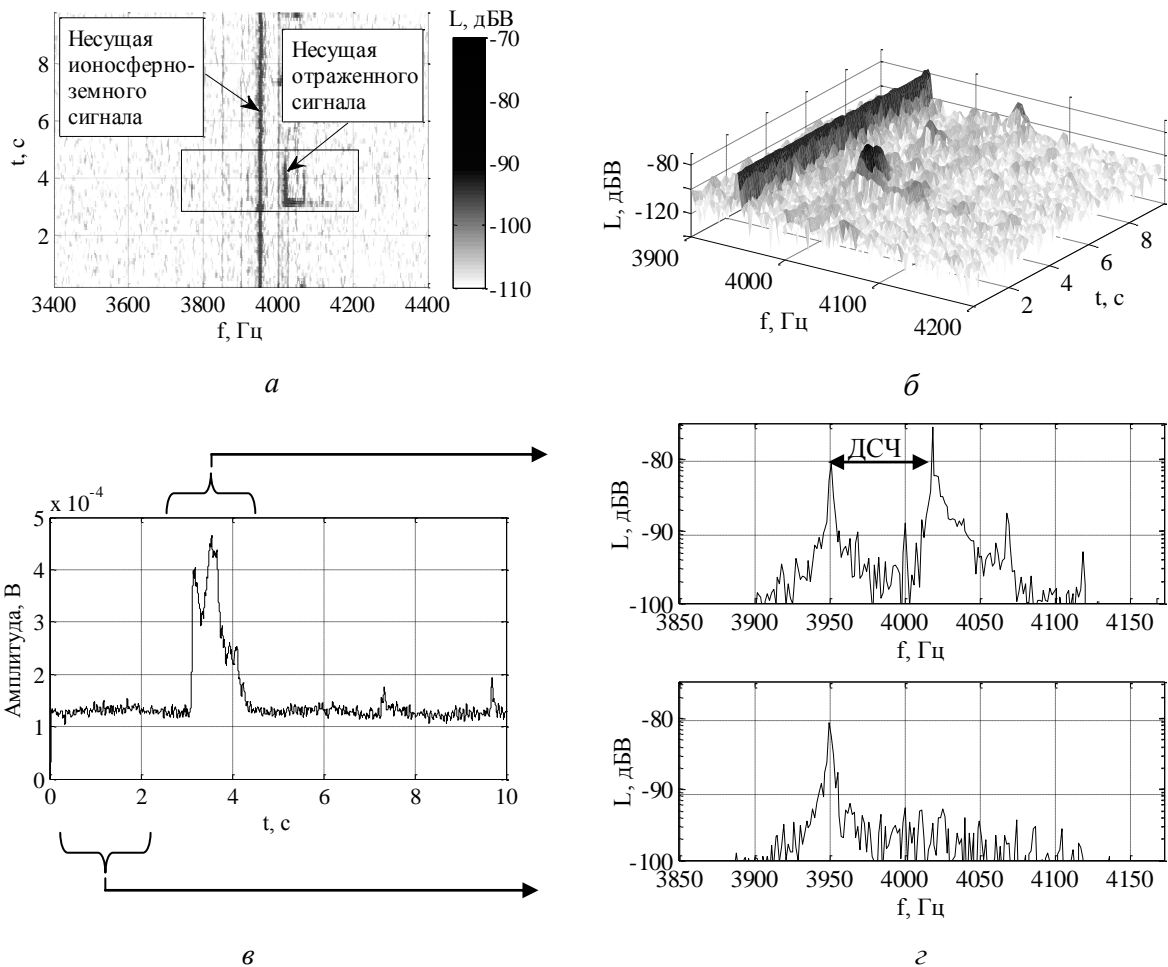


Рис. 3

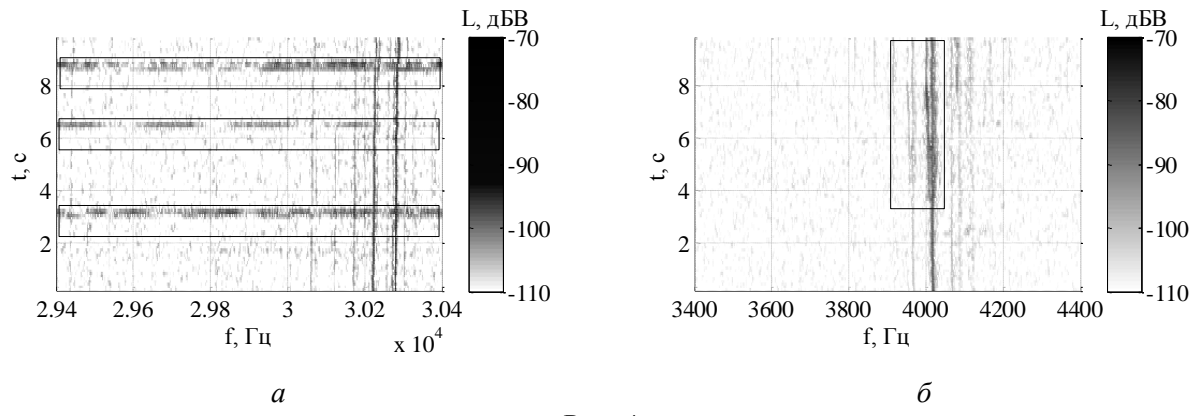


Рис. 4

Регистрации, подобные приведенным сигналам помех, составляли порядка 90 % «всплесков», выявленных в спектрограммах комплексной огибающей принимаемого сигнала. Они ошибочно могут быть идентифицированы как отраженные от метеорных следов СТВ в случае их выбора исключительно по критерию превышения уровня сигнала некоторого порогового значения. Отсеять подобные сигналы помех позволял дополнительный анализ их амплитудно-временных характеристик и контроль спектра на наличие составляющих, соответствующих боковым компонентам КСИ и ССИ, модулирующих сигнал по амплитуде.

Выводы

Предлагается усовершенствованная экспериментальная доплеровская радиометеорная установка для мониторинга динамики атмосферы Земли на высотах 80 – 105 км по сигналам телевизионного вещания. В данной установке, с целью сокращения себестоимости, радиоприемное устройство построено по схеме приемника прямого преобразования с выделением реальной I и мнимой Q компонент комплексной огибающей принимаемого радиосигнала, что позволяет использовать для аналого-цифрового преобразования принимаемых сигналов звуковую карту типовой ЭВМ.

Приведенные результаты испытаний установки демонстрируют возможность обнаружения отраженных от метеорных следов сигналов телевизионного вещания, анализа их спектрального состава и оценки доплеровского смещения частоты несущей отраженного сигнала, вызванного дрейфом следа под действием ветровых движений.

Разработанная установка может быть использована в качестве доступной экспериментальной базы для проведения радиометеорных исследований, а также быть положена в основу узла сети многопозиционной радиотехнической системы мониторинга скорости ветра на высотах метеорной зоны атмосферы Земли (80 – 105 км).

Список литературы: 1. *Jacobi, Ch.* 6 year mean prevailing winds and tides measured by VHF meteor radar over Collm (51.3°N, 13.0°E) / *Ch. Jacobi // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2012. – № 78. – P. 8–18. 2. *Пат. 58636* Україна МПК G 01 S 13/58 (2006.01). Спосіб вимірювання швидкості вітру методом радіолокації метеорних слідів за сигналами телевізійного мовлення / В. Д. Кукуш, А. М. Олейников, С. О. Маковецкий ; заявник і власник Харківський національний університет радіоелектроніки. – №2010 08168 ; заявл. 30.06.2010 ; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8/2011. – 10 с. 3. *Кукуш, В. Д.* Экспериментальные исследования возможности использования сигналов телевизионного вещания для определения скорости дрейфа метеорных следов / В. Д. Кукуш, А. Н. Олейников, С. А. Маковецкий // Вісті вищих навчальних закладів «Радіоелектроніка». – 2011. – Вип. 54(5). – С. 37–46. 4. *Кукуш, В. Д.* Теоретическое обоснование и экспериментальное исследование способа измерения ветра на высотах 80–105 км по сигналам телевизионного вещания / В. Д. Кукуш, А. Н. Олейников, Ch. Jacobi, Ю. В. Лыков // Радиотехника. – 2011. – Вып. 165. – С. 10–19. 5. *Kukush, V.* Possible use of television broadcasting signals for wind measurement by the meteor radiolocation method – main theoretical aspects and results of first experiments / V. Kukush, Ch. Jacobi, A. Oleynikov // *Rep. Inst. Meteorol. Univ. Leipzig.* – 2011. – Band 48. – P. 59–72. 6. *Кукуш, В. Д.* Моделирование и оценка погрешности способа измерения скорости ветра на высотах мезопазы-нижней термосферы методом радиолокации метеорных следов по сигналам телевизионного вещания / В. Д. Кукуш, А. Н. Олейников // Междунар. радиоэлектронный форум (МРФ-2011) «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития»: Сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. – Харьков : ХНУРЭ, 2011. —Т. I, Ч. 1. – С. 101–104. 7. *Долуханов, М. П.* Распространение радиоволн / М. П. Долуханов. – М. : Связь, 1972. – 336 с. 8. *Сети телевизионного и звукового ОВЧ ЧМ вещания* / М. Г. Локшин, А. А. Шур, А. В. Кокорев, Р. А. Краснощеков. – М. : Радио и связь, 1988. – 144 с. 9. *Youngblood, G. A.* Software-Defined Radio for the Masses, Part 1 / G. Youngblood, AC50G // QEX. – 2002. – Jul/Aug. – P.13–21. 10. *Галкин, В. А.* Основы программно-конфигурируемого радио / В. А. Галкин. – М. : Горячая линия телеком, 2013. – 372 с. 11. *Богданович, Б. М.* Радиоприемные устройства / Б. М. Богданович, Н. И. Окулич. – Минск : Вышэйш. шк., 1991. – 428 с. 12. *Ханзел, Г. Е.* Справочник по расчету фильтров : пер. с англ. / Г. Е. Ханзел. – М. : Сов. радио, 1974. – 288 с. 13. ADL5534 20 MHz to 500 MHz Dual IF Amplifier. – Режим доступа : <http://www.analog.com>. 14. AD8348 50 MHz to 1000 MHz Quadrature Demodulator. – Режим доступа : <http://www.analog.com>. 15. *Радиотехнические системы* / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов [и др.] ; под ред. Ю. М. Казаринова. – М. : Высш. шк., 1990. – 490 с. 16. *Дворяшин, Б. В.* Радиотехнические измерения / Б. В. Дворяшин, Л. И. Кузнецов. – М. : Сов. радио, 1978. – 360 с. 17. *Марпл, С. Л.-мл.* Цифровой спектральный анализ и его приложения : пер. с англ. / С. Л. Марпл-мл. – М. : Мир, 1990. – 584 с. 18. *Айфичер, Э. С.* Цифровая обработка сигналов: практический подход : пер. с англ. / Э. С. Айфичер, Б. У. Джервис. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2004. – 992 с. 19. *Олейников, А. Н.* Повышение эффективности разнесенной системы радиолокации метеорных следов / А. Н. Олейников, Ю. В. Лыков, В. Д. Кукуш // Радиотехника. – 2009. – Вып. 157. – С. 5–12. 20. *Radio-Frequenzen und Senderkarten weltweit.* – Режим доступа : <http://www.fmscan.de>. 21. *Кашеев, Б. Л.* Метеорные явления в атмосфере Земли / Б. Л. Кашеев, В. Н. Лебидинец, М. Ф. Лагутин. – М. : Наука, 1967. – 260 с. 22. *Мак-Кинли, Д.* Методы метеорной астрономии : пер. с англ. / Д. Мак-Кинли. – М. : Мир, 1964. – 310 с. 23. *Hocking, W. K.* Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology / W. K. Hocking, B. Fuller, B. Vandeppeer // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2001. – Vol. 63. – P. 155–169.