

**РАЗРАБОТКА МАЛОЗАТРАТНОЙ РАДИОМЕТЕОРНОЙ СИСТЕМЫ
МОНИТОРИНГА ДИНАМИКИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ
НА ВЫСОТАХ 80 – 105 КМ**

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, 3]. 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, составляющая не хуже единиц герц на интервалах времени, равных среднестатистической длительности отраженных от метеорных следов сигналов (0,1 с) [3].

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. Уровень отраженных радиосигналов составляет единицы микровольт, несущие частоты: 49,75 МГц или 59,25 МГц или 77,25 МГц, полоса частот, в которой выполняется обнаружение не менее 20 кГц относительно частоты несущих;

2) анализ спектра отраженных радиосигналов на временных интервалах в сотни миллисекунд – единицы секунд. Требуемая погрешность определения частот спектральных компонент – не хуже единиц герц. Это обеспечивает возможность оценить доплеровский сдвиг частоты (ДСЧ) несущей, вызванный дрейфом метеорного следа под действием ветровых движений нейтральных воздушных масс и оценить среднечасовую скорость и направление этих движений [3].

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 [4] (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.

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 [5, 6]. Из-за того, что требуемая частота дискретизации сигналов *I* и *Q* компонент равна полосе радиосигнала (в данной задаче не менее 20 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.

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] с целью минимизации его себестоимости.

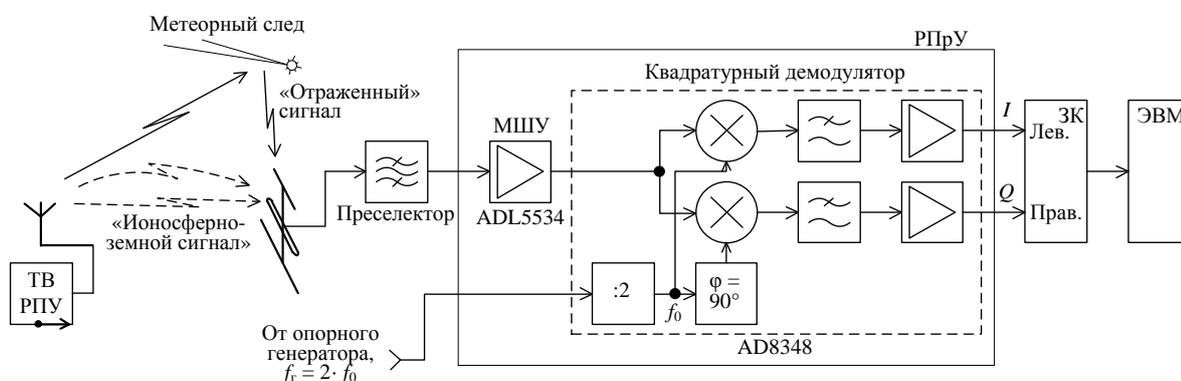


Рис. 1

В качестве преселектора в экспериментальной установке используется 5-звеньевой полосовой фильтр на спиральных резонаторах [7]. Применение данного устройства обеспечивает защиту радиоприемного устройства от забития мощными радиосигналами от окрестных радиостанций, работающих на соседних частотах.

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 малoshумящего 20 дБ – усилителя ADL5534 [12] и квадратурного демодулятора AD8348 [13]. За счет применения малoshумящего 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 [13].

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) длительность отраженного сигнала [8, 9];
- 2) величинами нестабильности генераторов гетеродинного напряжения установки и тактирования АЦП звуковой карты (частота тактирования АЦП используемой звуковой карты составляет 6 МГц) [9];
- 3) временем непрерывного накопления отсчетов «отраженного» радиосигнала или его длительностью [8, 9];
- 4) используемым алгоритмом получения спектра [10];

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 минут (то есть 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 непосредственно как разность одновременно принимаемых компонент отраженного сигнала и ионосферно-земного сигнала.

Следует отметить, что невозможности приема ионосферно-земных сигналов, ДСЧ сигнала, отраженного от метеорного следа, может быть оценен только при условии, что в качестве источника опорной частоты используется генератор с нестабильностью не хуже 10^{-8} на временных интервалах более сотен миллисекунд. Тогда величина ДСЧ может быть оценена как разность между величиной несущей частоты отраженного сигнала и величиной номинальной рабочей частоты ТВ РПУ – источника отраженного сигнала [3].

Частота опорного генератора (f_2) задается исходя из следующих соображений:

- 1) согласно техническим требованиям по использованию микросхемы AD8348:

$$f_2 = 2 \cdot f_0 \text{ или } f_0 = f_2 / 2,$$

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 строчных синхронизирующих импульсов (ССИ) каждого используемого СТВ:

$$| (f_2 / 2) - (f_{0 \text{ ТВ РПУ}} \pm f_{\text{ССИ}}) | < f_{s \text{ ЗК}},$$

где $f_{0 \text{ ТВ РПУ}}$ – рабочая частота ТВ РПУ, сигнал которого используется в качестве зондирующего; $f_{\text{ССИ}}$ – частота строчных синхронизирующих импульсов СТВ, $f_{\text{ССИ}} = 15625$ Гц; $f_{s \text{ ЗК}}$ – частота дискретизации сигнала в звуковой карте ЭВМ;

- 3) для обеспечения того, чтобы ни одна из несущих частот сигналов не попадала после квадратурной демодуляции на постоянную составляющую, которая впоследствии филь-

труется входными цепями звуковой карты, полоса пропускания которых составляет от 20 Гц до $f_s \text{ЗК} / 2$:

$$(f_z / 2) \neq f_{0\text{ТВ РПУ}},$$

причем отстройка величины $(f_z / 2)$ от $f_{0\text{ТВ РПУ}}$, должна составлять не менее 20 Гц.

Результаты выполненных работ показывают, что для доплеровской радиолокации метеорных следов и мониторинга динамики атмосферы Земли на высотах 80 – 105 км могут быть использованы программно-определяемые радиоприемные устройства, в которых аналого-цифровое преобразование принимаемого сигнала телевизионного вещания, отраженного от метеорного следа, осуществляется с помощью типовой офисной ЭВМ. Разработанная установка может быть использована в качестве доступной экспериментальной базы для проведения исследований, связанных с обнаружением и измерением параметров метеорных следов, а также быть положенной 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. Маковецький ; заявник і власник Харк. нац. ун-т радіоелектроніки. – №2010 08168 ; заявл. 30.06.2010 ; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8/2011. – 10 с. 3. *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. 4. *Долуханов М. П.* Распространение радиоволн / М. П. Долуханов. – М. : Связь, 1972. – 336 с. 5. *Youngblood G. A.* Software-Defined Radio for the Masses, Part 1 / G. Youngblood, AC50G // QEX. – 2002. – Jul/Aug. – P.13–21. 6. *Галкин В. А.* Основы программно-конфигурируемого радио / В. А. Галкин. – М. : Горячая линия телеком, 2013. – 372 с. 7. *Ханзел Г. Е.* Справочник по расчету фильтров : пер. с англ. / Г. Е. Ханзел. – М. : Сов. радио, 1974. – 288 с. 8. Радиотехнические системы / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов [и др.] ; под ред. Ю. М. Казаринова. – М. : Высш. шк., 1990. – 490 с. 9. *Дворяшин Б. В.* Радиотехнические измерения / Б. В. Дворяшин, Л. И. Кузнецов. – М. : Сов. радио, 1978. – 360 с. 10. *Марпл С. Л.-мл.* Цифровой спектральный анализ и его приложения ; пер. с англ. / С. Л. Марпл-мл. – М. : Мир, 1990. – 584 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 20.03.2016