

УДК 621.396.67

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ В ПОЛЯРНЫХ ШИРОТАХ

Рябов Игорь Владимирович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования и производства ЭВС Поволжского государственного технологического университета.
E-mail: ryabov22@mail.ru.

Толмачев Сергей Владимирович

аспирант кафедры проектирования и производства ЭВС Поволжского государственного технологического университета.
E-mail: korgik-89@mail.ru.

Адрес: 424000, Российская Федерация, Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3.

Аннотация: В статье рассмотрены физические характеристики метеоров и метеорных следов, предложена структурная схема аппаратно-программного комплекса для организации метеорной радиосвязи. В статье решается задача организации надежной скрытной помехозащищенной связи в полярных широтах. Связь организуется за счёт отражения от метеорных следов, которые регулярно наблюдаются в полярных широтах. Описана структура комплекса для организации метеорной связи. Получены предварительные результаты зондирования метеорных линий связи. В заключении сформулированы основные выводы.

Ключевые слова: метеорные потоки, метеорная связь, аппаратно-программный комплекс, двухсистемный приёмник навигационных сигналов ГЛОНАСС/GPS, сравнитель частот TDC, цифровой вычислительный синтезатор.

1. Введение

В настоящее время все большую значимость приобретает задача организации надёжной скрытной помехозащищённой связи в полярных широтах. Отличительной особенностью связи в полярных широтах является ее непостоянный характер и изменение условий прохождения радиоволн. Серьезными недостатками систем радиосвязи, использующих ионосферное распространение, являются зависимость от нестабильности ионосферы и необходимость смены рабочих частот в течение суток. В связи с этим, для повышения устойчивости систем радиосвязи, особенно в северных широтах, широко применяются каналы метеорной радиосвязи. Использование метеорной связи даёт следующие преимущества: повышенную устойчивость при ионосферных возмущениях естественного и искусственного происхождения (нагрев ионосферы нагревными стендами) по сравнению с КВ радиосвязью: повышенную, скрытность и помехозащищенность; простоту построения системы передачи данных от удалённых небезопасных объектов; более высокий показа-

тель эффективности функционирования системы метеорной связи по критерию «эффективность-стоимость» для труднодоступных районов и районов со слаборазвитой инфраструктурой; отсутствие «мертвой зоны» в пределах всей зоны обеспечения [1].

2. Физические характеристики метеоров и метеорных следов

Все метеоры, вторгающиеся в земную атмосферу, разделяются на потоковые (ливневые) и спорадические.

Потоковые метеоры появляются только в определенных периоды, когда орбита того или иного метеорного потока пересекается с земной орбитой. В эти периоды наблюдается повышенная насыщенность земной атмосферы метеорными частицами.

Для регулярной работы радиолиний существуют только спорадические метеоры, которые составляют основную часть всех метеорных частиц, и всегда поступают в атмосферу. Радианты спорадических метеоров, т. е. точки небесной сферы, из которых как бы исходят

пути метеоров, распределены случайно, время их появления также случайно.

Число спорадических частиц, попадающих в атмосферу, уменьшается с увеличением их массы, т. е.

$$n(m) \sim 1 / m, \quad (1)$$

где $n(m)$ – число частиц с массой больше m . По данным визуальных и радиолокационных наблюдений число частиц, ежедневно увлекаемых Землей, с массой $m \geq 10^4$ г равно 10, а с массой $m \geq 1$ г – 10^5 . Общее число частиц с массой до $m = 10^{-12}$ г составляет примерно 10^{20} . Самые многочисленные микрометеоры из-за малой массы ($m \leq 10^{-9}$ г) оседают в атмосфере, не разрушаясь. Для работы радиолиний существенны метеоры с массой $m \geq 10^8$ г, которые в результате сгорания в атмосфере образуют ионизированные следы [2].

Число частиц подвержено некоторым регулярным суточным и сезонным изменениям. Оказывается, что, несмотря на случайность радиантов, спорадические метеоры концентрируются большей частью в плоскости земной орбиты, где частицы двигаются вокруг Солнца в том же направлении, что и Земля. Если учесть вращение Земли вокруг собственной оси, то оказывается, что на вечерней стороне достигают Земли те метеоры, которые догоняют её, а на утренней стороне частицы и Земля движутся навстречу. В результате минимальное число метеоров наблюдаются вечером примерно в 18 часов местного солнечного времени, а максимальное – в 6 часов утра. Наибольшие суточные изменения наблюдаются на экваторе, наименьшие – на полюсах. В течение года максимальное число метеоров падает на Землю в июле, а минимальное – в феврале, так как орбиты спорадических метеоров несколько неравномерно сконцентрированы вдоль земной орбиты. Наибольшие сезонные изменения имеют место на полюсах, наименьшие – на экваторе [3].

Метеоры вторгаются в земную атмосферу со скоростями от 11,3 до 72 км/сек. Нижнее значение соответствует наименьшей скорости, которую может иметь частица, падающая

извне на Землю. Верхнее значение есть сумма двух составляющих: 30 км/сек – составляющая, связанная со скоростью вращения Земли вокруг Солнца, а 42 км/сек – составляющая, связанная с движением самого метеора, способного преодолеть притяжение Солнца и покинуть солнечную систему.

Образование ионизированного метеорного следа при столь больших скоростях вторжения метеоров в земную атмосферу происходит по следующей схеме.

В относительно плотных слоях атмосферы, где метеорная частица сталкивается с большим числом молекул, тепловая энергия, возникающая при ударе, вызывает испарение атомов с поверхности метеора. Столкновения быстро летящих атомов с частицами окружающего воздуха вызывает ионизацию. В пространстве образуется область с повышенной ионизацией, представляющая в первом приближении очень тонкий и длинный гиперболоид вращения, в вершине которого расположена метеорная частица.

Метеорные следы обнаруживаются на высотах примерно 120–80 км. На больших высотах атмосфера сильно разрежена и испарение метеорного вещества вследствие трения ничтожно мало. Ниже 120 км метеоры быстро испаряются, и большая их часть переходит в газообразное состояние, не достигнув высоты 80 км. В пределах 120–80 км высота появления метеорного следа зависит от массы, скорости и направления движения (зенитного угла) метеора.

Линейная плотность электронной концентрации в метеорном следе пропорциональна массе метеора и изменяется примерно от 10^{10} до 10^8 электронов/м.

Протяжённость следов зависит от массы и зенитного угла метеора. Наиболее вероятная протяжённость – порядка 15 км. Часто наблюдаются следы длиной до 50 км.

Начальный радиус следа мал и зависит от высоты, на которой начинает формироваться след. В пределах 120–80 км начальный радиус

может изменяться от единиц метров до примерно 0,5 м соответственно [4].

Время жизни следа определяется как процессом диффузии, в результате которого след сравнительно медленно расширяется.

Измеряемое время жизни следа неоднозначно и зависит от средств его обнаружения. Большинство обнаруживаемых следов имеет время жизни дачи секунды. Следы с продолжительностью порядка одной минуты наблюдаются всего лишь несколько раз в сутки.

3. Метеорные системы связи

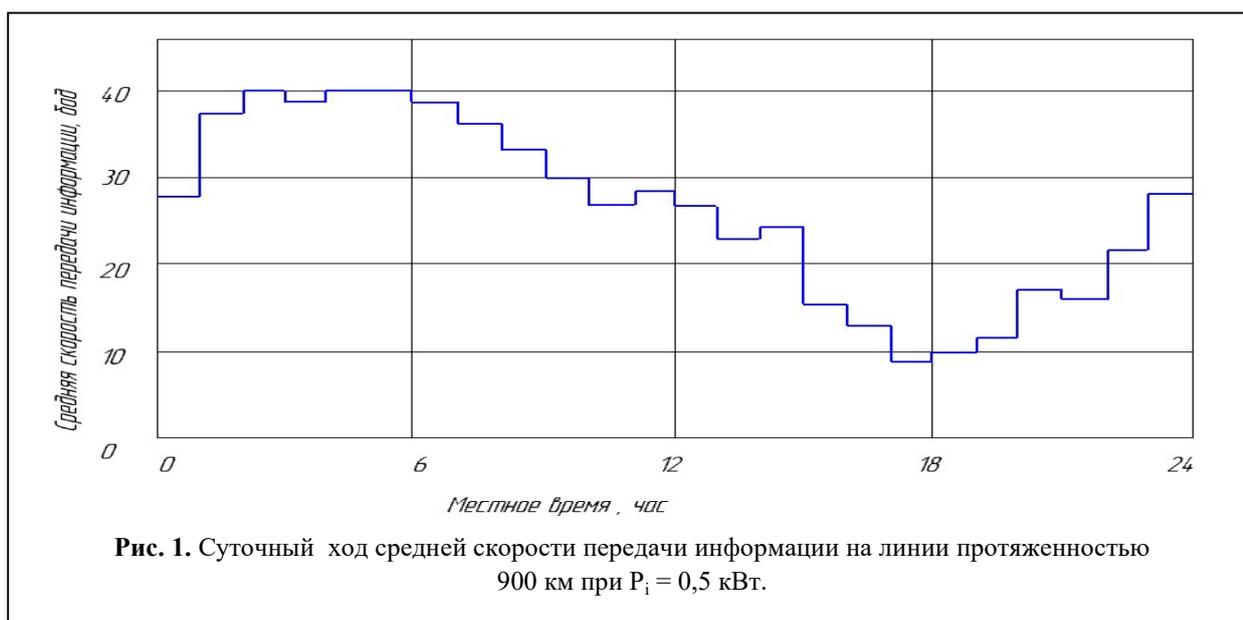
Прерывистое действие систем связи, использующих метеорные вспышки, осуществляется в простейшем варианте следующим образом. Оборудование обоих концов линии состоит из передатчика, приёмника, антенн, устройства, обеспечивающего включение и выключение системы при появлении и пропадании полезных метеорных следов, накопителей принятой и передаваемой информации. Передатчики на обоих концах линии работают на различных частотах в диапазоне 30–50 МГц, разнесённых примерно на 1 кГц, и непрерывно излучают несущую.

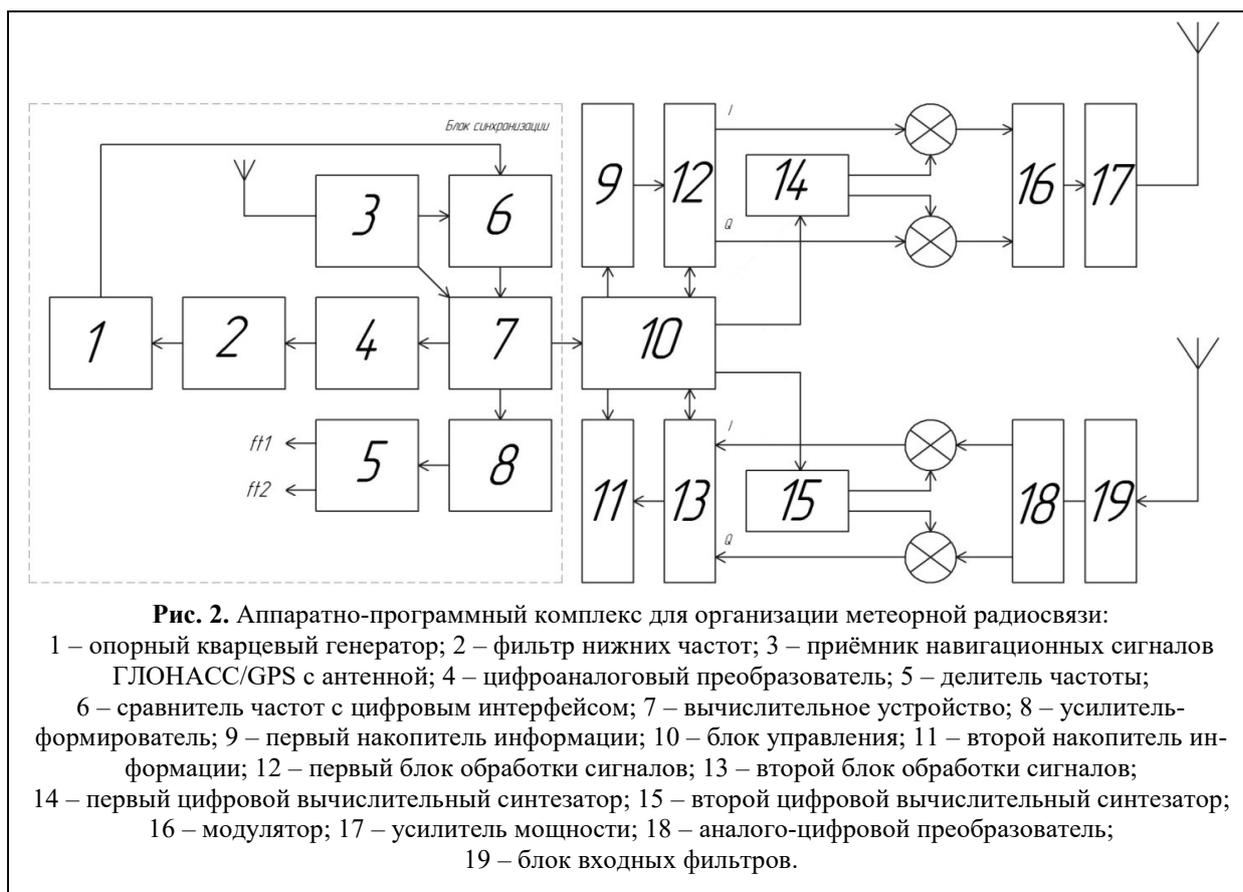
При появлении метеорного следа в каждом из приёмников уровень несущей достигает порогового уровня, управляющее устройство от-

крывает цепь передачи: информация от накопителя поступает на модулятор передатчика и начинается передача информации с большой скоростью, пока уровень сигнала не падает ниже порогового, после чего модуляция передатчика прекращается. В точке приёма сигнал после демодуляции подается на накопитель принятой информации, откуда информация с замедленной скоростью поступает в оконечную приемную аппаратуру.

Метеорные системы связи – это системы с низким уровнем сигнала, так как потери при отражении от метеорных следов сравнительно велики. Например [5], в типичной системе, работающей на частоте 50 МГц при мощности передатчика 2 кВт, на трассе протяжённостью 1300 км потери передачи составляют около 170 дБ. Средняя скорость передачи изменялась за отдельные часы в широких пределах (рис. 1).

Для обеспечения средней скорости в десятки бод в системах прерывистой связи мгновенная скорость передачи должна быть большой, поскольку средняя скорость равна мгновенной скорости, умноженной на коэффициент заполнения. При коэффициенте заполнения $k = 10\%$, если $V_{\text{бод}} = 40$ бод, мгновенная скорость должна быть 400 бод, а при $k = 2\%$ – 2000 бод. Работа с большими мгновенными скоростями





на метеорных линиях возможна из-за малых искажений за счёт многолучевости и замираний благодаря одновременному использованию только одного метеорного следа. Это, в свою очередь, ограничивает величину коэффициента заполнения значениями порядка 10% и меньше.

Максимальная дальность действия метеорных линий связана с высотой образования ионизированных следов (90–100 км) и ограничивается расстояниями порядка 2000 км [6].

Системы метеорной связи оцениваются как системы с удовлетворительной пропускной способностью, которая обеспечивается при ограниченной мощности передатчика (единицы киловатт) и сравнительно простых антеннах. Недостатки системы – сложность аппаратуры накопления, прерывистость связи с сопутствующими ей задержками. Достоинством системы метеорной связи – возможность работы в метровом диапазоне волн (частоты 30–50 МГц) на расстоянии до 2000 км.

4. Аппаратно-программный комплекс для организации метеорной радиосвязи

Структурная схема аппаратно-программного комплекса представлена на рис. 2.

Аппаратно-программный комплекс содержит двухсистемный приёмник навигационных сигналов ГЛОНАСС/GPS с антенной 3, сравнитель частот (TDC) с цифровым интерфейсом 6, вычислительное устройство 7, ЦАП 4, ФНЧ 2, опорный кварцевый генератор 1, выход которого подключён к входу сравнителя частот; выход вычислительного устройства 7 подключён к входу блока управления 10; выходы последнего подключены к входам первого и второго накопителей информации 9, 11 и входам управления первого и второго ЦВС 14, 15; введены двунаправленные связи между блоком управления 10 и первым и вторым блоками обработки сигналов 12, 13.

Выходы первого блока обработки сигналов 12 соединены с первыми входами первого и второго смесителей, на вторые входы этих

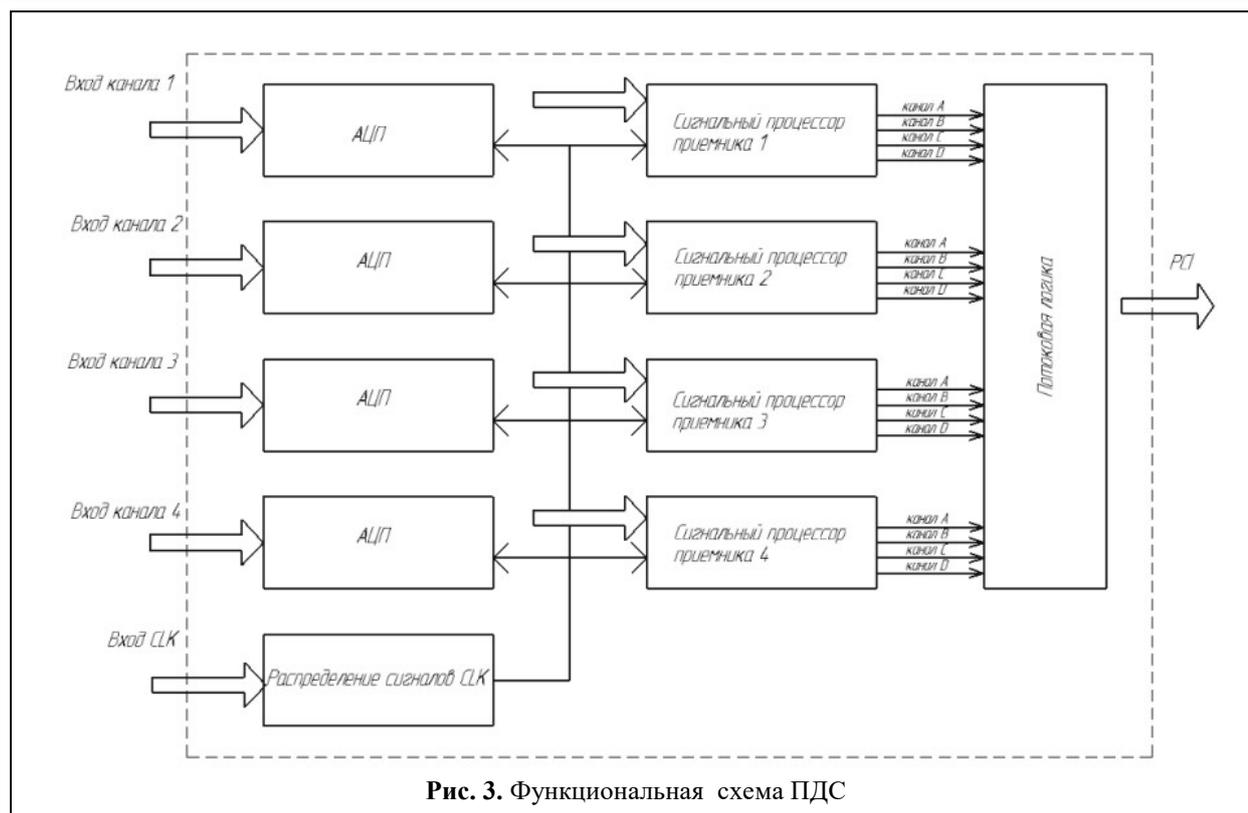


Рис. 3. Функциональная схема ПДС

смесителей поступают квадратурные сигналы I и Q с выходов первого ЦВС 14, который имеет два выхода.

Выходы первого и второго смесителей подключены к модулятору 16, который производит перемножение квадратурных сигналов I и Q , необходимое для расширения полосы частот формируемых сложных сигналов, а также предварительное усиление выходного сигнала. Далее сигнал поступает на широкополосный усилитель мощности 17, где происходит основное усиление сигнала, и через передающий антенно-фидерный тракт излучается в атмосферу.

Принятый сигнал поступает на антенно-фидерное устройство и через блок входных фильтров 19 поступает на вход двухканального АЦП 18. Выходы АЦП 18 подключены к первым входам третьего и четвертого смесителей; на второй вход этих смесителей подаются квадратурные сигналы I и Q со второго ЦВС 15, который также является двухканальным. Выходы третьего и четвертого смесителей подключены к входам второго блока обработ-

ки сигналов 13. Отчёты принятого сигнала, прошедшего предварительную обработку записываются во второй накопитель информации 11.

Сигнал тактовой частоты с вычислительного устройства 7 через усилитель-формирователь 8 подается на делитель частоты 5, где формируется сетка частот; выходы делителя частоты 5 подключены к тактовым входам первого и второго блоков обработки сигналов 12, 13, а также к тактовым входам первого и второго накопителей информации. При этом обеспечивается синхронизация приёмного и передающего трактов при различных режимах работы аппаратно-программного комплекса.

В вычислительном устройстве 7 происходит умножение частоты опорного кварцевого генератора в 80 (или 100) раз и через блок управления поступает на тактовые входы ЦВС 14 и 15. При этом за счёт введения обратной связи с целью подстройки частоты кварцевого генератора по сигналам ГЛОНАСС/GPS обеспечивается его относительная нестабильность частоты

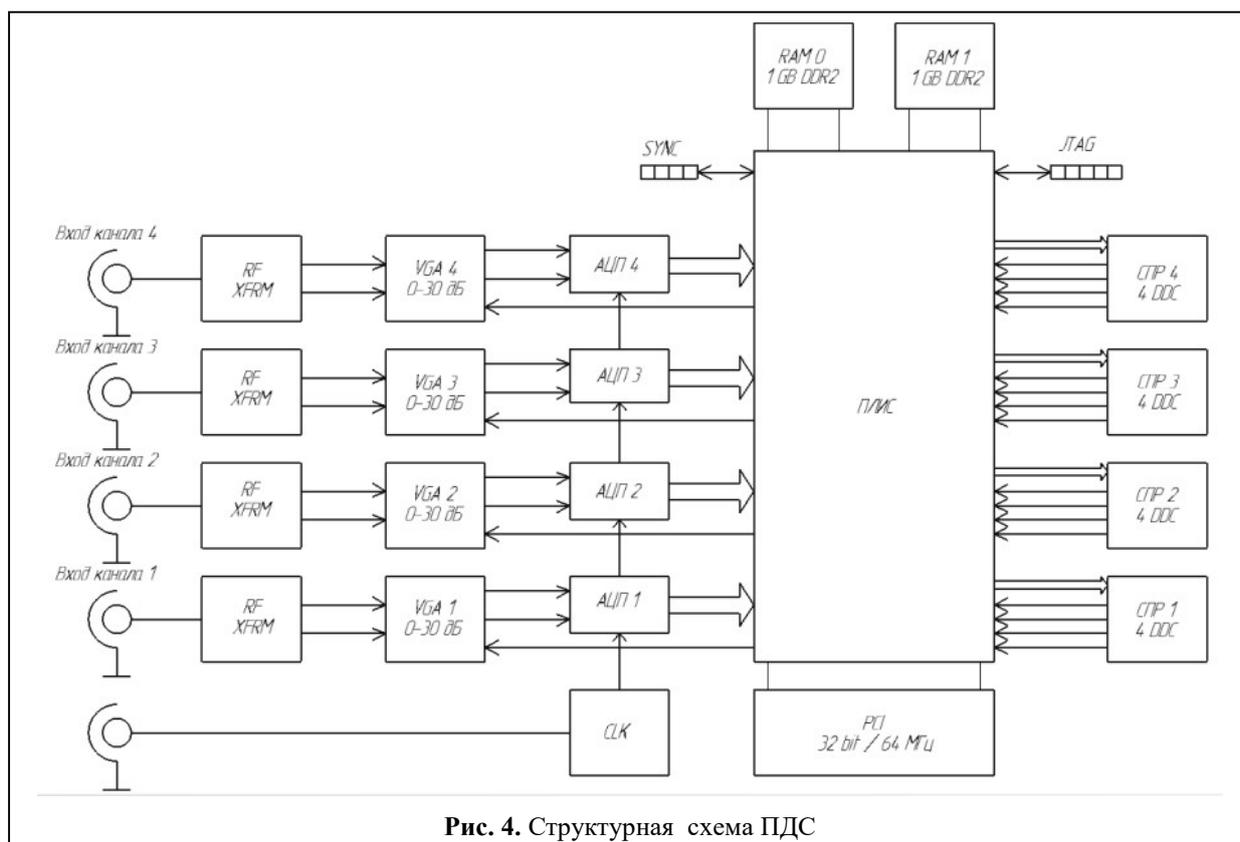


Рис. 4. Структурная схема ПДС

ты не хуже 10^{-9} – 10^{-10} .

Приёмник навигационных сигналов ГЛОНАСС/GPS 3 также выдает сигнал секундной метки, который поступает на вычислительное устройство 7, и обеспечивает формирование сигналов установки начальной частоты ЦВС 14 и 15.

Цифровые вычислительные синтезаторы 14 и 15 позволяют формировать сложные частотно-модулированные сигналы или фазоманипулированные сигналы [7].

Аппаратно-программный комплекс может работать в двух режимах: во-первых, проведение диагностики каналов распространения радиоволн в широком диапазоне частот от 10 до 100 МГц; во-вторых, проведение сеансов радиосвязи на оптимальных рабочих частотах (ОРЧ), выбранных по результатам диагностики.

В основе приёмной части АПК лежит плата детекции сигналов (ПДС). К этой плате подключена антенна, принимаемые данные оциф-

ровываются, ведётся первичная обработка сигнала, и затем обработанные данные передаются через интерфейс PCI на персональный компьютер для последующей доработки и представления результатов в графическом виде [8].

Функциональная схема ПДС представлена на рис. 3. Структурная схема ПДС представлена на рис. 4.

В основе ПДС лежат решения, предложенный компанией Sagax Communications и их прошивка. Структурная схема модернизируется, ставятся АЦП с более высокими характеристиками и переписывается интерфейс связи с ПК.

Алгоритмы обработки сигнала зашиваются в ПЛИС.

На персональном компьютере установлено модернизированное ПО Spectrum Lab. Рабочее окно программы, функциональные узлы и примеры принимаемых данных приведены на рис. 5 и рис. 6.

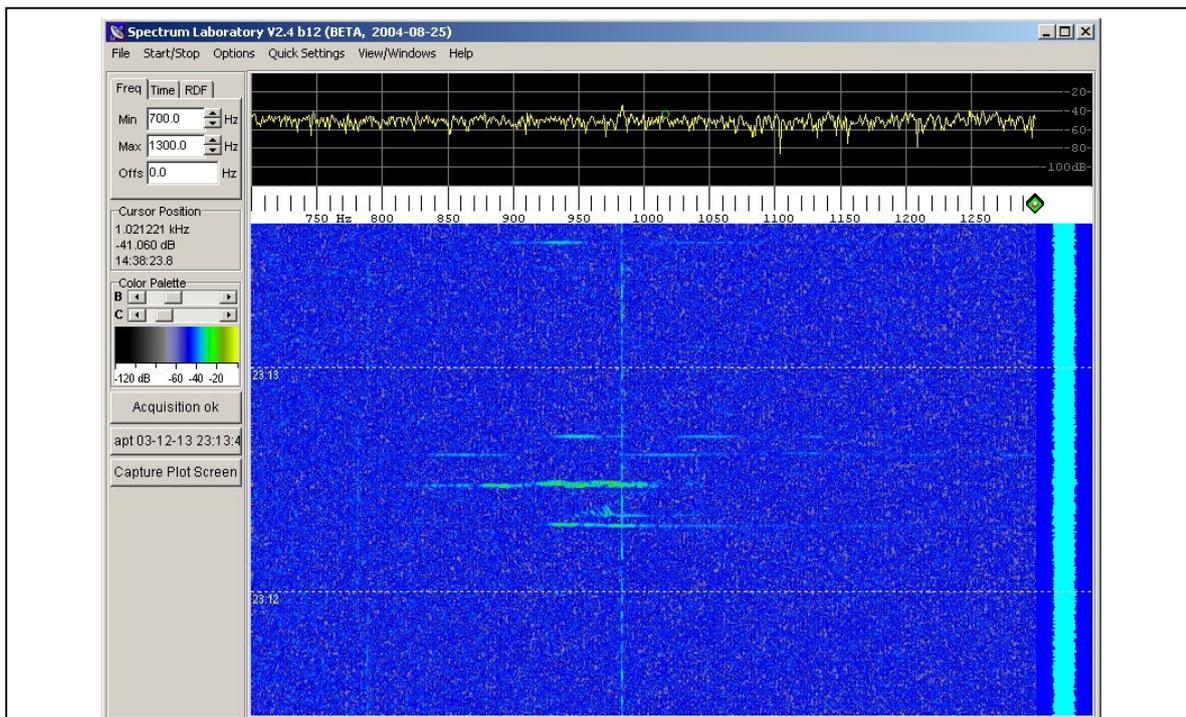


Рис. 5. Рабочее окно программы

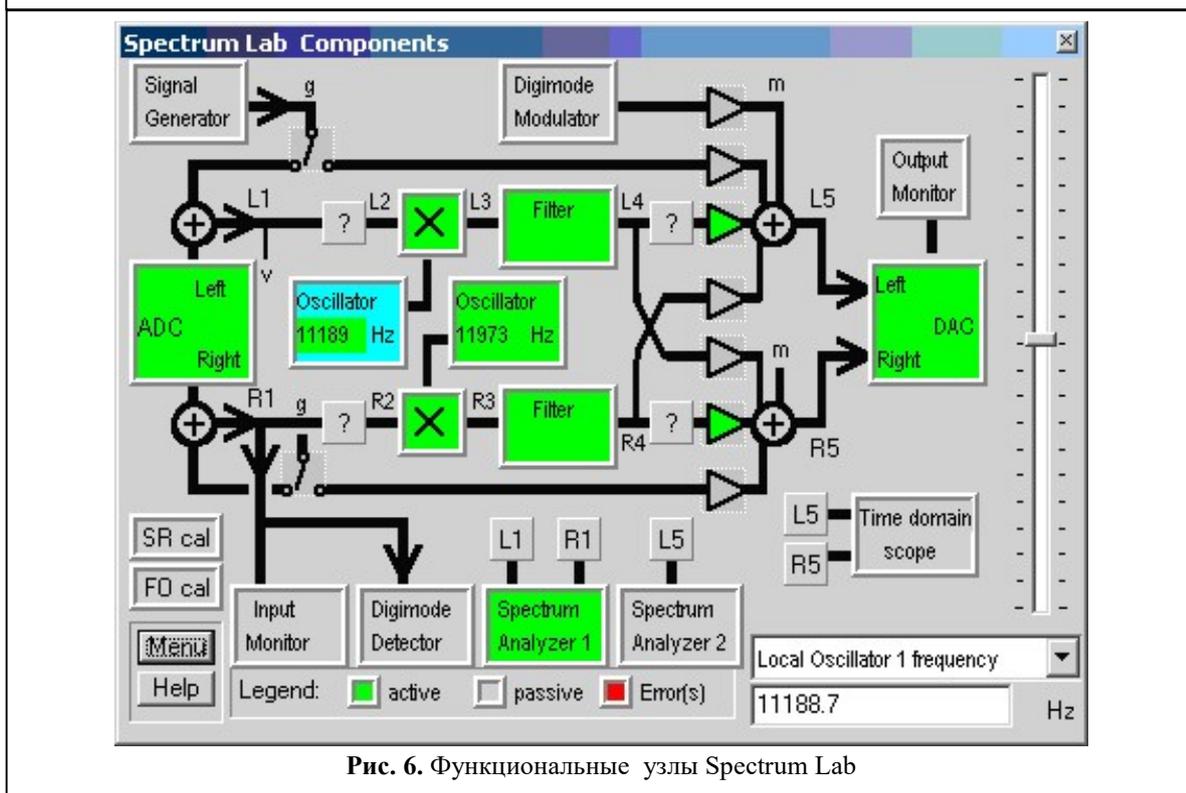


Рис. 6. Функциональные узлы Spectrum Lab

С помощью скрипта Spectrum Lab позволяет обнаруживать метеорные следы и сохранять данные о них на ПК [9]. Проанализировав и оценив их параметры, на ПК вырабатываются

управляющие команды. Перестройкой полосы пропускания занимается модернизированная программа SRS-3000.

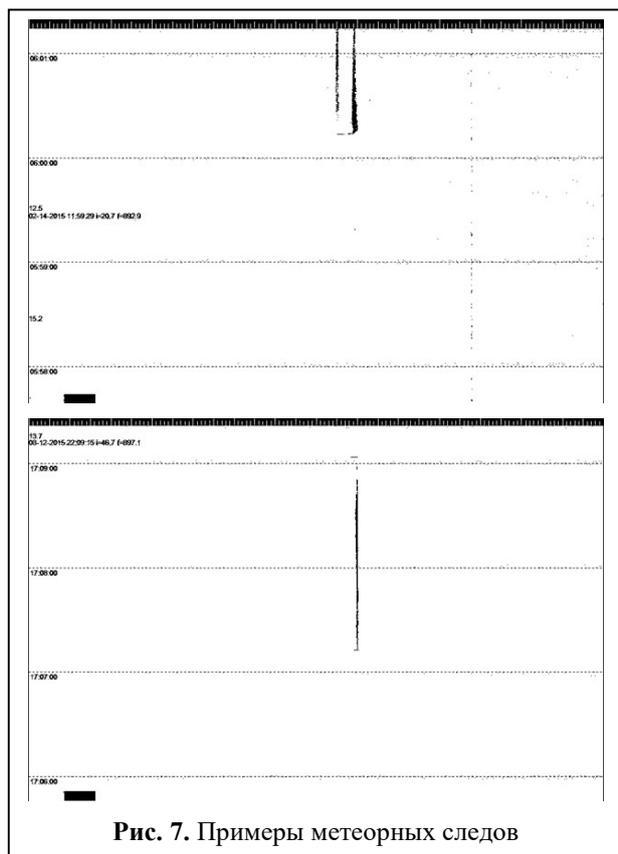


Рис. 7. Примеры метеорных следов

Пример метеорных следов, зафиксированных с помощью Spectrum Lab, представлен на рис. 7.

5. Выводы

Аппаратно-программный комплекс предназначен для проведения радиофизических исследований в полярных широтах и проведения сеанса радиосвязи в КВ и УКВ диапазонах с использованием как трансионосферного, так и метеорного распространения радиоволн.

Передача информации может производиться как на фиксированных частотах, так и в режиме программной перестройки рабочей частоты. За счет выбора ОРЧ по нескольким критериям: максимум отношения сигнал-шум, минимум многолучевости, низкий уровень помех соседних радиопередатчиков, удается повысить надежность, помехоустойчивость и скрытность сеанса радиосвязи. При этом дальность связи в полярных широтах обеспечивается до 2000 км при мощности передатчика 200 Вт без использования ретрансляторов.

Литература

1. Прокис Д.Ж. Цифровая связь: пер. с англ. Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 798 с.
2. Феер К. Беспроводная связь. Методы модуляции и расширения спектра: пер. с англ. под ред. В.И. Журавлева. М.: Радио и связь, 2000. 520 с.
3. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. Под ред. В.И. Борисова; изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Радио Софт, 2008. 512 с.
4. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. СПб.: Свое издательство, 2013. 166 с.
5. Рябов И.В. Методы и средства цифрового синтеза прецизионных сигналов для аппаратуры дистанционного зондирования ионосферы: дисс. ... докт. техн. наук. Йошкар-Ола, 2006. 291 с.
6. Ширман Я.Д., Лосев Ю.И., Минервин Н.Н. и др. Радиоэлектронные системы: основы построение и теория: Справочник; под ред. Я.Д. Ширмана. М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. 828 с.
7. Головин О.В. Декаметровая связь. М.: Радио и связь, 1990. 238 с.
8. Рябов И.В. Прямой цифровой синтез сложных широкополосных сигналов в задачах радиолокации, навигации и связи. Монография. Йошкар-Ола: Научное издание, 2016. 152 с.
9. Толмачев С.В., Рябов И.В., Лебедева А.А. Принципы программно-определяемой радиосистемы и их применение в рамках задачи исследования метеорной радиосвязи // Современные наукоемкие технологии. 2016 № 3. С. 14–17.
10. Рябов И.В., Толмачев С.В. SDR-приёмник для метеорной радиосвязи // В сб. тр. 15 Международной науч.-техн. конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение», Москва: DSPA-2013. Т. 2. С. 223–226.
11. Рябов И.В., Толмачев С.В., Чернов Д.А. SDR приёмник на FPGA для исследования радиолокационных отражений от полярных сияний // В сб. тр. 16 Международной науч.-техн. конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва: DSPA-2014. Т.1. С. 196–202.
12. Рябов И.В., Толмачев С.В., Чернов Д.А. Программирование ПЛИС семейства ZYNQ фирмы Xilinx с использованием MatLab и Simulink для исследования метеорной радиосвязи // В сб. тр. 17 Международной науч.-техн. конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва: DSPA-2015. Т.2. С. 321–325.
13. Рябов И.В., Толмачев С.В., Лебедева А.А. Аппаратно-программный комплекс для обнаружения метеорных следов // В сб. тр. 18 Международной науч.-техн. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва: DSPA-2016. Т.1. С. 127–131.

Поступила 6 июня 2017 г.

English

HARDWARE AND SOFTWARE PACKAGE FOR ARRANGING COMMUNICATION IN POLAR LATITUDES

Igor Vladimirovich Ryabov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Design Engineering and Technology of Electronic Devices, Volga State University of Technology.

E-mail: ryabov22@mail.ru.

Sergey Vladimirovich Tolmachev – Postgraduate Student, Department of Design Engineering and Technology of Electronic Devices, Volga State University of Technology.

E-mail: korgik-89@mail.ru.

Address: 424000, Russian Federation, Mari El, Yoshkar-Ola, Lenin square, 3.

Abstract: The article examines physical properties of meteors and meteor bursts, and puts forward block diagram of hardware and software package for arranging meteor-burst radio communication. A distinctive feature of communication in polar latitudes is its unstable nature and variable conditions for radio-wave passing. Grave faults of radio communication systems using ionospheric propagation are dependence on ionosphere's instability and necessity to change operating frequencies within 24 hours. Therefore, to improve stability of radio communication systems, especially in northern latitudes, meteor-burst radio communication channels are widely used. Using meteor-burst communications provides the following advantages: augmented stability in ionospheric disturbances compared to short-wave radio communication: enhanced hard-to-detect feature and noise immunity; simplicity of developing data transmission system from distant non-servicing objects. Hardware and software package for meteor-burst radio communication comprises double-system receiver of GLONASS/GPS navigation signals, frequency comparator (TDC) with digital interface, computing device, DAC, LPF, reference-frequency generator, control unit; first and second data storage devices, first and second digital computing synthesizers, first and second signal processing units, first and second mixers, broadband amplifier, antenna-feeder path. Digital computing synthesizers enable to generate aggregate frequency-modulated signals or phase-modulated signals. Hardware and software package can operate in two modes: first, performing diagnostics of radio wave propagation channels in a wide frequency range from 10 to 100 MHz; second, performing radio communication sessions at optimum working frequencies (OWF) selected according to diagnostics results. Hardware and software package is aimed at conducting radiophysical research in polar latitudes and conducting radio session in SW and USW bands using both transionospheric and meteor-burst radio wave propagation. In addition, communication range in polar latitudes is provided up to 2000 km with transmitter's power of 200 W without the use of repeaters.

Keywords: meteor showers, meteor-burst communication, hardware and software package, double-system receiver of GLONASS/GPS navigation signals, TDC frequency comparator, digital computing synthesizer.

References

1. *Prokis D.J.* Digital communication: transl. from English. Ed. by D. D. Klovsky. Moscow: Radio and communications, 2000. 798 p.
2. *Feer K.* Wireless communication. Methods of modularization and spectrum extension: transl. from English. edited by V.I. Zhuravlev. Moscow: Radio and communications, 2000. 520 p.
3. *Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E.* Protection of radio communication systems with the extension of the signal spectrum by pseudorandom reconstruction of the operating frequency. Edited by V.I. Borisov; 2nd ed. Moscow: Radio Software, 2008. 512 PP.
4. *Makarenko S.I., Ivanov M.S., Popov S.A.* Interference Protection of communication systems with pseudorandom adjustment of the operating frequency. Monograph. Saint-Petersburg.: Own publishing house, 2013. 166 p.
5. *Ryabov I.V.* Methods and means of digital synthesis of precision signals for remote sensing equipment of the ionosphere: diss. ... doct. techn. sciences. Yoshkar-Ola, 2006. 291 p.
6. *Shirman Ya.D., Losev Yu.I., Minervin N.N.* et al. Radioelectronic systems: fundamentals of construction and theory: Handbook; edited by Ya.D. Shirman. Moscow: ZAO "MAQUIS", 1998. 828 p.
7. *Golovin O.V.* Decameter communication. Moscow: Radio and communications, 1990. 238 p.
8. *Ryabov I.V.* Direct digital synthesis of complex broadband signals in problems of radio navigation and communication. Monograph. Yoshkar-Ola: Scientific publication, 2016. 152 p.

9. *Tolmachev S.V., Ryabov I.V., Lebedeva A.A.* Principles of software-defined radio system and their application in the framework of the meteor radio communication research task. Modern science-intensive technologies. 2016. No. 3. Pp. 14–17.

10. *Ryabov I.V., Tolmachev S.V.* SDR-receiver for meteor radio communication. Proc. of 15th International scientific conference “Digital signal processing and its application”, Moscow: DSPA-2013. Vol. 2. Pp. 223–226.

11. *Ryabov I.V., Tolmachev S.V., Chernov D.A.* SDR receiver on FPGA for research of radar reflections from polar lights. Proc. of 16th International scientific conference “Digital signal processing and its application”, Moscow: DSPA-2014. Vol. 1. Pp. 196–202.

12. *Ryabov I.V., Tolmachev S.V., Chernov D.A.* Programming of the zynq FPGA family by Xiling using MatLab and Simulink for meteor radio communication research. Proc. of 17th International scientific conference “Digital signal processing and its application”, Moscow: DSPA-2015. Vol. 2. Pp. 321–325.

13. *Ryabov I.V., Tolmachev S.V., Lebedev A.A.* AP-Parata software system to detect meteor trails. Proc. of the 18th International scientific conference “Digital signal processing and its application”, Moscow: DSPA-2016. Vol. 1. Pp. 127–131.