

ХАРАКТЕРИСТИКИ АППАРАТУРНОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ НИЗКООРБИТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ИОНОСФЕРЫ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ И ПРИЛЕГАЮЩИМИ РЕГИОНАМИ

Е. А. КАПЛЯРЧУК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Беларусь)*

E-mail: ek.genia13@gmial.com

Аннотация. Приведены требуемые характеристики бортового ретранслятора, аппаратуры наземных приемных пунктов, каналов связи и сервера обработки данных системы низкоорбитального контроля ионосферы над территорией Республик Беларусь и прилегающими регионами при определении полного электронного содержания в ионосфере на основе перекрестной ретрансляции навигационных сигналов GPS.

Abstract. The required characteristics of the on-board repeater, equipment of ground receiving stations, communication channels and data processing server of the low-orbit ionosphere monitoring system over the territory of the Republic of Belarus and adjacent regions are given when determining the total electron content in the ionosphere based on cross-relay of GPS navigation signals.

Введение

Разработка методов контроля состояния ионосферы с использованием радиочастотного зондирования является актуальной задачей, особенно в условиях увеличения потребности в получении абсолютных измерений ПЭС в реальном времени [1-4]. Повышенный интерес к таким методам обусловлен необходимостью повышения автономности систем обнаружения опасных природных явлений и обеспечения средств радиосвязи и радионавигации, которые не должны зависеть от глобальных ионосферных карт, имеющих задержку обновления до нескольких дней [2].

В [5] на основе перспективного метода оценивания ПЭС при ретрансляции навигационных сигналов ГНСС GPS с использованием наноспутников-ретрансляторов [6] предложены состав и структура системы низкоорбитального контроля ионосферы над территорией РБ и прилегающими регионами.

Цель настоящей статьи заключается в обосновании характеристик аппаратурного и программного обеспечения системы низкоорбитального контроля ионосферы (НКИ), предназначенной для мониторинга над территорией Республики Беларусь и прилегающими регионами.

Характеристики бортового ретранслятора

Требуемые характеристики бортового ретранслятора наноспутника приведены в таблице 1. Характеристики определены расчетным путем исходя из необходимости достижения заданной точности измерения ПЭС (не хуже 0,1 TECu) и с учетом конструктивных ограничения по размещению приемных и передающих антенн.

Таблица 1. Требуемые характеристики бортового ретранслятора

Наименование характеристики	Значение характеристики
Выходная мощность в линейном режиме по 3 дБ компрессии, дБм	23±1
Коэффициент усиления K_p тракта ретрансляции по мощности, дБ	127±1
Коэффициент шума $k_{ш}$ входного малошумящего усилителя, дБ	1...2
Диапазон рабочих частот, МГц	1575,42±1 – по входу 150±1 и 400±1 – по выходу
Приемная антенна сигнала L_1 GPS	микроразомкнутая антенна диаметром 70...80 мм с коэффициентом усиления в зените 4...4,5 дБ
Передающие антенны каналов 150/400 МГц	Четвертьволновый штыврь (в транспортном состоянии – свернутый), вибраторная антенна (для 400 МГц) или микроразомкнутая антенна с коэффициентом усиления в секторе ±60° относительно максимума не менее 1 дБ

Характеристики приемных каналов ретранслированных сигналов

В [5] приемные каналы ретранслированных сигналов предложено рассматривать как дополнительные приемные каналы приемных пунктов (ПП) спутниковой системы точного позиционирования (ССТП). Эти приемные каналы совместно с аппаратурой передачи данных должны обеспечить прием сигналов на частотах 150/400 МГц с произвольной эллиптической поляризацией в секторе 360° по азимуту и $(5...90)^\circ$ по углу места на двух ортогональных поляризациях и преобразование принятых сигналов в цифровую форму с последующей передачей принятых сигналов на центр обработки информации и управления (ЦОИиУ) системы НКИ. Направление приема полезного сигнала является известным с высокой точностью, а его поляризационные характеристики – случайными из-за Фарадеевского вращения плоскости поляризации в ионосфере.

Анализ возможных вариантов построения дополнительных приемных каналов показывает, что наиболее экономным из них является использование антенной системы в виде шестиэлементной кольцевой антенной решетки (КАР) из горизонтально и вертикально ориентированных антенных элементов (АЭ) - полуволновых вибраторов. Геометрия КАР на частоту 150 МГц приведена в левой части рис.1 (вид сверху), где выколотым кружком показаны вертикальные вибраторы. Геометрия КАР на частоту 400 МГц аналогична при пропорционально меньших размерах, причем КАР на частоту 400 МГц «встраивается» в КАР на частоту 150 МГц с разнесом по высотам фазовых центров порядка 1 м для исключения взаимного влияния АЭ.

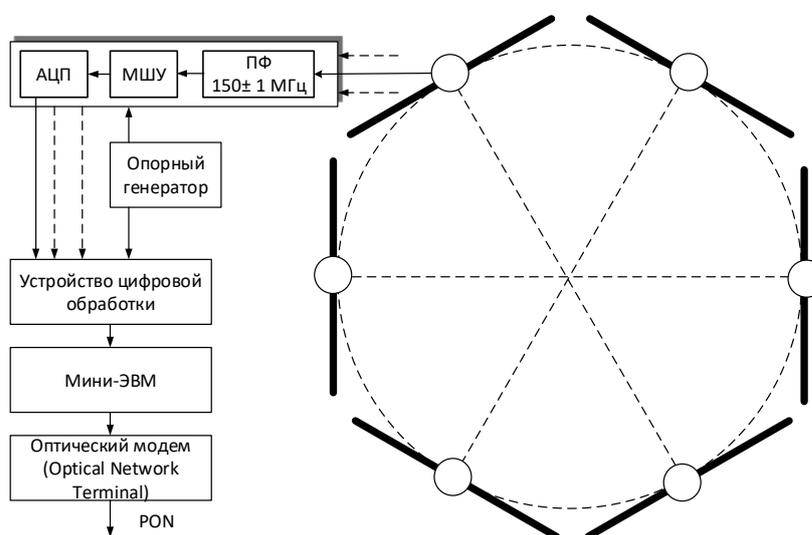


Рис. 1. Структура дополнительной аппаратуры приемных пунктов ССТП

Такие КАР требует фокусировки в направлении на НС на каждой из поляризаций с последующей подстройкой суммарного сигнала в соответствии с поляризацией полезного сигнала. Выполнение этих операций непосредственно в дополнительной аппаратуре ПП ССТП сопряжено с существенными аппаратными затратами. Поэтому для системы НКИ предлагается вариант передачи цифровых сигналов, принятых всеми 12-ю приемными каналами на каждой из частот, на ЦОИиУ с реализацией цифрового диаграммообразования (ЦДО) и поляризационной адаптации (ПА) в программном виде на ЦОИиУ. Требуемые характеристики дополнительных приемных каналов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Требуемые характеристики дополнительных приемных каналов приемной станции

Наименование характеристики	Значение характеристики
Число приемных каналов для вертикальной/горизонтальной поляризаций	6/6 – для частоты 150 МГц 6/6– для частоты 400 МГц
Радиус кольцевой антенной решетки	1 метр – для частоты 150 МГц 0,375 м – для частоты 400 МГц
Коэффициент шума входного малошумящего усилителя, дБ	1...2
Диапазон рабочих частот, МГц	150,0±1; 400,0±1
Частота дискретизации (после преобразования в квадратуры), МГц	1,5
Число разрядов АЦП (со знаковым) для каждой квадратурной составляющей	4

Структура одного приемного канала показана в правой части рис. 1. Для частоты 150 МГц он содержит входной полосно-пропускающий фильтр $150 \text{ МГц} \pm 2 \text{ МГц}$, МШУ, бесквадратурный АЦП с частотой дискретизации десятки МГц с преобразованием сигналов в соответствующей зоне Найквиста и устройства цифровой обработки. Устройство цифровой обработки выполняет функции преобразование действительного цифрового сигнала в квадратурный с одновременной фильтрацией квадратурных составляющих, децимации, усечения разрядности и упаковки отсчетов квадратурных составляющих сигнала в один байт. Сформированный цифровой поток по Ethernet поступает на управляющую мини-ЭВМ для буферизации и передаче по каналам связи на ЦОИиУ.

Оценим требуемую пропускную способность каналов связи между приемной станцией ССТП и ЦОИиУ, и требуемый объем памяти для хранения цифровых сигналов при невозможности обеспечения передачи данных в реальном масштабе времени или при нарушениях связи. При указанных в табл. 3 параметрах общий цифровой поток от приемной станции ССТП составит за 1 секунду приема сигналов $6 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1,5 \cdot 10^6 = 3,6 \cdot 10^7$ байт=34,33 Мбайт. Для сокращения объема передаваемых сигналов будем полагать, что относительное время приема составляет величину порядка 0,5, например, 1 с – прием и 1 с – пауза. Тогда общий объем записываемых сигналов за время видимости спутника (в среднем – около 12 минут) составит около 12 Гбайт. Передача такого объема данных в масштабе времени, близком к реальному, потребует скорости передачи данных на уровне 120 Мбит/с, что является стандартным для каналов связи по стандарту PON.

Требования к аппаратным и программным средствам центра обработки информации и управления

ЦОИиУ состоит из телекоммуникационного оборудования, сервера обработки сигналов и почтового сервера. ЦОИиУ в алгоритмическом виде решает следующие задачи:

запрос и прием данных от центра контроля и управления ГНСС GPS по эфемеридам навигационных спутников GPS и прогнозирование местоположения навигационных спутников для произвольного момента времени;

вычисление (уточнение) орбитальных параметров наноспутников-ретрансляторов, вычисление их текущих координат, дальности, азимута и угла места наблюдения с приемных станций ССТП;

определение моментов начала и окончания приема сигналов от НР на ССТП и номеров спутников GPS, видимых одновременно с НР и ССТП; расчет доплеровских сдвигов частот принимаемых сигналов;

выдачу информации о моментах вхождения НР в зону приема сигналов на ССТП и продолжительности сеанса связи;

прием данных (отсчетов сигналов), поступающих по каналам Интернет от приемных станций ССТП, и их буферизация на SSD;

внутрипериодную обработку принятых на частотах 150/400 МГц сигналов по всем приемным станциям ССТП, приемным каналам, видимым навигационным спутникам и каналам по доплеровскому сдвигу частоты с учетом неконтролируемых сдвигов частоты гетеродинов аппаратуры ретрансляции и дополнительного приемного канала ССТП;

оценивание весовых коэффициентов приемных каналов, максимизирующих отношение сигнал/шум на выходе системы обработки;

цифровое диаграммообразование сигнала суммарного канала из результатов внутрипериодной обработки по всем приемным станциям ССТП и всем видимым НС;

компенсацию миграции дальности и частоты, когерентное и некогерентное накопление принятого сигнала по всем ССТП и всем навигационным спутникам;

оценивание разности времени задержки сигналов 150/400 МГц, пересчет в оценку ПЭС на трассах СР-ССТП и усреднение оценок по всем видимым НС [7];

оценивание координат СР в разовых измерениях и уточнение на этой основе его орбитальных параметров.

Требуемые характеристики аппаратных и программных средств ЦОИиУ приведены в таблице 4.

Таблица 4. Требуемые характеристики вычислительных и программных средств ЦОИиУ

Наименование характеристики	Значение характеристики
Входящие каналы	до 12 каналов xPON с пропускной способностью не менее 1 Гбит/с
Исходящие каналы	1 канал с пропускной способностью 1 Гбит/с
Сервер обработки принятых сигналов и оценивания ПЭС	Процессор Intel Core i9-14900KS (24 ядра, 32 потока) или аналоги от Ryzen + внешняя GPU серии 4080/4090 + RAM 32ГБ DDR5 и выше + NVMe SSD от 2ТБ
Сервер выдачи данных за текущее время и за конкретную дату	Процессор Intel Core i7-13700K (16 ядер, 24 потока) или аналоги от Ryzen + RAM 32ГБ DDR4/DDR5 + NVMe SSD от 2ТБ
База данных	PostgreSQL, 16-ядерный процессор (например, Intel Xeon или AMD EPYC), 4x NVMe SSD в RAID 10(для повышения скорости чтения/записи и отказоустойчивости), ОЗУ от 16ГБ
База данных на файловой системе	Процессор Intel Core i7 или AMD Ryzen 7, 16ГБ RAM, SQLite

Список использованных источников

1. Куницын, В. Е. Радиотомография ионосферы / В. Е. Куницын, Е. Д. Терещенко, Е. С. Андреева. – М.: Физматлит, 2007. – 336 с.
2. Ясюкевич, Ю.В. Развитие диагностических возможностей приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга состояния ионосферы и коррекции ионосферной ошибки в радиотехнических системах Дисс. доктора физико-математических наук. Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. – 300 с.
3. Determination of total electron content in the ionosphere over the territory of the Republic of Belarus based on global navigation satellite systems data / A. O. Naumov [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series. – 2024. – Vol. 69, № 1. – P. 53–64.
4. Naumov, A., Khmarskiy, P., Byshnev, N., & Piatrouski, M. (2023). Methods and software for estimation of total electron content in ionosphere using GNSS observations. *Engineering Applications*, 2(3), 243–25310.
5. Каплярчук, Е.А. Состав, структура и задачи системы низкоорбитального контроля ионосферы над территорией Республики Беларусь и прилегающими регионами / Е. А. Каплярчук, С. В. Козлов, А.М. Крот, И.Э. Савиных, А.С. Шапкин// в наст. сборнике.
6. Семейство наноспутников изучения ионосферы на базе платформы SamSat разработки Самарского университета / И. В. Белоконов [и др.] // Восьмой Белорусский космический конгресс : материалы конгресса : в 2 т., Минск, 25–27 окт. 2022 г. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2022. – Т. 1. – С. 167–170.
7. Способ оценивания полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS / И. В. Белоконов [и др.] // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 2. – С. 7–27. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27>.