

Ионозонд вертикального и наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом Ионозонд-МС

1 Мирровая сеть средств ЛЧМ-зондирования

Высокие потребительские качества ЛЧМ-сигналов привели к широкому использованию их в военной технике, коммерческих системах связи и исследовательских установках. Известно о сети ЛЧМ-ионозондов вертикального зондирования с использованием коммутации псевдослучайной последовательностью, созданной японским институтом NICT (National Institute of Information and Communications Technology) [Chau et al., 2011]. Организована широкомасштабная программа наблюдений на базе сети усовершенствованных ЛЧМ-ионозондов в Австралии (SpICE — Spatial Ionospheric Correlation Experiment) [Harris et al., 2012] (рисунок 1.1).

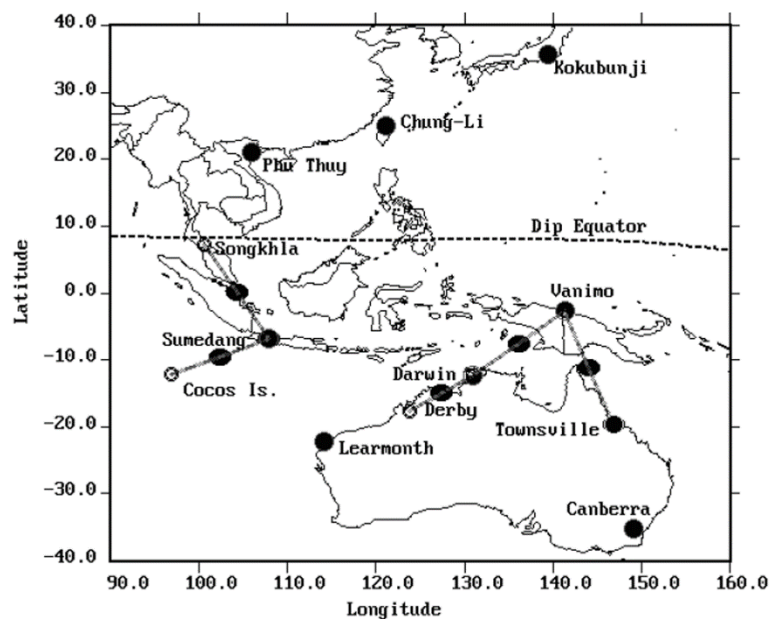


Рисунок 1.1 — Сети ЛЧМ-зондирования в Юго-Восточной Азии и Австралии

На сайте Sodankylä Geophysical Observatory, University of Oulu, Sodankylä, Finland [www.sgo.fi/Data/Ionosonde/ionosonde.php], имеется информация о ионозонде с непрерывным ЛЧМ-сигналом с антеннами, разнесенными на 900 м [Kozlovsky et al., 2013]. Несмотря на принципиальную совместимость оборудования и режимов работы, сети

ЛЧМ-зондирования разных стран практически не связаны между собой и, в отличие от DPS-4 [Reinisch et al., 2008], слабо интегрированы в общую систему ионосферного зондирования.

В России разработка ЛЧМ-ионозондов ведется независимо от зарубежных аналогов с 80-х гг. прошлого столетия [Иванов и др., 2003] усилиями сотрудников образовательных (МарГТУ, НИРФИ, РГУ) и академических организаций (ИСЗФ СО РАН, ИЗМИРАН). Наряду с решением технологических вопросов, проводились интенсивные координированные исследования наклонного распространения радиосигналов коротковолнового диапазона на трассах различной протяженности, вплоть до кругосветных [Иванов и др., 2003; Вертоградов и др., 2011]. В последние годы развивается сеть наклонных ЛЧМ-радиотрасс Росгидромета [Толмачев и др., 2014]. Сотрудниками ЮФУ разработан ЛЧМ-ионозонд-радиопеленгатор, который в бистатическом режиме одновременно измеряет ключевые характеристики ионосферного канала (дистанционно-частотные, амплитудно-частотные и угловые частотные характеристики) во всем диапазоне частот прохождения КВ-радиосигналов. С использованием данного инструмента проведены экспериментальные исследования характеристик естественных и искусственных возмущений ионосферы [Урядов и др., 2013, 2017].

Чаще всего ЛЧМ-сигналы применяются при НЗ, которое наиболее полно позволяет раскрыть их преимущества. Применение непрерывных сигналов с ЛЧМ при ВЗ осложняется необходимостью непрерывной работы передатчика и просачиванием прямого сигнала в приемный тракт [Fenwic, Lomasney, 1968; Филипп и др., 1991]. Одним из вариантов решения этой проблемы является использование коммутации псевдослучайной последовательностью [Barry, 1971; Pool, 1979; Иванов и др., 2007; Pezzorane et al., 2013]. За счет применения псевдослучайной последовательности формируются интервалы передачи и приема случайной длительности, что обеспечивает равновероятный прием сигналов по всему рабочему диапазону

дальностей. Данный способ сопровождается потерями энергии сигнала, которые при заданном отношении сигнал/шум необходимо компенсировать увеличением пиковой мощности передатчика, что ухудшает электромагнитную совместимость. Кроме того, возникают дополнительные коммутационные и внутрисистемные помехи, пропорциональные мощности передатчика, снижающие качество ионограмм и уменьшающие отношение сигнал/шум. Еще одним существенным недостатком данного способа является затруднительность одновременной работы в других режимах. Известно о существовании зарубежных исследовательских сетей ионозондов вертикального и наклонного ЛЧМ-зондирования в Юго-Восточной Азии и Австралии, реализующих эту идею [Lynn et al., 2004; Ha Duyen Chau et al., 2011].

Второй вариант решения проблемы применения непрерывных ЛЧМ-сигналов при ВЗ основан на том, что теоретически, при наличии идеального излучателя и приемника ЛЧМ-сигнала, ограничений на расстояние между приемником и передатчиком ЛЧМ-ионозонда нет. Сигнал прямого (земного) прохождения от излучателя к приемнику имеет фиксированную (близкую к нулевой) задержку и может быть регулярным образом устранен с ионограммы. На практике встает проблема спектральной чистоты сигнала передатчика и перегрузки входных трактов приемных устройств. Главным ограничением на пути уменьшения расстояния между приемным и передающим пунктом является малый двухсигнальный динамический диапазон приемных устройств, построенных по классическим аналоговым схемам. Эксперименты [Barry, Fenwick, 1965] показали, что разнесение приемника и передатчика на расстояние 5–20 км позволяет устранить данный эффект, однако требует оборудования отдельных приемного и передающего пунктов, введения системы синхронизации, а это приводит к значительному удорожанию стоимости ионозонда. Результаты экспериментов по разнесению антенн зонда на расстояние около 100 м показали принципиальную работоспособность данного варианта, но для повышения

качества данных требуется или снижение уровня внутрисистемных помех, или повышение уровня изоляции приемных и передающих антенн [Fenwic, Lomasney, 1968].

Как правило, современные ЛЧМ-ионозонды работают в диапазоне 1–30 МГц со скоростями перестройки 100–1000 кГц/с. Сквозность зондирования составляет 15 или 5 мин, в отдельных случаях 1 мин. Передающие устройства оснащены формирователями на основе микросхем прямого цифрового синтеза, что позволяет получать сигнал высокой спектральной чистоты относительно небольшими усилиями. На прием применяются доработанные связные приемники, которым в качестве гетеродинов подается сигнал от формирователей, аналогичных применяемым в передающих устройствах. Отдельные группы начали разработку приемных устройств на основе приемников прямого цифрового преобразования, но отсутствие специализированных микросхем для приема ЛЧМ-сигналов сдерживает их развитие.

На передачу на коротких и вертикальных трассах применяются ромбические и дельтаобразные антенны с высотой центральной мачты до 100 м. На прием применяются дипольные и дельтаобразные антенны, как правило, меньших размеров, чем передающие.

2 Структура ионозонда вертикального и наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом

Результатом работы над созданием нового поколения инструментов для сети ЛЧМ-зондирования ИСЗФ СО РАН явилось универсальное решение для комплексных исследований распространения сигналов КВ-диапазона. Автором был разработан новый ионозонд вертикального и наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом (далее «Ионозонд-МС»).

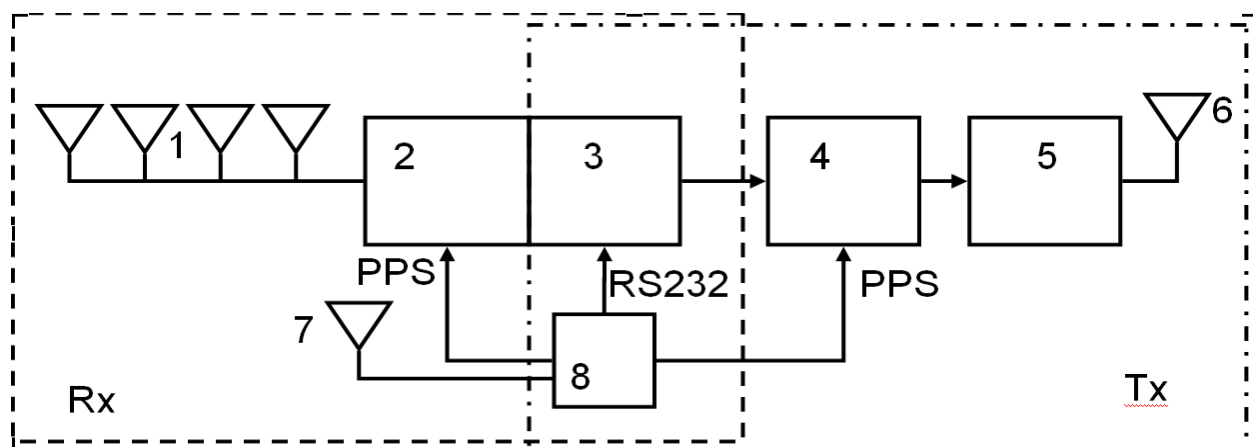


Рисунок 1.6 — Структурная схема «Ионозонда-МС»:

1 — массив приемных антенн, 2 — плата цифрового приема и обработки, 3 — управляющий компьютер, 4 — цифровой синтезатор, 5 — усилитель мощности, 6 — передающая антенна, 7 — антенна приемника сигналов ГНСС (глобальных навигационных спутниковых систем), 8 — синхронизирующий приемник сигналов ГНСС.

Основной особенностью «Ионозонда-МС» является большое количество программно-контролируемых независимых приемных каналов и высокий динамический диапазон радиоприемных устройств класса идеальных программных радиосистем при относительно небольшой конечной стоимости изделия. Это позволило реализовать наблюдения несколькими методами одновременно без разнесения циклограмм их работы [Медведев и др., 2008].

На рисунке 1.6 приведена структурная схема «Ионозонда-МС». Можно выделить (рисунок 1.6) три основных блока: приемную часть (**Rx**), передающую часть (**Tx**) и устройство синхронизации. Далее проводится более подробный разбор состава, принципов построения и характеристик каждого из этих блоков.

2.1 Структура приемного устройства

Приемное устройство «Ионозонда-МС» представляет собой многоканальный приемник ЛЧМ-сигналов, построенный с использованием программно-определяемых радиосистем по схеме прямой оцифровки с широкополосным неперестраиваемым преселектором на входе. Составные части приемника ЛЧМ-сигналов и взаимосвязи между ними показаны на рисунке 1.7.

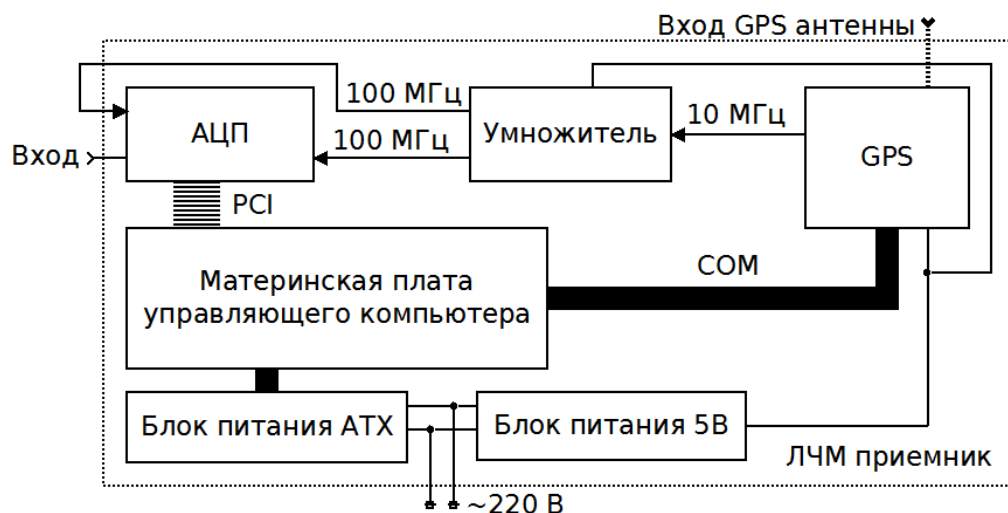


Рисунок 1.7 — Блок-схема приемника ЛЧМ-сигналов

Основные характеристики приемника сведены в таблицу 1.1. Основой для построения приемника стала плата АЦП. Для того чтобы плата могла работать в режиме приема ЛЧМ-сигналов, требуется ее тактирование генератором тактовой частоты высокой стабильности, привязка всех алгоритмов работы к точному времени и специальное программное обеспечение, позволяющее сформировать ЛЧМ-сигнал средствами встроенного цифрового гетеродина.

Таблица 1.1. Характеристики приемника ЛЧМ-сигналов

| Характеристика | Значение |
|--|------------------|
| Диапазон рабочих частот | 1–170 МГц |
| Скорость перестройки частоты | 0, 50–5000 кГц/с |
| Режимы работы | ВЗ, НЗ |
| Ширина полосы пропускания | 8–80 кГц |
| Формат выходных данных | wav, dat, sbf |
| Чувствительность в рабочем диапазоне | 0,5 мкВ, не хуже |
| Количество каналов оцифровки (гетеродинирования) | 4(16) |

Специальное программное обеспечение, разработанное автором, позволяет автоматически проводить сеансы ЛЧМ-зондирования в соответствии с режимами, заданными в программе наблюдений, и обеспечивает непрерывную автономную работу комплекса в режиме автоматического сбора данных и отправки их в удаленное хранилище. Диапазон возможных параметров работы каждого из независимых

программных каналов обработки принятых сигналов обеспечивает совместимость с отечественными и зарубежными ЛЧМ-ионозондами.

Для обеспечения надежной синхронизации и коррекции местной шкалы времени используется высокостабильный источник опорной частоты, подстраиваемый по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Его роль выполняет специализированный (синхронизирующий) приемник сигналов ГНСС со встроенным термостатированным подстраиваемым кварцевым генератором и собственной шкалой времени на его основе. Использование таких синхронизирующих приемников позволяет исключить ошибки при сбоях в работе ГНСС (отсутствие или недостаточное количество наблюдаемых спутников, превышение допустимой погрешности определения времени), а также производить оперативное слежение за состоянием опорного генератора. Алгоритм работы таких приемников основан на многократном измерении временного положения импульса привязки к точному времени (так называемый Pulse Per Second, PPS) по внутренней шкале и статистической обработке полученных данных. Дополнительно при каждом измерении проводится проверка состояния приемника сигналов ГНСС. Развитая система самодиагностики и полностью автоматическая привязка к шкале точного времени выгодно отличает данное решение от использовавшихся ранее систем синхронизации при гораздо более низкой стоимости владения и обслуживания.

Данные приемники позволяют синхронизовать шкалу времени со шкалой точного времени UTC_{GPS} GPS-приемника, формируют ежесекундные импульсы привязки к точному времени и коды текущего времени, передаваемые по последовательному интерфейсу RS-232, а также имеют выход встроенного высокостабильного опорного генератора частотой 10 МГц, подстраиваемого по сигналам ГНСС.

Таблица 1.2. Характеристики синхронизирующего приемника ГНСС

| | |
|--|--------------|
| Характеристики | |
| Наличие 10МГц подстраиваемого генератора и собственной шкалы времени | Да |
| Принимаемые спутниковые навигационные системы | GPS |
| Точность привязки | 15 нс |
| Интерфейс | RS232 |
| Уход часов в режиме удержания | 1 мкс за 2 ч |

Принцип работы традиционных аналоговых приемных устройств сильно отличается от принципа работы приемных устройств на основе программно-определяемых систем. Поэтому ниже будет подробно разобрана конкретная реализация такого устройства на примере одного канала приема приемника ЛЧМ-сигналов «Ионозонда-МС» (рисунок 1.8).

Основные элементы цифровой части приемника сосредоточены в модуле цифрового приемника. Этот модуль производит канальную фильтрацию и демодуляцию сигнала. Основные компоненты модуля — высокочастотный АЦП (16 бит 100 МГц), цифровой квадратурный понижающий преобразователь DDC и процессор цифровой обработки сигналов (ЦОС). С выхода модуля информационный поток демодулированных данных поступает в управляющую ЭВМ для дальнейшей обработки.

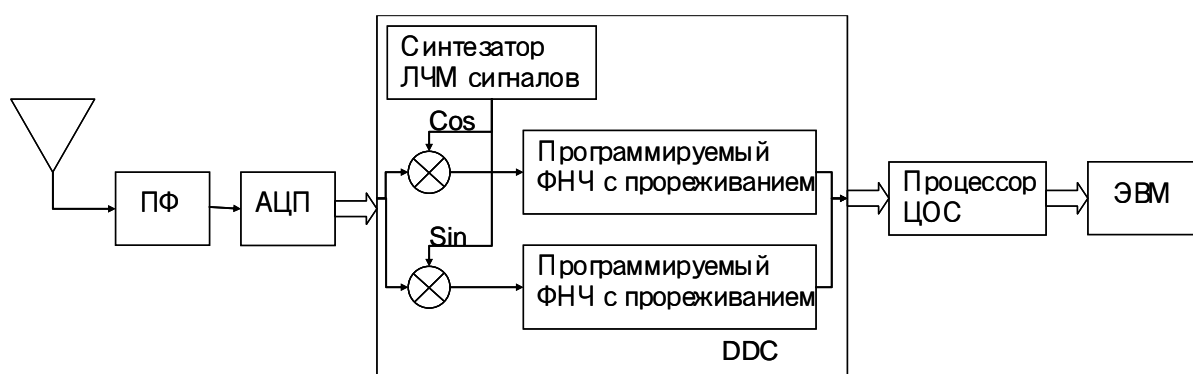


Рисунок 1.8 — Блок-схема одного канала цифрового приемника: ПФ — полосовой фильтр; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ФНЧ — фильтр низких частот; процессор ЦОС — процессор цифровой обработки сигналов

В модуле цифрового приемника отсчеты с выхода АЦП обрабатываются DDC, который имеет два умножителя, синусный и косинусный генератор отсчетов, идентичные каналы низкочастотных фильтров с прореживанием. Функции DDC — преобразование информативного спектра частот в область низких (нулевых) частот, квадратурная фильтрация и децимация (прореживание) отсчетов сигнала. По реализуемым функциям DDC — цифровой приемник прямого преобразования. Частота настройки внутреннего генератора может изменяться в диапазоне от 0 до половины тактовой частоты DDC. Прореживание отсчетов сигнала производится для того, чтобы скорость потока данных с выхода DDC была сообразна ширине спектра выходного сигнала. Следует отметить, что на выходе DDC отношение сигнал/шум выше, чем на входе, из-за эффекта процессорного усиления. Возрастание отношения сигнал/шум в некоторых случаях весьма значительное и составляет 20–40 дБ.

2.2 Структура передающего устройства

Передающая часть ионозонда выполнена на основе микросхемы синтезатора прямого цифрового синтеза и блочного твердотельного усилителя мощности. На рисунке 1.14 приведена блок-схема ЛЧМ-передатчика «Ионозонда-МС».

Синтезаторы на основе прямого цифрового синтеза не имеют сравнимой по функциональности и качеству выходного сигнала альтернативы. Система управления передающей частью ионозонда содержит программно-алгоритмические и технические средства для установки параметров: режимов зондирования, автоматической работы с заданной периодичностью, поддержания заданной точности привязки и текущего контроля циклов работы.

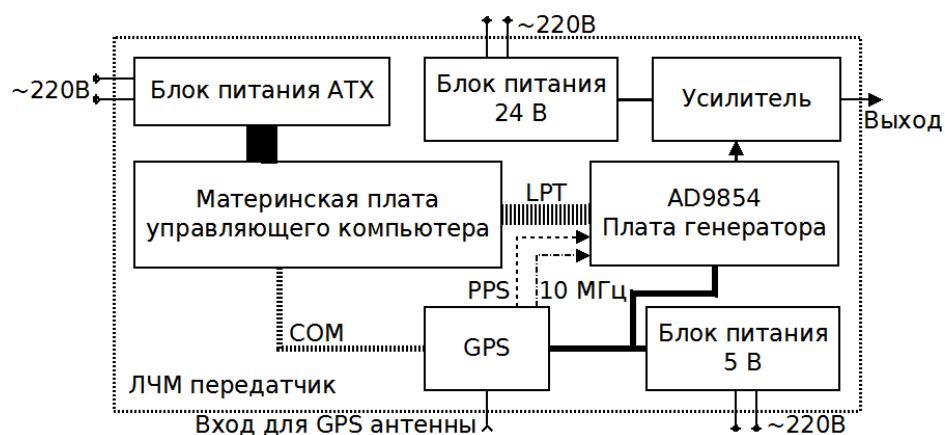


Рисунок 1.14 — Блок-схема ЛЧМ передатчика

Для формирования ЛЧМ-сигналов в разработанном ионозонде применяется оценочная плата, представляющая законченное устройство, в состав которой входят: чип цифрового 48-разрядного синтезатора прямого синтеза, фильтр нижних частот с частотой среза 120 МГц, параллельный и последовательный интерфейсы для подключения синтезатора к ПК. Чип цифрового 48-разрядного синтезатора прямого синтеза является высоко интегрированным устройством, использующим современную технологию прямого цифрового синтеза (Direct Digital Synthesizer, DDS) и позволяющим синтезировать сигналы с точностью установки частоты до 1 мкГц в диапазоне частот 0,000001 Гц – 150 МГц при тактовой частоте 300 МГц. 12-разрядный ЦАП на выходе синтезатора позволяет получить высокие характеристики по реальному динамическому диапазону и отношению сигнал/шум синтезированного ЛЧМ-сигнала.

Синтезатор имеет два набора идентичных регистров (рабочие и буферные), которые позволяют полностью запрограммировать работу синтезатора в течение одного сеанса ЛЧМ: рабочие регистры программируются параллельным переносом всех данных из буферных регистров, которые, в свою очередь, программируются независимо и имеют индивидуальные адреса ввода/вывода. Перенос данных из буферных регистров в рабочие регистры осуществляется по переднему фронту внешнего сигнала «Update», и одновременно запускается синтезатор. После этого в буферные регистры загружаются новые данные, и следующим

сигналом «Update» синтезатор переводится в новый режим работы. Таким образом, переход с одного режима работы на другой осуществляется практически мгновенно (задержка между передним фронтом сигнала «Update» и началом работы синтезатора составляет всего 300 нс). Управление синтезатором осуществляется персональным компьютером (ПК) через параллельный LPT-порт.

Сводные характеристики передающей части ЛЧМ-ионозонда приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6. Характеристики передающей части ЛЧМ-ионозонда

| Параметры | Дискретность | Пределы |
|--|--------------|--------------------|
| Режимы зондирования | – | ВЗ, НЗ |
| Длительность сеанса, с | 1 | 1...3600 |
| Цикличность, с | 1 | 1...3600 |
| Задержка, с | 200 нс | -1...0...1 |
| Диапазон частот, Гц | 1 | 1000000...30000000 |
| Шаг приращения частоты, Гц | 0,000001 | 0,000001...1 |
| Скорость сканирования, Гц/с | – | 0...2000000 |
| Уровень выхода, % | 0,05 | 0...100 |
| Мощность, не более, Вт | – | 30 |
| Нестабильность опорного генератора, не более | – | $1 \cdot 10^{-9}$ |
| Погрешность хранения времени, не более, мкс | – | ± 5 |

В качестве широкополосного оконечного усилителя мощности был использован полупроводниковый блочный усилитель. Данный усилитель имеет встроенный блок питания, цепи защиты от перегрева и максимальную выходную мощность 30 Вт.

2.3 Антенная система

Антенная система должна обеспечить оптимальные условия для проведения зондирования на выбранной системе трасс. Общими требованиями для передающих и приемных антенн являются ориентированность максимумов диаграммы направленности (ДН) по направлению прихода и излучения сигналов, а также равномерность параметров антенн по диапазону рабочих частот. При работе на коротких трассах используют антенны с высокими углами места максимума ДН, а на

длинных трассах — с малыми углами места максимума ДН в вертикальной плоскости и максимумом ДН в направлении принимаемой или излучающей станции в азимутальной плоскости.

Передающая антенна должна обеспечивать излучение ЛЧМ-сигнала в заданном направлении, иметь хорошее согласование с усилителем мощности передающего устройства во всем диапазоне рабочих частот зондирования. Для передающих антенн необходимо дополнительно обеспечить электрическую прочность согласно максимальной излучаемой мощности. При работе на несколько приемных пунктов необходима установка нескольких соответственно направленных антенн либо использование антенны с изменяемой ДН.

Приемная антенна должна обеспечивать необходимый уровень принимаемого сигнала на входе приемного устройства. При проектировании системы трасс, имеющих разные азимутальные направления, на приемном комплексе следует устанавливать систему из нескольких антенн, переключаемых в соответствии с программой приема.

Основное отличие задачи разработки антенной системы ЛЧМ-ионозонда от задачи построения антенных систем, предназначенных для связных целей, и антенных систем импульсных ионозондов заключается в том, что ЛЧМ-ионозонд работает в диапазоне частот 1.5–30 МГц и непрерывно перестраивается по указанному диапазону, что исключает возможность применения согласующих устройств. Другая сложность состоит в нестабильности диаграммы направленности по диапазону. Для проведения вертикального зондирования желательно, чтобы основной лепесток ДН был направлен в зенит во всем диапазоне рабочих частот. Один из путей решения данных проблем — создание многоантенных систем, состоящих из диапазонных антенн, размещаемых на мачтах с высотой подвеса вплоть до 100 м. Большие размеры, сложность эксплуатации и большая стоимость не позволяют применять такие антенны в широкой практике. Для отечественных импульсных ионозондов были разработаны типовые

ромбические и дельта-антенны с высотой центральной мачты 42 м и 27 м соответственно [Васильев и др., 1961].

В существующих ионозондах используются дельта-антенны, диполи с переключаемой длиной, ромбические антенны. Разработчиками зарубежных ионозондов CADI и DPS-4 используются вертикальные ромбические антенны на мачте высотой 42 м и дельта-антенны с высотой мачты 25 м [Morris et al., 2004]. В финской обсерватории Sodankylä установлен ЛЧМ-ионозонд AlfaWolf с передающей ромбической антенной с высотой центральной мачты 64 м [Ulich et al., 2010]. Одной из самых дорогих антенн, используемых в ионозондах, является передающая вертикальная логопериодическая антенна зарубежного ионозонда «Dynasonde», в которой используются четыре мачты высотой 32 м [Wright, 1998].

Создание качественных широкополосных направленных антенн в КВ-диапазоне неоправданно дорого, поэтому одним из требований к антенной системе комплекса являлась простота конструкции. Антенны типа дельта, как правило, используют одну несущую мачту, что облегчает их установку. Расположенная внизу точка питания антенны и относительная простота конструкции полотна определили выбор антенн такого типа. Низкая требуемая максимальная мощность излучения (до 100 Вт) позволяет принимать во внимание только характеристики конструктивной прочности антенной системы, до определенной степени позволяя считать достаточным запас электрической прочности.

Предельная достижимая эффективность работы антенны напрямую зависит от ее размеров. И если малые размеры приемных антенн до определенной степени можно компенсировать применением малошумящих усилителей и чувствительных радиоприемных устройств, то низкую эффективность передающих антенн нужно компенсировать увеличением мощности передающего устройства, которое к тому же гораздо более требовательно к согласованию волновых сопротивлений усилителя мощности и нагрузки. Поэтому, как правило, на передачу применяются как

можно более эффективные антенные системы, а на размеры приемных антенн большее влияние оказывают другие требования, например, удобство обслуживания, стоимость и требуемый размер площадки под установку. На рисунке 1.15 показаны модели реальных передающей и приемной антенн, созданные в программе MMANA.

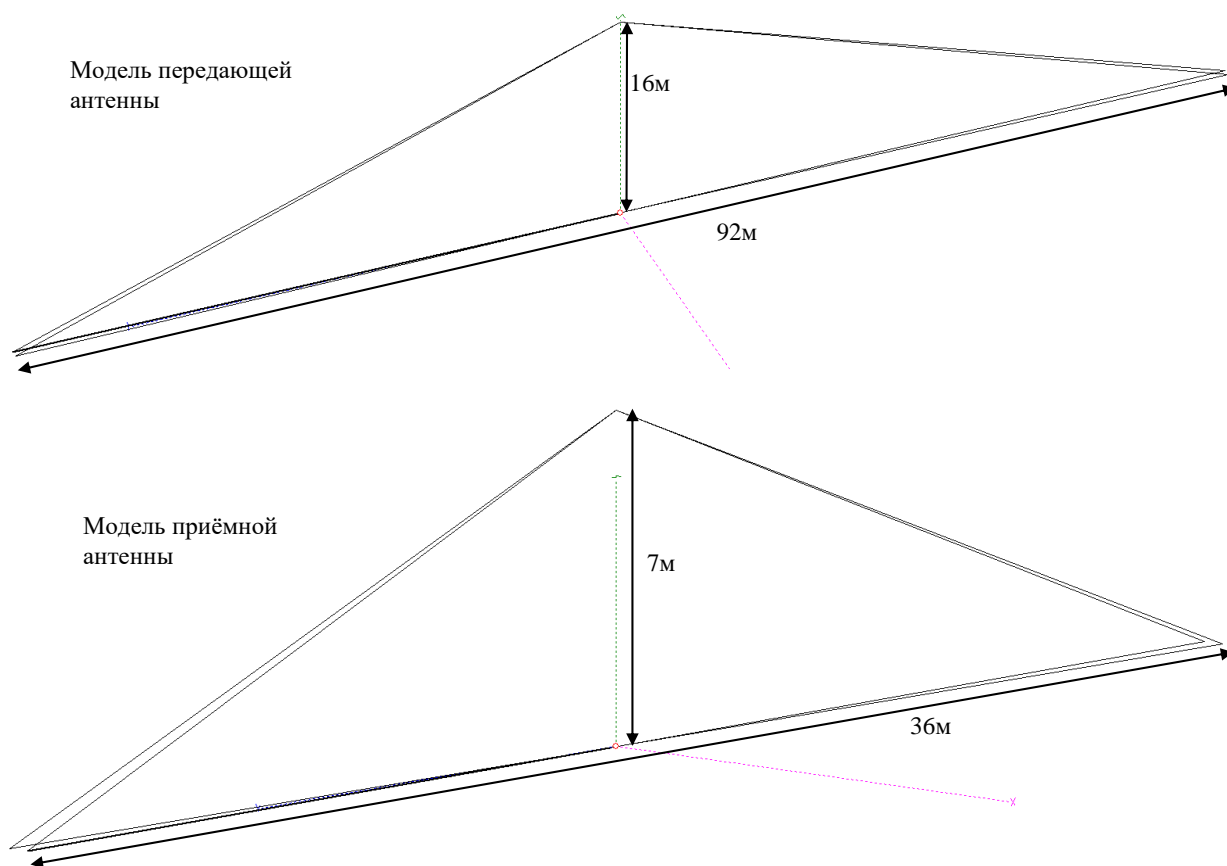


Рисунок 1.15 — Модели передающей и приемной антенн

Максимальная высота антенных мачт, воздвигаемых без подготовки бетонированных площадок и специальной техники, составляет около 20 м. Такие мачты имеют до четырех уровней оттяжек. Мачты высотой до 10 м требуют всего два уровня оттяжек, что существенно упрощает их конструкцию. Поэтому были спроектированы и построены два типа антенн: передающая на мачте высотой 19 м и приемные на мачте высотой 9 м. Сугубо практические соображения требуют, чтобы высота подвеса горизонтальной части дельты была не менее 2 м. Это позволяет не возводить защитных ограждений полотна от повреждения крупным рогатым скотом, а ограждать только оттяжки и места установки мачт. Ограничения по высоте

мачты до 19 м и минимальная рабочая частота ЛЧМ-ионозонда 1.5 МГц определили длину периметра антенного полотна порядка 200 м. При высоте подвеса вершины дельты 18 м и высоте нижней стороны над землей 2 м требуемая длина периметра передающей антенны достигается при размахе 90 м по горизонтали. Размеры полотна приемных антенн выбирались, исходя из размеров свободной площадки под их установку на полигоне. Для приемных полотен высота подвеса вершины антенны составила 9 м, высота над землей 2 м и размах 36 м. Антенное полотно было выполнено из двух медных тросов сечением 4 мм², протянутых от центра к краям. Расстояние на краях антенн между тросами составило 0.5 м.

3 Режимы работы ионозонда вертикального и наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом и получаемые данные

Использование современной элементной базы и программно-определяемых радиосистем позволило создать достаточно компактный и в то же время гибкий инструмент для диагностики ионосферы. Приемник и передатчик «Ионозонда-МС» собраны в двух стандартных корпусах форм-фактора 19” и высотой 4U. Внешний вид этих блоков показан на рисунке 1.16.

Мировая сеть ЛЧМ-зондирования состоит из большого набора различных инструментов, созданных в разное время разными группами. Кроме возможности работы с любым известным инструментом данной сети, «Ионозонд-МС» имеет возможность работы в режиме специальных наблюдений, отличающемся, например, высокой, вплоть до нескольких секунд, скважностью зондирования. Также имеется возможность приема узкополосных (10–50 кГц) сигналов от различных радиоисточников.

Основным видом первичной информации, получаемой на «Ионозонде-МС», являются ионограммы. С результатами работы ионозонда и предварительной обработки данных за предыдущие трое суток в реальном

времени можно ознакомиться на сайте ИСЗФ СО РАН
[http://dep1.iszf.irk.ru/CHIRP_ionogrames].



Рисунок 1.16 — Внешний вид «Ионозонда-МС»

Режим ВЗ ионосферы является основным способом исследования структуры ионосферы при помощи ионосферных станций. В данном способе измеряется время распространения импульса от ионозонда до отражающего слоя и обратно к приемнику сигнала, расположенному в том же месте, что и передатчик. Самый распространенный и известный в мире ионозонд DPS-4 [Reinisch et al., 2008] получает свои данные именно в режиме ВЗ. Поэтому вполне логично провести сравнение данных, получаемых «Ионозондом-МС» в режиме ВЗ, с данными, получаемыми на ионосферной станции DPS-4 в Иркутске. «Ионозондом-МС» ежеминутные измерения в режиме ВЗ ведутся в диапазоне от 1,3 до 10 МГц со скоростью перестройки частоты 500 кГц/с и пиковой мощностью излучения 8 Вт. Одновременно с ВЗ приемник «Ионозонда-МС» принимает сигнал СНЗ от ЛЧМ-передатчика мощностью 15 Вт, расположенного на расстоянии 120 км вблизи города Усолье-Сибирское и работающего в диапазоне от 1,5 до 10 МГц со скоростью перестройки 500 кГц/с. Во время проведения координированных наблюдений зонд также принимает сигналы НЗ от передатчиков непрерывных ЛЧМ-сигналов, расположенных в Норильске, Хабаровске и Магадане. Возможность получения ионограмм вертикального зондирования в формате SBF была использована для проведения сравнения результатов, получаемых

с помощью DPS-4 [Reinisch et al., 2008], расположенного в Иркутске, и «Ионозонда-МС», расположенного на расстоянии 100 км от Иркутска. На рисунке 1.17 представлен суточный ход характеристик ионосферных слоев, полученных 26.09.2017.

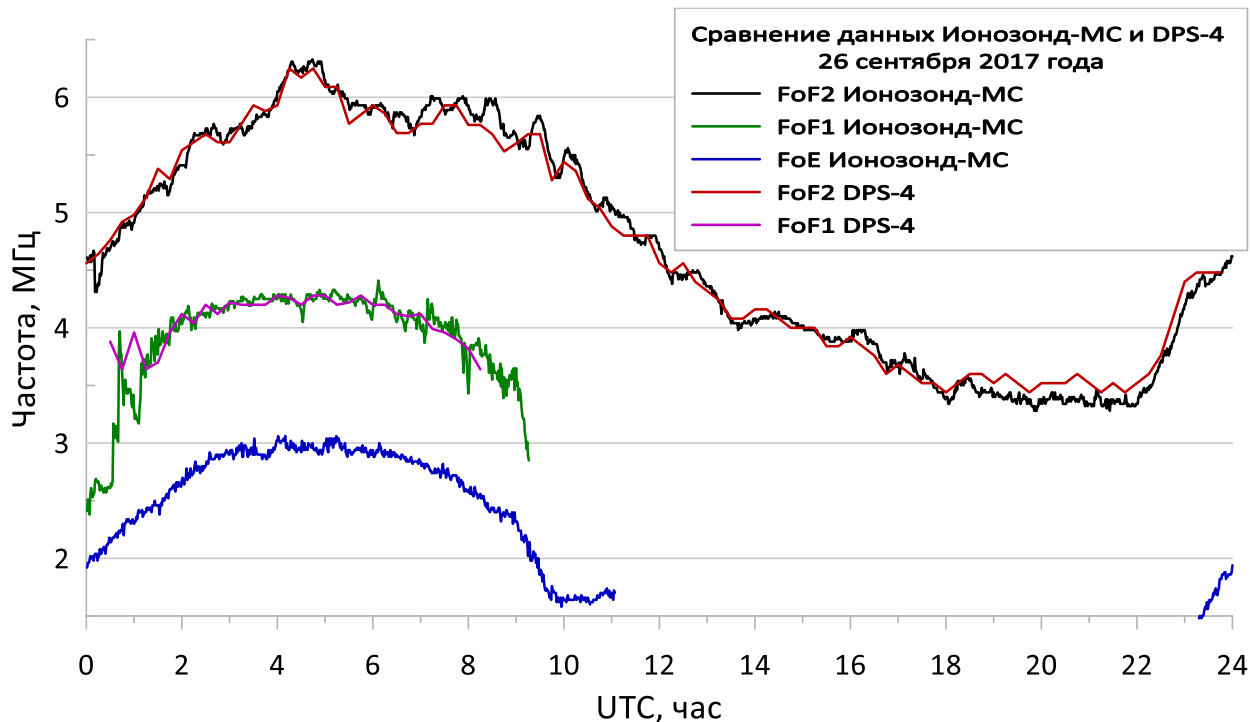


Рисунок 1.17 — Сравнение результатов зондирования DPS-4 (Иркутск) и «Ионозонда-МС» (Торы, Бурятия)

Существенным отличием в работе ионозондов являлась скважность зондирования. Стандартная скважность зондирования DPS-4 15 мин, «Ионозонда-МС» — 1 мин. Из рисунка 1.18 видно, что значения параметров ионосферных отражений, полученные на этих инструментах, близки друг к другу, отклонение между данными существенно меньше, чем значения характеристик. Различия, по всей видимости, обусловлены пространственным разнесением инструментов, и их анализ требует отдельных исследований. Рассматриваемый день характеризовался достаточно высоким уровнем поглощения в нижних слоях ионосферы, что явилось причиной отсутствия данных DPS-4 в нижней части диапазона (слой E). «Ионозонд-МС» гораздо чаще позволяет определить параметры отражений в условиях частичного поглощения, что говорит о превышении энергетического потенциала «Ионозонда-МС» над потенциалом DPS-4

несмотря на то, что мощность передатчика ЛЧМ-ионозонда (8 Вт) почти на два порядка меньше мощности передатчика DPS-4 (300 Вт).

Список литературы

Васильев Г.В. Панорамная автоматическая ионосферная станция АИС / Г.В. Васильев, К.Н. Васильев, Л.П. Гончаров // Геомагнетизм и аэрономия. — 1961. Т. 1, N 1.

Вертоградов Г.Г. Определение параметров ионосферной модели по результатам наклонного зондирования с помощью ЛЧМ ионозонда/пеленгатора / Г.Г. Вертоградов, С.В. Кубатко, В.П. Урядов // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2011. — Т. 16, N 5. — С. 35–40.

Иванов В.А. ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях / В.А. Иванов, В.И. Куркин, В.Е. Носов, В.П. Урядов, В.В. Шумаев // Известия Вузов. Радиофизика. — 2003. — Т. 46, N 11. — С. 919–952.

Иванов Д.В. Алгоритм работы однопозиционного вертикального ЛЧМ-ионозонда с минимальной излучаемой мощностью / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова // XIII Международная н.-т. Конференция «Радиолокация, навигация и связь» (RLNC-2007). — 2007. — Т. 3. — С. 2250–2260.

Медведев А.В. Новые возможности цифрового ЛЧМ-ионозонда / А.В. Медведев, И.Г. Брынько, А.Г. Ким, В.И. Куркин, Г.И. Литовкин, А.И. Орлов, А.В. Подлесный // Труды XXII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». — 2008. — Т. 1. — С. 37–40.

Толмачев С.В. Влияние рентгеновской вспышки 25 октября 2013 г. на характеристики радиосигналов на трассах наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы в европейской части России / С.В. Толмачев, А.Г. Чернов, В.В. Шумаев, А.А. Колчев, В.П. Урядов // Труды XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». — 2014. — Т. 1. — С. 112–115.

Урядов В.П. Позиционирование ионосферных неоднородностей и неровностей земной поверхности с помощью загоризонтного

коротковолнового радара / В.П. Урядов, Г.Г. Вертоградов, М.С. Скляревский, Ф.И. Выборнов // Изв. вузов. Радиофизика. — 2017. — Т. 60, N 9. — С. 770–786.

Урядов В.П. Радарные наблюдения F-рассеяния в среднеширотной ионосфере с помощью ионозонда – радиопеленгатора / В.П. Урядов, Г.Г. Вертоградов, Е.Г. Вертоградова // Известия Вузов. Радиофизика. — 2013. — Т. 56, N 1. — С. 1–11.

Филипп Н.Д. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере / Н.Д. Филипп, Н.Ш. Блаунштейн, Л.М. Ерухимов и др. — Кишинев: Штиница, 1991. — 288 с.

Barry G.H. A low power vertical-incidence ionosonde / G.H. Barry // IEEE Trans. Geosci. Electron. — 1971. — GE-9(2). — P. 86–82.

Barry G.A. HF measurements using extended chirp-radar techniques / G.A. Barry, R.B. Fenwick // Radioscience Lab. Stanford Univ., Stanford Calif. SU-SEL-65-058. — 1965. — N 103.

Chau H.D. Ionospheric studies in Vietnam. 2011 / H.D. Chau, L.T. Thanh, N.T. Dung // Proceeding of SEALION Symposium 2011 (International Southeast Asia Low-Latitude Ionospheric Observation Network), Bangkok, Thailand. — 2011. — P. 27-28/01/2011.

Fenwic R.B. Test of monostatic FM-CW vertical incidence sounder / R.B. Fenwic, J.M. Lomasney // Radioscience Lab. Stanford Univ., Stanford Calif. SU-SEL-68-077. — 1968. — N 144.

Harris T.J. SpICE: A program to study small-scale disturbances in the ionosphere / T.J. Harris, M.A. Cervera, D.H. Meehan // J. Geophys. Res. — 2012. — Vol. 117. — A06321, doi: 10.1029/2011JA017438.

Kozlovsky A. Rapid-run ionosonde observations of traveling ionospheric disturbances in the auroral ionosphere / A. Kozlovsky, T. Turunen, T. Ulich // J. Geophys. Res. Space Physics. — 2013. — Vol. 118. — P. 5265–5276. doi:10.1002/jgra.50474.

Lynn K.J.W. Combined TOPEX/Poseidon TEC and ionosonde observations of negative low-latitude ionospheric storms / K.J.W. Lynn, M. Sjarifudin, T.J. Harris, M. Le Huy // *Annales Geophysicae*. — 2004. — Vol. 22 (8). — P. 2837–2847.

Morris R.J. Southern polar cap DPS and CADI ionosonde measurements: 1. Ionogram comparison / R.J. Morris, D.P. Monselesan, M.R. Hyde et al. // *Advances in Space Research*. — 2004. — Vol. 33, N 6. — P. 923–929.

Pezzopane M. Low-latitude equinoctial spread-F occurrence at different longitude sectors under low solar activity / M. Pezzopane, E. Zuccheretti, P. Abadi, A.J. de Abreu, R. de Jesus, P.R. Fagundes, P. Supnithi, S. Rungraengwajiake, T. Nagatsuma, T. Tsugawa, M.A. Cabrera, R.G. Ezquer // *Ann. Geophys.* — 2013. — Vol. 31. — P. 153–162, doi:10.5194/angeo-31-153-2013.

Pool A.W.V. On the use of pseudorandom codes for “chirp” radar / A.W.V. Pool // *IEEE transaction on antennas and propagation*. — 1979. — Vol. AP27, N 4. — P. 480–485.

Reinisch B.W. Advancing digisonde technology: the DPS-4D / B.W. Reinisch, I.A. Galkin, G.M. Khmyrov et al. // *Radio Sounding and Plasma Physics, AIP Conf. Proc.* 974. — 2008. — P. 127–143.

Ulich T. The new Sodankula ionosonde / T. Ulich, T. Turunen, E. Turunen // 38th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany. — 2010.

Wright J.W. Ionosonde antennas / J.W. Wright // *Ionosonde network advisory group (IN7G), Ionospheric Station Information, Bulletin*. — 1998. — N 62.