

РЕГИСТРАЦИЯ ВАРИАЦИЙ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СДВ-ПЕРЕДАТЧИКОВ

А.С. Полетаев, А.Г. Ченский, Д.А. Токмачев

REGISTRATION OF AMPLITUDE AND PHASE VARIATIONS OF NAVIGATIONAL VLF-TRANSMITTER SIGNALS

A.S. Poletaev, A.G. Chensky, D.A. Tokmachev

Сверхдлинные (СДВ) радиоволны нашли широкое применение в радионавигационных системах. Непрерывная регистрация вариаций амплитуды и фазы СДВ сигналов позволяет проводить долговременный мониторинг ионосферы. Однако сигналы практически всех современных СДВ передатчиков манипулированы по частоте методом MSK, и при фазовых измерениях возникает задача разделения фазового дрейфа в волноводе Земля-ионосфера и изменений фазы, обусловленных модуляцией. В статье рассматриваются метод оценки фазы центральной несущей частоты и аппаратно-программный комплекс регистрации параметров СДВ радиосигналов. Приведены результаты моделирования, а также представлены экспериментальные данные.

Very low frequency (VLF) radio waves are commonly used in radio navigational systems. Continuous registration of VLF signal amplitude and phase variations enables to organize long-term monitoring of the Ionosphere. However, majority of the VLF transmitters use minimum shift keying (MSK) method thus phase measurements involve separating the phase drift in the Earth-Ionosphere waveguide from the phase changes caused by the modulation. The article describes a VLF receiver structure and demonstrates a method of evaluating of the central frequency carrier phase, results of modeling and experimental data.

Введение

Метод наклонного зондирования в сверхдлинноволновом (СДВ) диапазоне является одним из наиболее чувствительных косвенных методов мониторинга нижних слоев ионосферы. Волноводное распространение СДВ радиоволн обуславливает флуктуации амплитуды и фазы зондирующих сигналов, происходящие в соответствии с динамикой изменения параметров волновода Земля-ионосфера: проводимости стенок, высоты отражающего слоя и т. д. Решение задачи локализации неоднородностей ионосферы включает развертывание сети приемных станций – сверхдлинноволнового интерферометра [Полетаев и др., 2014].

Структура СДВ приемника

Цифровой СДВ приемник построен по принципу программно-определяемого радио (SDR), основные узлы показаны на рис. 1, а. В качестве приемных антенн используются ортогональные кольцевые рамки диаметром $D=0.8$ м, число витков $N=36$, диаметр жилы медного провода $d=0.8$ мм. Вблизи каждой антенны находится линейный малошумящий предварительный усилитель. По коаксиальному кабелю сигнал передается в центральный блок на входы полосовых фильтров 8 порядка, выделяющих сигналы ОНЧ станций в диапазоне от 16 до 28 кГц. Далее производится аналого-цифровое преобразование с помощью платы сбора данных L-Card E14-140M.

Ключевым звеном СДВ приемника является устройство синхронизации, являющееся источником синхроимпульсов старта сбора данных, обеспечивающих привязку к времени UTC секундными метками 1PPS, и синхроимпульсов запуска преобразования АЦП. При двухканальном приеме частота дискретизации равна 100 кГц на канал. Погрешность измерения фазы с помощью разработанного устройства для СДВ диапазона не хуже $\pm 0.81^\circ$ [Tokmachev et al., 2014]. Дальнейшая обработка сигналов происходит полностью на программном уровне в одноплатном компьютере МЮ-5270.

Метод вычисления фазы и амплитуды сигналов. В диапазоне ОНЧ работает большое количество радионавигационных станций (РНЧ), сигналы которых можно использовать в качестве зондирующих. Однако существует определенная специфика измерений фазы сигналов таких передатчиков. Некоторые фазовые РНЧ, например, «Альфа» (РДСН-20) излучает короткие радиоимпульсы в режиме телеграфа, и измерить фазу таких сигналов достаточно просто. Однако большинство ОНЧ передатчиков излучают сигналы с частотной манипуляцией с минимальным сдвигом (MSK), что создает необходимость разделения фазового дрейфа в волноводе Земля-ионосфера и изменений фазы, обусловленных модуляцией. Выбор именно таких станций для приема позволяет охватить большее количество трасс распространения сигналов: различные протяженности трасс, азимуты прихода волн, широты и др.

MSK сигнал на входе приемника может быть записан в виде

$$S_{\text{вх}}(t) = KA \cos \left[\omega_c t + \frac{a_k \pi t}{2T_b} + \theta(t) \right], \quad (1)$$

где K – коэффициент ослабления сигнала, вносимый каналом связи; A – амплитуда сигнала; ω_c – центральная (несущая) частота, Гц; $a_k = \pm 1$ – последовательность бит в виде кода NRZ; T_b – длительность одного бита, с; $\theta(t)$ – функция фазовых искажений сигнала, рад.

Особенностью MSK сигналов является линейное изменение начальной фазы центральной частоты на $\pm \pi/2$ за время передачи одного бита. При этом фаза радиоимпульсов логических нулей (лог.0) частоты $\omega_0 = \omega_c - \pi/2T_b$ и единиц (лог.1) частоты $\omega_1 = \omega_c + \pi/2T_b$ неразрывна, а девиация частоты $\Delta\omega$ определяется выражением $2\Delta\omega = \omega_1 - \omega_0 = \pi/T_b$.

Для определения $\theta(t)$ и K выполняется раздельное когерентное детектирование радиоимпульсов лог.0 и лог.1 двумя квадратурными демодуляторами. На рис. 1, б представлена блок-схема реализуе-

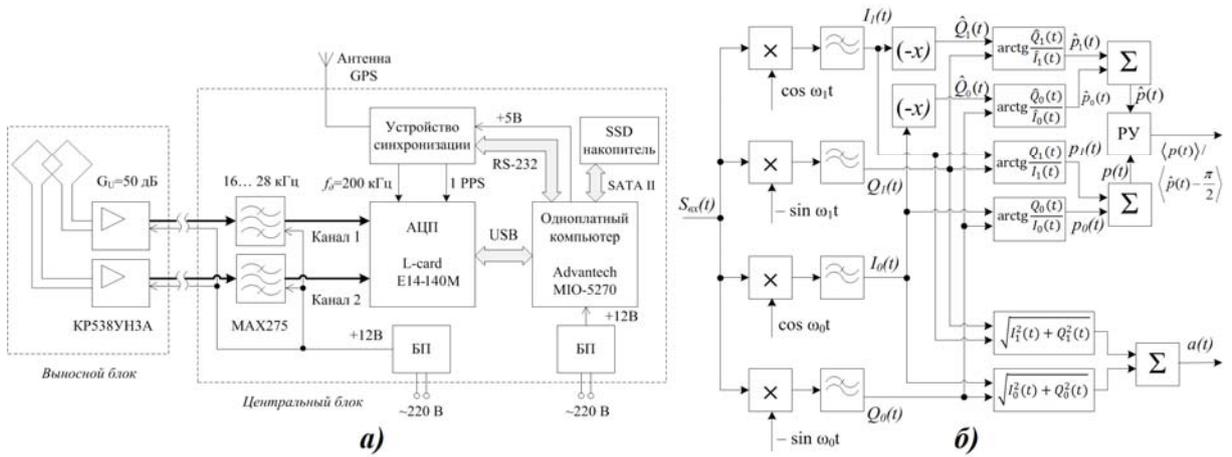


Рис. 1. Состав измерительного комплекса: а) структурная схема СДВ приемника; б) блок-схема программного детектора MSK сигналов.

Аналитические выражения для полученных компонент сигнала

Компоненты	Общий вид функции	Частота входного сигнала	
		ω_1	ω_0
$I_1(t)$	$\frac{KA}{2} \cos \left[(a_k - 1) \frac{\pi t}{2T_s} + \theta(t) \right]$	$\frac{KA}{2} \cos[\theta(t)]$	$\frac{KA}{2} \cos \left[-\frac{\pi t}{T_s} + \theta(t) \right]$
$Q_1(t)$	$\frac{KA}{2} \sin \left[(a_k - 1) \frac{\pi t}{2T_s} + \theta(t) \right]$	$\frac{KA}{2} \sin[\theta(t)]$	$\frac{KA}{2} \sin \left[-\frac{\pi t}{T_s} + \theta(t) \right]$
$p_1(t)$	$(a_k - 1)\pi t / T_s + \theta(t)$	$\theta(t)$	$-\pi t / T_s + \theta(t)$
$I_0(t)$	$\frac{KA}{2} \cos \left[(a_k + 1) \frac{\pi t}{2T_s} + \theta(t) \right]$	$\frac{KA}{2} \cos \left[\frac{\pi t}{T_s} + \theta(t) \right]$	$\frac{KA}{2} \cos[\theta(t)]$
$Q_0(t)$	$\frac{KA}{2} \sin \left[(a_k + 1) \frac{\pi t}{2T_s} + \theta(t) \right]$	$\frac{KA}{2} \sin \left[\frac{\pi t}{T_s} + \theta(t) \right]$	$\frac{KA}{2} \sin[\theta(t)]$
$p_0(t)$	$(a_k + 1)\pi t / T_s + \theta(t)$	$\pi t / T_s + \theta(t)$	$\theta(t)$
$\langle p(t) \rangle$	$\langle p_0(t) + p_1(t) \rangle$	$\langle \theta(t) \rangle$	$\langle \theta(t) \rangle$

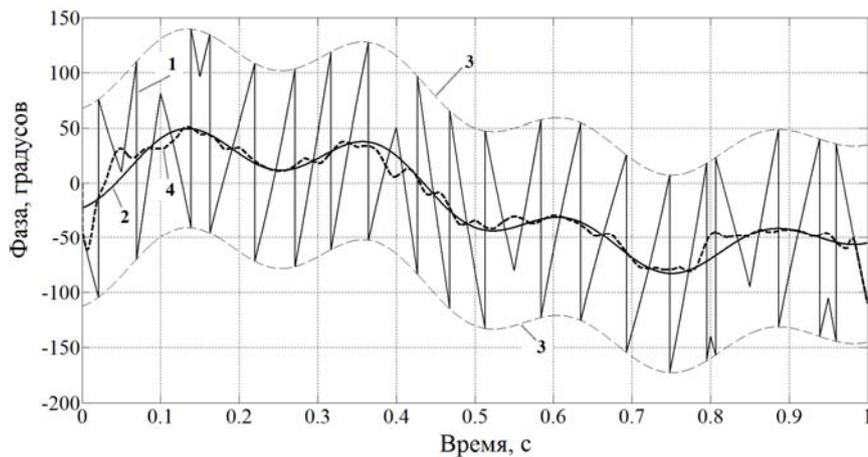


Рис. 2. Результаты проверки работы метода на модельных MSK сигналах: 1 – сумма фазовых характеристик $p(t)=[p_0(t)+p_1(t)]$; 2 – закон дрейфа фазы $\theta(t)$; 3 – огибающая функции $p(t)$; 4 – функция $\langle p(t) \rangle$ как результат скользящего усреднения $p(t)$

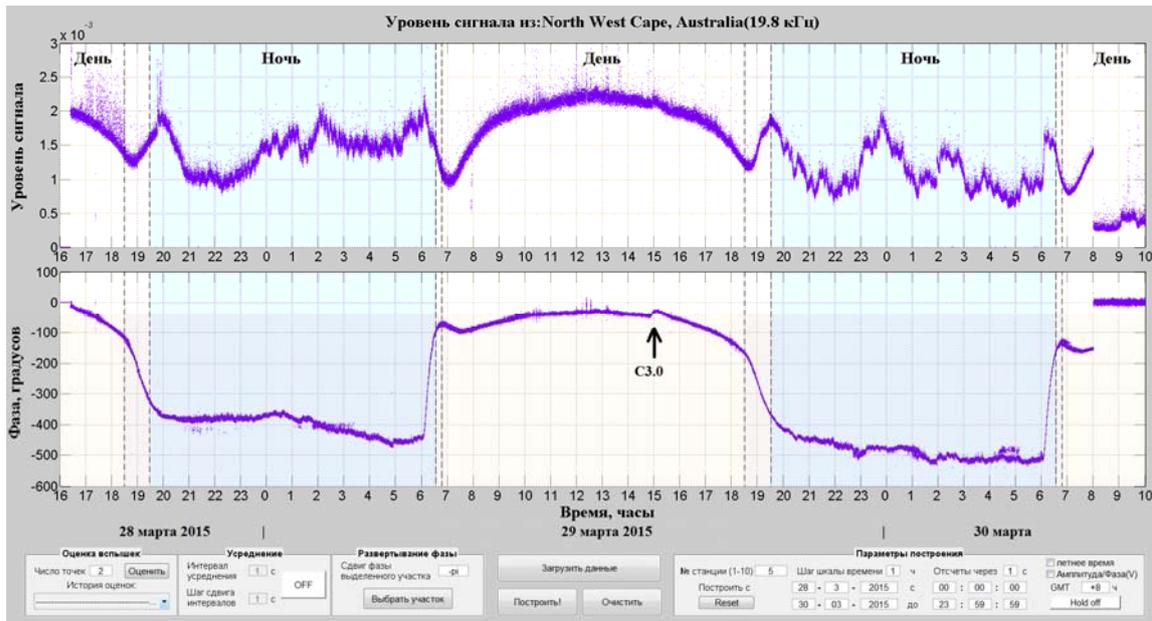


Рис. 3. Суточный ход амплитуды и фазы сигнала станции NWC (Австралия, 19.8 кГц): верхняя панель – амплитуда сигнала (отн. ед.); нижняя панель – фаза сигнала, время UTC+8.

мых операций, а в таблице приведены аналитические выражения получаемых при этом функций. При приеме лог.1 фазовая характеристика $p_1(t)=\theta(t)$, а при приеме лог.0 в этом детекторе $p_1(t)=[-\pi t/T_s+\theta(t)]$, т. е. имеем колебание на частоте $2\Delta\omega$. Аналогично для детектора лог.0. Статистическое усреднение суммы $p_0(t)$ и $p_1(t)$ дает искомую функцию $\theta(t)$. Все математические преобразования подробно изложены в [Засенко, 2014].

Достоинством данного метода является независимость измеренной фазы от передаваемой информации. Например, в методе [Shafer, 1990] используется один квадратурный демодулятор, настроенный на центральную частоту, и производится реконструкция пилообразной функции начальной фазы несущей по демодулированным битовым последовательностям. Однако при высоком уровне зашумленности сигнала возникают ошибки приема битов, приводящие к неверным переходам по фазовой решетке и, следовательно, к ошибкам вычислений разности измеренной и реконструированной фаз.

На рис. 2 показаны результаты моделирования. Видно, что вычисленная фаза (кривая 4) повторяет закон дрейфа фазы $\theta(t)$ (кривая 2). Заметим, что заданная функция $\theta(t)$ имеет очень быстрые изменения, дрейф фазы СДВ сигналов происходит намного медленнее.

Предложенный метод вычисления фазы хорошо подходит для слабо зашумленных сигналов. В случае большого уровня помех на выходах ФНЧ будут осцилляции, и при измерении фазы близи границ области значений арктангенса неизбежны многократные скачки на π радиан в пределах выборки, усреднение которой дает ноль. Поэтому, детектирование осуществляется относительно дополнительной группы опорных колебаний, сдвинутых на $\pi/2$:

$$\begin{cases} \cos(\omega_1 t + \pi/2) = -\sin \omega_1 t, \\ -\sin(\omega_1 t + \pi/2) = -\cos \omega_1 t; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \cos(\omega_0 t + \pi/2) = -\sin \omega_0 t, \\ -\sin(\omega_0 t + \pi/2) = -\cos \omega_0 t. \end{cases} \quad (2)$$

Выполняя аналогичные преобразования для смещенных опорных сигналов и используя формулы приведения, получаем, что квадратурные компоненты для смещенных опорных колебаний могут быть выражены через квадратуры для несмещенных:

$$\begin{cases} \hat{I}_1(t) = Q_1(t), \\ Q_1(t) = -I_1(t); \\ \hat{I}_0(t) = Q_0(t), \\ Q_0(t) = -I_0(t). \end{cases} \quad (3)$$

По смещенным квадратурам вычисляется суммарная фазовая характеристика $\hat{p}(t) = \hat{p}_0(t) + \hat{p}_1(t)$. В решающем устройстве (РУ) выбор между усредненными фазами $\langle \hat{p}(t) \rangle$ и $\langle p(t) \rangle$ происходит из условия наименьшей дисперсии: если $D[p(t)] \leq D[\hat{p}(t)]$, то на выход передается $\langle p(t) \rangle$, иначе измеренной фазой будет $\langle \hat{p}(t) - \pi/2 \rangle$ (вычитание $\pi/2$ облегчает операцию развертывания фазы при постобработке данных).

Результаты измерений

На рис. 3 приведены результаты измерений параметров сигнала австралийской станции NWC (19.8 кГц) 28 – 30 марта 2015 г. Движение терминатора отмечено цветом, границы интервалов заданы временами восхода и заката в пунктах передачи и приема. Ночью, когда отражение происходит от Е-слоя ионосферы, модуль разности фаз измеренного и опорных сигналов намного больше, чем днем. Утром процесс фотоионизации приводит к образованию D-слоя, отражающая стенка волновода опускается, что приводит к уменьшению геометрической

длины пути распространения сигнала и, следовательно, к уменьшению модуля разности фаз. Отрицательный знак означает, что принятый сигнал отстает по фазе от опорных колебаний. Также на фазовой кривой хорошо заметно воздействие на ионосферу солнечной вспышки класса С3.0, возникшей 29 марта в 14:55 UTC+8. На амплитудном графике эффект виден гораздо слабее, что подтверждает факт большей чувствительности фазы к внезапным ионосферным возмущениям (ВИВ). В 07:00 каждый рассмотренный день наблюдается характерный послевосходный фазовый всплеск [Нестеров, 2009].

Заключение

Таким образом, представленный приемник позволяет проводить долговременные измерения амплитуды и фазы СДВ сигналов, результаты моделирования и экспериментальных данные подтверждают работоспособность комплекса. В дальнейшем планируется проводить интерферометрические измерения с помощью нескольких приемников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Засенко В.Е., Полетаев А.С., Ченский А.Г. Способ измерения вариаций фазового сдвига центральной частоты сигналов с минимальной частотной манипуляцией и устройство для его осуществления / Пат. на изобретение № 2524673 (RU), МПК H04L 27/10, заявл. 07.03.2013; опубл. 10.08.2014, Бюл. № 22. 24 с.

Нестеров В.И. Основные направления исследования радиоволн СДВ-диапазона в Дальневосточном регионе // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2009. Т. 12, №1. С. 91–98.

Полетаев А.С., Ченский А.Г., Токмачев Д.А. Интерферометрические измерения параметров сверхдлинноволновых радиосигналов // XXIV Всероссийская научная конференция. Распространение радиоволн, Иркутск, 29 июня–5 июля 2014 г., Труды конференции. 2014. Т. I. С. 276–279.

Shafer D.C. Spread-spectrum VLF remote sensing of the ionosphere / Ph.D. thesis, Stanford. – California, 1994.

Tokmachev D.A., Poletaev A.S., Bezrukin A.G., Chenskii A.G., Zasenkov V.E., Gubin N.A. A Synchronization System of Very Low Frequency Interferometers // Instruments and Experimental Techniques: Pleiades Publishing, Ltd., 2014. V. 57, N 5. P. 587–593.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия