

УДК 53.088.6:550.388, 621.396

А. В. БОГОМАЗ, Д. А. ИСКРА, А. Ф. КОНОНЕНКО

СИНХРОНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ В РЕЖИМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

У процесі створення нового програмно-апаратного комплексу обробки даних радару некогерентного розсіяння (НР), що працює в режимі дослідження середньої іоносфери, проаналізовано часові характеристики сигналів синхронізації з передавальною і приймальною системами радару. На базі результатів аналізу розроблено пристрій формування таких сигналів для налагодження програмного забезпечення сучасного модуля аналого-цифрового перетворення.

Ключові слова: радар некогерентного розсіяння, обробка сигналу, синхронізація, середня іоносфера.

В процессе создания нового программно-аппаратного комплекса обработки данных радару некогерентного рассеяния (НР), работающего в режиме исследования средней ионосферы, проанализированы временные характеристики сигналов синхронизации с передающей и приёмной системами радару. На основе результатов анализа создано устройство формирования таких сигналов для отладки программного обеспечения современного модуля аналого-цифрового преобразования.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, обработка сигнала, синхронизация, средняя ионосфера.

In the process of creating a new software-hardware data processing system for the incoherent scatter (IS) radar operating in the mode of sounding the middle ionosphere, the time characteristics of the synchronization signals with the transmitting and receiving systems of the radar are analyzed. Based on the results of the analysis, a device for generating such signals for debugging the software of a modern analog-to-digital conversion module has been created.

Keywords: incoherent scatter radar, signal processing, synchronization, middle ionosphere.

Введение. Актуальность изучения средней ионосферы (120–400 км) обусловлена тем, что среда в указанном диапазоне высот наиболее существенно влияет как на распространение радиоволн, так и на возникновение и распространение волновых процессов, вызываемых природными и антропогенными факторами (например, геокосмических бурями и стартами ракет) [1].

Главным инструментом Института ионосферы для исследования средней и верхней ионосферы является радар некогерентного рассеяния (НР) [2]. Применяемые в основном режиме его работы простые зондирующие импульсы большой длительности (около 650 мкс) позволяют получить с высокой точностью оценки параметров ионосферы в районе максимума ионизации и выше. Для исследования ионосферы ниже максимума области F_2 используются импульсы длительностью 135 мкс, что позволяет улучшить высотное разрешение (до 20 км) [3]. Активные измерения в этом режиме проводились в период с 1999 по 2004 г. [4]

Аппаратное и программное обеспечение системы обработки данных харьковского радару НР, которая используется во время его работы в режиме зондирования короткими импульсами, были разработаны ещё в середине 1990-х годов [5]. Небольшая вычислительная мощность этой компьютерной системы привела к необходимости её горизонтального масштабирования и искусственного занижения точности вычислений для улучшения временных показателей (система должна работать в режиме реального времени). Поэтому предполагается разработка и внедрение нового програмно-аппаратного комплекса, который будет построен на базе модуля аналого-цифрового преобразования E20-10, обеспечивающего непрерывный сбор 14-битных данных с частотой до 10 МГц и передачу их по интерфейсу USB 2.0 [6]. Первоочередной

задачей реализации новой компьютерной системы является обеспечение её синхронизации с передающей и приёмной системами радару.

Целью данной работы является рассмотрение временных диаграмм синхронизирующих сигналов системы обработки данных харьковского радару НР в режиме зондирования ионосферы короткими импульсами, а также аппаратных и программных особенностей синхронизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) E20-10 в этом режиме.

Формирователь импульсов синхронизации харьковского радару НР. Данное устройство построено на базе постоянного-запоминающего устройства (ROM), в котором записаны значения выходных сигналов управления (рис. 1). Каждый адресуемый двоичным счётчиком СТ байт соответствует одному отсчёту времени, каждый бит этого байта – одному из управляющих сигналов. Частота следования отсчётов определяется частотой тактового генератора G.

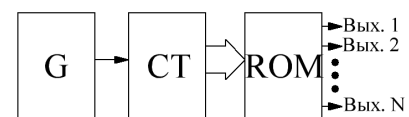


Рис. 1 – Структурная схема формирователя синхронизирующих сигналов системы обработки данных харьковского радару НР

Два основных сигнала, которые используются для синхронизации системы обработки данных харьковского радару НР в режиме зондирования ионосферы короткими импульсами: ИЗП – импульс запуска передатчика и R_0 – признак радиолокационной развёртки, во время которой излучается одиночный короткий импульс (рис. 2). Для последующего, т.е. во время обработки данных, формирования VII–XII

© А. В. Богомаз, Д. А. Искра, А. Ф. Кононенко, 2017

точки автокорреляционной функции (АКФ) принятого сигнала в ионосферу излучается два зондирующих импульса (согласно двум ИЗП).

Период повторения развёрток $T_n \approx 41$ мс (что соответствует частоте следования импульсов 24,4 Гц и

максимальной дальности около 6150 км), задержка $\Delta\tau = 40$ мкс, длительность импульсов запуска передатчика T_n – единицы микросекунд.

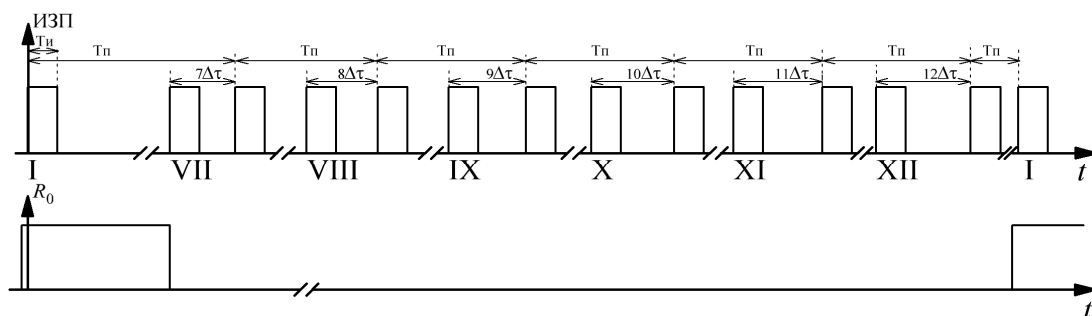


Рис. 2 – Схематическое расположение сигналов ИЗП и R_0

Временные диаграммы сигналов синхронизации. Для получения временных диаграмм сигналов ИЗП и R_0 на выход устройства синхронизации был подключён модуль E20-10.

Разработанное программное обеспечение позволило записать эти два сигнала с интервалом дискретизации 0,1 мкс. Временные диаграммы сигнала ИЗП показаны на рис. 3; время выражено в микросекундах.

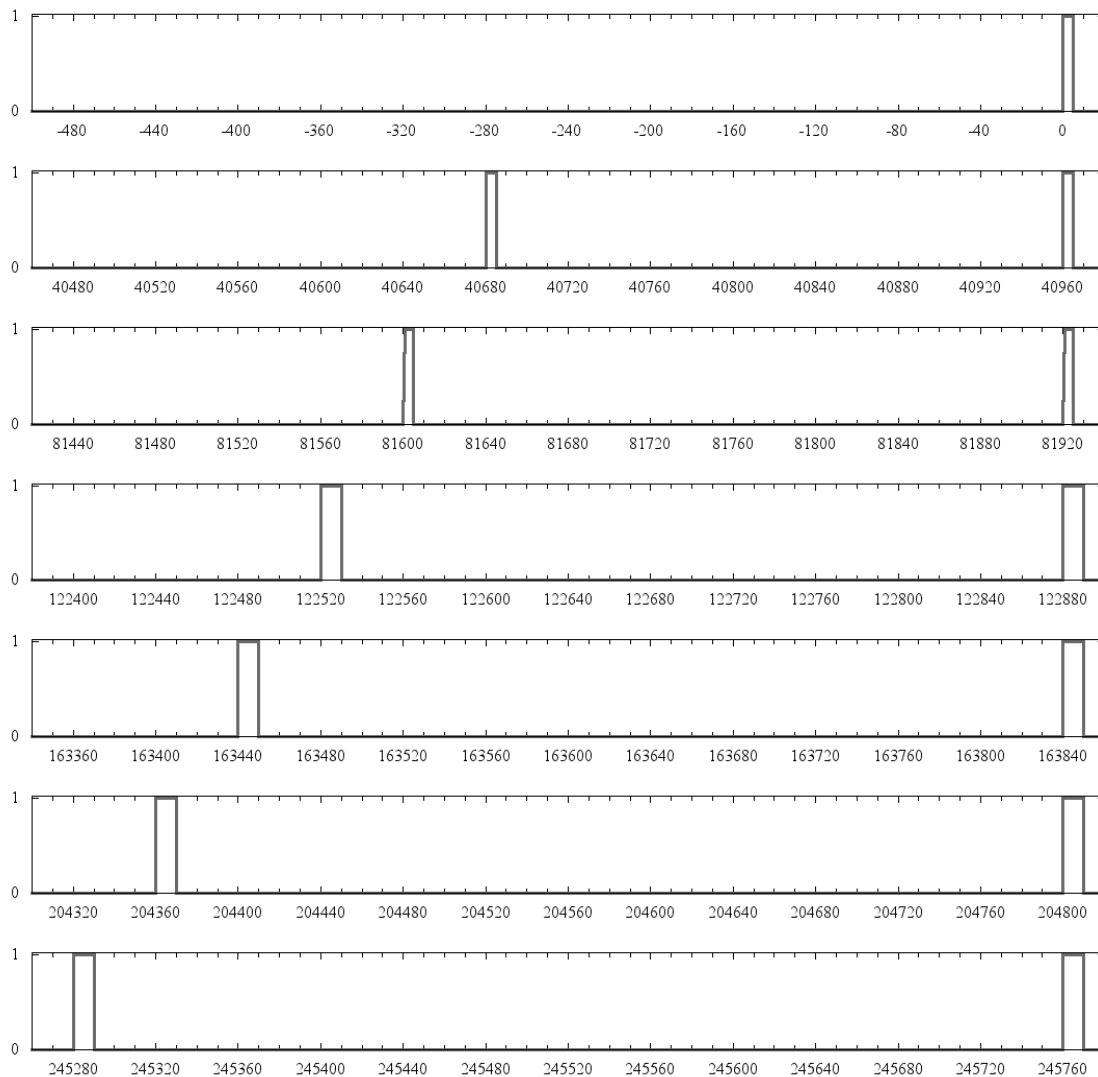


Рис. 3 – Временные диаграммы сигнала ИЗП

На рис. 4 показаны временные диаграммы сигналов R_0 и ИЗП для радиолокационной развёртки, в которой излучается один зондирующий импульс (а), и для развёртки, в которой излучается два зондирующих

импульсы, расстояние между которыми $7\Delta t$ (б), т.е. в последующем по данным этой развёртки будет сформирована VII точка АКФ принятого сигнала.

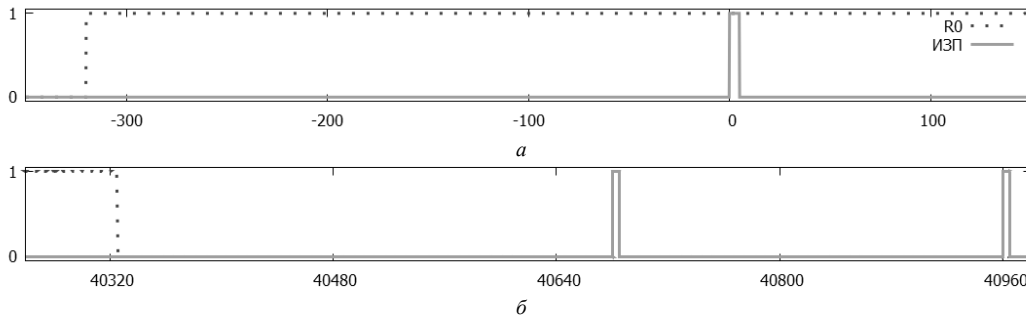


Рис. 4 – Временные диаграммы сигналов R_0 и ИЗП: а – для развёртки с одним зондирующим импульсом; б – для развёртки с двумя зондирующими импульсами для формирования VII точки АКФ принятого сигнала

Синхронизация модуля E20-10. Непосредственно подавать на АЦП синхронизирующие сигналы, которые используются для синхронизации действующей системы обработки данных (показаны на рис. 3–4), нельзя. Так, во-первых, будет происходить синхронизация по каждому ИЗП. Если же подавать сигнал ИЗП на вход формирователя импульсов длительностью $T > 7\Delta t$, а с его выхода – на синхронизирующий вход АЦП, такой проблемы можно избежать, однако каждая радиолокационная развёртка будет иметь свою ось высот, что приведёт к необходимости дополнительной высотной коррекции данных во время их анализа. Во-вторых, сигнал R_0 , указывающий на первую радиолокационную развёртку (которая используется для расчёта мощности принятого сигнала) не задействован, так как модуль не имеет больше цифровых входов.

Таким образом, среди выходов формирователя импульсов синхронизации харьковского радара НР (рис. 1) был выбран выход, отвечающий за формирование ИЗП в моменты времени кратные $T_n = 40960$ мкс. Сигнал R_0 через резистивный делитель подаётся на один из двух недействующих аналоговых входов АЦП (рис. 5).

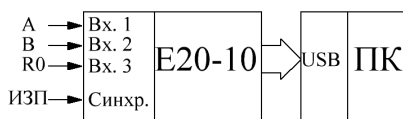


Рис. 5 – Упрощённая структура системы обработки данных на базе модуля АЦП E20-10. А и В – квадратурные составляющие принятого сигнала с выходов синхронных детекторов радиоприёмного устройства радара

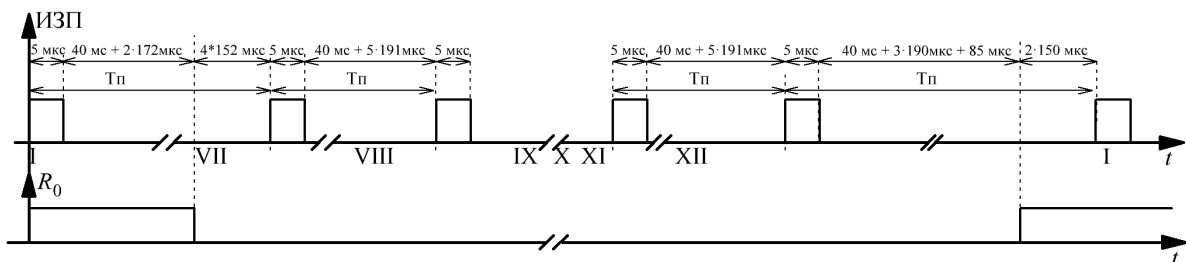


Рис. 6 – Схематическое расположение сигналов ИЗП и R_0 , сформированных с помощью разработанного устройства синхронизации модуля АЦП E20-10

Для отладки программного обеспечения, работающего с модулем E20-10, было разработано устройство, формирующее сигналы ИЗП и R_0 согласно таймингам, полученным из временных диаграмм (рис. 3, 4); в каждой радиолокационной развёртке формируется один ИЗП (через промежуток времени $T_n = 40960$ мкс).

Устройство построено на базе микроконтроллера Attiny2313 фирмы Atmel. Тактовая частота микроконтроллера задаётся внешним кварцевым резонатором с частотой $f_c = 4$ МГц; внутренний делитель частоты на 8 отключён.

Программа для микроконтроллера написана на языке С. Вывод сигналов ИЗП и R_0 производится в порт В (биты 0 и 1 соответственно).

Так как вид сигналов достаточно простой, необходимые временные интервалы задаются не с помощью таймера, а с помощью описанных в заголовочном файле util/delay.h функций `_delay_ms` и `_delay_us` (для задержек миллисекундной и микросекундной точности соответственно), принцип работы которых основан на выполнении определённого количества итераций циклов.

Максимально возможная задержка для функции `_delay_ms` равна $(262,14 \text{ [мс]} / f_c \text{ [МГц]})$, т.е. при выбранной частоте – около 65 мс. Этого достаточно для формирования задержки 40 мс, которая определяет основную часть радиолокационной развёртки. Максимально возможная задержка для функции `_delay_us` равна $(768 \text{ [мкс]} / f_c \text{ [МГц]})$, т.е. при выбранной частоте – 192 мкс. В большинстве случаев такой задержки недостаточно, поэтому функция вызывается несколько раз (рис. 6).

Выводы. Таким образом, полученные временные диаграммы сигналов, синхронизирующих работу системы обработки данных с радиопередающим и радиоприёмным устройствами радара, позволили разработать устройство для отладки программ, необходимых для создания программно-аппаратного комплекса обработки данных радара НР в режиме исследования средней ионосферы.

Список литературы

1. Брюнелли Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. – М.: Наука. – 1988. – 521 с.
2. Domnin, I. F. Kharkiv Incoherent Scatter Facility / I. F. Domnin, Ya. M. Cherpurnyy, L. Ya. Emelyanov [et al.] // Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2014. – No 47 (1089). – P. 28–42.
3. Головин В. И. Наблюдения ионосферы с помощью метода некогерентного рассеяния. Сообщение 2. Аппаратурные и методические особенности / В. И. Головин, Е. В. Рогожкин, В. И. Таран, С. В. Черняев // Вестник Харьковского политехнического института. – 1979. – №155. – С. 12–22.
4. Сюсюк М. Н. Особенности исследования средней ионосферы методом некогерентного рассеяния / М. Н. Сюсюк // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – 2013. – №33 (1066) – С. 62–65.
5. Цуркан А. В. Двухимпульсный режим радара некогерентного рассеяния / А. В. Цуркан // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков. – 1999. – Вып. 31. – С. 120–123.
6. Искра Д. А. Повышение точности определения автокорреляционных функций сигнала некогерентного рассеяния / Д. А. Искра // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – №33 (1066) – 2013. – С. 34–37.

References (transliterated)

1. Bryunelli B. E., Namgaladze A. A. *Fizika ionosfery* [Physics of ionosphere]. Moscow, Nauka. 1988. 521 p.
2. Domnin I. F., Cherpurnyy Ya. M., Emelyanov L. Ya. et al. Kharkiv Incoherent Scatter Facility. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. Kharkiv, NTU "KhPI", 2014, no. 47 (1089), pp. 28–42.
3. Golovin V. I., Rogozhkin E. V., Taran V. I., Chernyaev S. V. Nablyudeniya ionosfery s pomoshch'yu metoda nekogerentnogo rasseyaniya. Soobshchenie 2. Apparaturnye i metodicheskie osobennosti [Observations of the ionosphere using the method of incoherent scattering. Post 2. Instrumental and methodological features]. *Vestnik Khar'kovskogo politekhnicheskogo instituta* [Bulletin of the Kharkiv polytechnic institute]. Kharkiv, 1979, no. 155, pp. 12–22.
4. Syusyuk M. N. Osobennosti issledovaniya sredney ionosfery metodom nekogerentnogo rasseyaniya [Features of the study of the middle ionosphere by the method of incoherent scattering]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskiy politekhnicheskii institut»* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv, 2013, no. 33 (1066), pp. 62–65.
5. Tsurkan A. V. Dvukhimpul'snyy rezhim radara nekogerentnogo rasseyaniya [Two-pulse mode of the incoherent scatter radar]. *Vestnik Khar'kovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kharkiv state polytechnic institute]. Kharkiv, 1999, no. 31, pp. 120–123.
6. Iskra D. A. Povyshenie tochnosti opredeleniya avtokorrelatsionnykh funktsiy signala nekogerentnogo rasseyaniya [Increase in the accuracy of determination of the autocorrelation functions of the incoherent scattering signal]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskiy politekhnicheskii institut»* Bulletin of the National Technical University "KhPI". Kharkiv, 2013, no. 33 (1066), pp. 34–37.

Поступила (received) 14.08.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Синхронізація системи обробки даних радара некогерентного розсіяння в режимі дослідження середньої іоносфери / О. В. Богомаз, Д. О. Искра, А. Ф. Кононенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47. – С. 16 – 19. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Синхронизация системы обработки данных радара некогерентного рассеяния в режиме исследования средней ионосферы / А. В. Богомаз, Д. А. Искра, А. Ф. Кононенко // Вестник НТУ «ХПІ». Серія: Радиофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47. – С. 16 – 19. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Synchronization of the incoherent scattering radar data processing system in the mode for sounding the middle ionosphere / O. V. Bogomaz, D. O. Iskra, A. F. Kononenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 47. – P. 16 – 19. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Богомаз Олександр Вікторович – кандидат технічних наук, Інститут іоносфери, старший науковий співробітник, м. Харків; тел.: 706-22-87; e-mail: o.v.bogomaz1985@gmail.com.

Богомаз Александр Викторович – кандидат технических наук, Институт ионосферы, старший научный сотрудник, г. Харьков; тел.: 706-22-87; e-mail: o.v.bogomaz1985@gmail.com.

Bogomaz Oleksandr Viktorovych – Candidate of Technical Sciences, Institute of Ionosphere, Senior research scientist, Kharkiv; tel.: 706-22-87; e-mail: o.v.bogomaz1985@gmail.com.

Искра Дмитро Олександрович – Інститут іоносфери, молодший науковий співробітник, м. Харків; тел.: 706-22-87; e-mail: iskradmitriy@gmail.com.

Искра Дмитрий Александрович – Институт ионосферы, младший научный сотрудник, г. Харьков; тел.: 706-22-87; e-mail: iskradmitriy@gmail.com.

Iskra Dmytro Oleksandrovych – Institute of Ionosphere, Junior research scientist, Kharkiv; tel.: 706-22-87; e-mail: iskradmitriy@gmail.com.

Кононенко Анатолій Федорович – Інститут іоносфери, інженер-електронік I кат., м. Харків; тел.: 706-22-87.

Кононенко Анатолий Фёдорович – Институт ионосферы, инженер-электроник I кат., г. Харьков; тел.: 706-22-87.

Kononenko Anatolii Fedorovych – Institute of Ionosphere, engineer, Kharkiv; tel.: 706-22-87.