

В.М. Гриняк<sup>1</sup>

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса  
Владивосток. Россия

Т.М. Гриняк<sup>2</sup>

ООО Тера-Рекон  
Токио. Япония

Ю.С. Иваненко<sup>3</sup>

Дальневосточный федеральный университет  
Владивосток. Россия

## Об ограничении разрешения компьютеризированных РЛС кругового обзора\*

Работа посвящена проблеме построения цифровых информационно-измерительных радиолокационных систем. Аналого-цифровое преобразование представляет данные РЛС кругового обзора в виде матрицы амплитуд. В работе представлены результаты натурального эксперимента по определению скорости передачи данных между двумя типовыми ЭВМ общего назначения и рассчитанные на их основе ограничения на частоту и диапазон дискретизации РЛС сигнала. Делается вывод о том, что скорость передачи данных ограничивает разрешающую способность РЛС до пределов, соответствующих погрешностям измерения координат наблюдаемых объектов порядка 5-10 метров.

**Ключевые слова и словосочетания:** радиолокационные измерения, цифровая обработка сигнала, передача данных, распределённая информационная система, погрешность измерения.

V.M. Grinyak

Vladivostok State University of Economics and Service  
Vladivostok. Russia

T.M. Grinyak

JSC TeraRecon inc.  
Tokyo. Japan

Yu.S. Ivanenko

Far Eastern Federal University  
Vladivostok. Russia

<sup>1</sup> Гриняк Виктор Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий и систем; e-mail: Viktor.Grinyak@vvsu.ru.

<sup>2</sup> Гриняк Тимофей Михайлович – инженер-программист; e-mail: tgrinyak@gmail.com.

<sup>3</sup> Иваненко Юрий Сергеевич – студент; e-mail: yugown92@yahoo.com.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект 15-08-00234.

## On resolution of digital two-coordinate radar

Current paper is about evaluation of measurement errors at distributed digital radar system with limited network bandwidth. Radar system considered under this paper consists of 2 main blocks: ADC convertor that digitalize raw radar signal and block of secondary data processing. Problem is states as following. ADC generates amplitude matrix by signals from radar. The paper refer to comparison of data transmission protocols between 2 physical hardware (PC based) connected into network. The paper presents the results of data transmission experiments on charts. One of the results of the experiments that data transmission speed does not directly depend on CPU, memory, network utilization. Based on the experimental values of data transmission speed as main result of the paper given charts of dependency of maximum size of amplitude matrix and measurement error for typical radar system.

**Keywords:** radar measurement, digital signal processing, data transfer, distributed information system, measurement error.

### Введение

Радиолокационные станции (РЛС) являются важнейшим инструментом обеспечения контроля за движением объектов различного типа [1–3]. Несмотря на развитость современных спутниковых средств навигации (например, Автоматическая идентификационная система (АИС) в судождении [4]), именно радиолокационные средства продолжают составлять информационную основу систем наблюдения за морским и воздушным движением [5, 6], так как способны обеспечить бесперебойность и автономность их функционирования. Например, береговые и бортовые системы управления движением судов обязательно включают в себя одну или несколько РЛС кругового обзора [6].

В настоящее время характерна компьютеризация РЛС, состоящая в их сопряжении с ЭВМ с помощью специальных аналого-цифровых устройств (радар-процессоров [7]). Радиолокационный отражённый эхо-сигнал оцифровывается и «вводится» в память ЭВМ (первичная обработка сигнала). Получаемые таким образом первичные цифровые данные передаются другим компонентам информационной системы (как правило, распределённой) для вторичной обработки.

Инструментальная компонента погрешности измерений координат наблюдаемых объектов обычно связывается с такими характеристиками РЛС, как ширина диаграммы направленности, длина волны, длина зондирующего импульса и частота посылок [8]. Компьютеризация РЛС и аналого-цифровое преобразование исходного эхо-сигнала вводит дополнительный фактор, влияющий на инструментальную погрешность измерений РЛС.

Аналого-цифровое преобразование эхо-сигнала характеризуется частотой и диапазоном его дискретизации. Высокая частота и большой диапазон дискретизации очень желательны, так как позволяют достигать высокой точности измерения координат наблюдаемых объектов и решать дополнительные задачи (например, выделять объекты на фоне помех, распознавать тип объекта по его радиолокационному

образу, оценивать метеоусловия и т.п.) [9]. Вместе с тем, высокие характеристики частоты и диапазона дискретизации приводят к значительным объемам получаемых данных. Суть проблемы в том, что передача данных от блока первичной обработки к блоку вторичной обработки распределённой информационной системы имеет ограничения по скорости, обусловленные характеристиками используемых компьютеров, программной платформы и сетевого оборудования. В условиях этих ограничений выбор тех или иных параметров аналого-цифрового преобразования исходного эхо-сигнала представляет собой актуальную задачу.

Промышленные системы наблюдения строятся с использованием специализированных ЭВМ и программных платформ, что определяет их высокую стоимость и ограниченную доступность специалистов-разработчиков и эксплуатационников нужной квалификации. Поэтому, если решаемые системами наблюдения задачи не предъявляют высоких требований к надёжности и защищённости (например, научно-исследовательские задачи), целесообразно обратиться к типовым компьютерам и программному обеспечению общего назначения.

Настоящая работа посвящена исследованию ограничений характеристик систем наблюдения, создаваемых на основе компьютеризированных РЛС кругового обзора с использованием компьютерного оборудования и программных платформ общего назначения и связанных с конечностью скорости передачи данных в сети ЭВМ.

### **Основные проблемные аспекты и постановка задачи**

Пусть имеется типовая РЛС кругового обзора с периодом обращения антенны  $T_\varphi$  и частотой посылок  $\nu_\varphi$  (частота дискретизации по азимуту). При таких значениях количество линеек на один оборот антенны (то есть количество дискретных значений азимута) будет равно  $n_\varphi = \nu_\varphi T_\varphi$ .

Пусть шкале дальности РЛС соответствует время приёма линейки  $T_r$ . Пусть каждая линейка преобразуется аналого-цифровым устройством с частотой дискретизации  $\nu_r$  в массив значений. Тогда число элементов в этом массиве значений (то есть количество дискретных значений дальности) у каждой линейки будет равно  $n_r = \nu_r T_r$ .

Один оборот антенны РЛС формирует радиолокационный образ наблюдаемого пространства, который путём аналого-цифрового преобразования представляется в виде матрицы амплитуд отражённого эхо-сигнала  $A$  с количеством строк, равным  $n_\varphi$ , и количеством столбцов, равным  $n_r$ . Матрица амплитуд обновляется с каждым оборотом антенны, то есть один раз за время  $T_\varphi$ .

Информационно-измерительная система, построенная на базе такой РЛС, имеет следующую архитектуру. Электрические видео- и синхронизирующие сигналы РЛС подаются на вход подключенного к ЭВМ аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Полученная в результате такой первичной обработки матрица амплитуд  $A$  передаётся по сетевому протоколу другой ЭВМ для вторичной обработки, вклю-

чающей в себя сопровождение траекторий наблюдаемых объектов, определение их параметров движения и визуализацию навигационной обстановки в пользовательском интерфейсе.

В общем случае производительность современных типовых ЭВМ достаточна для решения базовых задач первичной и вторичной обработки сигнала. Вместе с тем, имея в виду большой объём матрицы  $A$  и её частое обновление, передача данных от блока первичной обработки к блоку вторичной обработки по сетевому протоколу является «узким местом» рассматриваемой компьютеризированной системы радиолокационного наблюдения.

Архитектура современных программных платформ (операционных систем) позволяет обеспечить построение распределённых информационных систем путём использования многозадачности и передачи данных между процессами. Эти процессы, составляющие программную основу распределённой информационной системы, могут быть запущены параллельно друг другу и обмениваться данными как на одной, так и на различных ЭВМ, соединённых сетью. Имеется целый ряд инструментов для обмена данными между процессами [10]: интерфейс динамического обмена данными (DDE интерфейс), почтовые слоты (mail slots), именованные каналы (pipes), сокетты (sockets), файлы, отображаемые в память (memory mapped files).

Имея в виду особенности функциональности системы радиолокационного наблюдения, для программной реализации обмена данными между блоками первичной и вторичной обработки наиболее подходящим является механизм именованных каналов (pipes). Его характеризует возможность синхронизировать работу блока вторичной обработки (pipe-клиента) с обновлением данных блока первичной обработки (pipe-сервером). При этом следует отметить методологическую общность работы ядра операционной системы при реализации различных механизмов обмена данными между процессами, что приводит к близости их производительности и ресурсоёмкости, в том числе в разрезе различных операционных систем.

В настоящей работе ставится задача оценки характерной скорости передачи данных от блока первичной к блоку вторичной обработки при использовании механизма именованных каналов (pipes) и оценки на её основе возможных предельных значений частот дискретизации радиолокационного образа по азимуту  $\nu_\varphi$  и дальности  $\nu_r$ , определяющих размерность матрицы амплитуд  $A$ .

### **Набор сценариев для оценки скорости передачи данных**

Оценку характерной скорости передачи данных от pipe-сервера к pipe-клиенту будем проводить по результатам натуральных испытаний. Имеются две ЭВМ, соединённые локальной сетью. На одной из них запускается программа-сервер, создающая именованный канал и генерирующая и записывающая в него данные.

На второй ЭВМ запускается программа-клиент, читающая данные из именованного канала.

Скорость передачи данных определяется не только конфигурацией ЭВМ и сетевых устройств, но и используемой операционной системой и степенью загрузки ресурсов ЭВМ другими системными и прикладными задачами. Для анализа скорости передачи данных в различных условиях реализуем следующие тестовые сценарии.

*Сценарий 1.* Работа клиента и сервера без дополнительной нагрузки.

*Сценарий 2.* Параллельно клиенту и серверу запускается проигрывание видео-файлов с жёсткого диска.

*Сценарий 3.* Параллельно клиенту и серверу запускается проигрывание видео-файлов из сети.

*Сценарий 4.* Параллельно клиенту и серверу запускаются ресурсоёмкие приложения.

Первый сценарий условно моделирует идеальный вариант работы системы наблюдения как программного продукта. Второй, третий и четвертый – различные аспекты загрузки ресурсов ЭВМ (процессор, память, сеть). В четвертом сценарии роль ресурсоёмкого приложения выполняли компьютерные игры с богатой функциональностью.

### Результаты натуральных измерений скорости передачи данных

При постановке эксперимента использовались ЭВМ со следующими характеристиками: процессор Intel Core i5 с частотой 2,5 ГГц, память 4 Гб, сетевой адаптер со скоростью 1 Гбит/с, ОС Win7(64). Такие характеристики вполне соответствуют определению «типовая ЭВМ общего назначения».

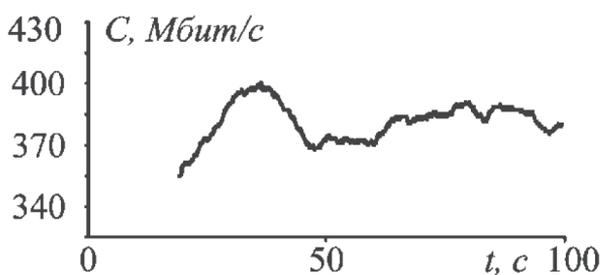


Рис. 1. Скорость передачи данных клиент – сервер

На рисунке 1 показан график, характеризующий значения скорости передачи данных  $C$  от рёр-сервера к рёр-клиенту. Рисунок соответствует четвёртому сценарию. В момент времени  $t = 0$  последовательно запускались процессы сервера и клиента, в момент времени  $t = 20$  с (после стабилизации распределения ресурсов ЭВМ) начиналось логирование данных. Из графика видно, что скорость передачи данных составляет порядка 400 Мбит/с (что более чем в 2 раза меньше теоретически

возможной, обусловленной характеристиками используемого сетевого адаптера 1 Гбит/с). При этом имеют место колебания скорости порядка 5–10%. Как показали эксперименты, значения скорости передачи данных близки во всех четырёх сценариях, то есть скорость передачи данных не зависит явно от загрузки ресурсов ЭВМ, если загрузка не экстремально велика.

Значения размерности матрицы амплитуд отражённого эхо-сигнала  $A$  (число строк  $n_\varphi$  и количество столбцов  $n_r$ ) при известном размере одного элемента матрицы  $s$  (определяется диапазоном дискретизации), скорости передачи данных от блока первичной обработки к блоку вторичной обработки  $C$  и периоде обращения антенны РЛС  $T_\varphi$  связаны соотношением:

$$n_r = \frac{CT_\varphi}{sn_\varphi}.$$

Разрешения по углу и дальности, обусловленные дискретизацией и выраженные в метрах, при размерности матрицы амплитуд  $n_\varphi \times n_r$  равны, соответственно,  $\delta_\varphi = 2\pi r/n_\varphi$  и  $\delta_r = R/n_r$ , где  $r$  – расстояние до наблюдаемого объекта,  $R$  – максимальная дальность работы РЛС (определяемая выбранной шкалой дальности).

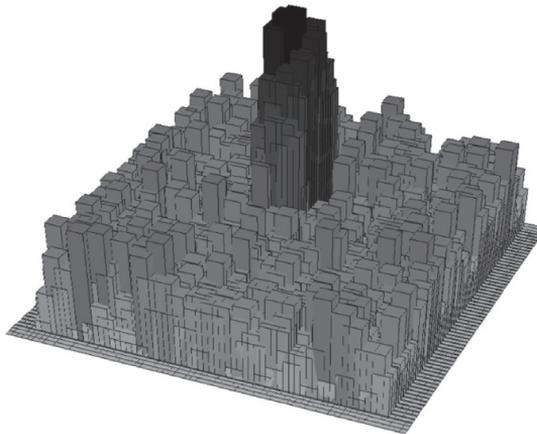


Рис. 2. Радиолокационный образ судна на фоне помех от морского волнения; высота столбиков соответствует амплитуде отражённого эхо-сигнала

Отметим, что для малых объектов, чьи геометрические размеры соизмеримы с разрешением РЛС, разрешение по углу  $\delta_\varphi$  и дальности  $\delta_r$  можно отождествлять с инструментальной погрешностью измерения соответствующих величин. Для больших, протяжённых объектов оцифрованный радиолокационный образ представляется некоей «подматрицей» матрицы амплитуд (на рис. 2 приведён пример такого радиолокационного образа). Её значения коррелированы и распределены сложным образом. В этом случае инструментальная погрешность измерений дальности и азимута, безусловно, зависит от разрешения по углу и дальности, од-

нако прямо отождествлять разрешение по углу и дальности с инструментальной погрешностью измерений не следует.

Рисунок 3 иллюстрирует возможные значения погрешностей измерения координат наблюдаемых объектов, если скорость передачи данных от блока первичной обработки к блоку вторичной обработки  $C$  составляет оцененные 50 Мбайт/с, период обращения антенны РЛС  $T_\varphi$  равен 3 с, а размер одного элемента матрицы амплитуд  $s$  равен 2 байта. На рисунке 3а показана зависимость максимального количества столбцов  $n_r$  от количества строк  $n_\varphi$  при указанных значениях. Например, если частота посылок РЛС соответствует 4000 линеек на один оборот антенны, то максимально возможное количество дискретных значений дальности равно, приблизительно, 20 000. На рисунке 3б показана зависимость разрешения по дальности  $\delta_r$  от разрешения по углу  $\delta_\varphi$  при  $R=30$  км и  $r=5$  км (сплошная линия),  $r=10$  км (пунктир),  $r=15$  км (точки). Видно, например, что для объекта, находящегося на удалении  $r=5$  км, при разрешении по углу  $\delta_\varphi$  равном 4 метрам разрешение по дальности  $\delta_r$  равно 3 метрам.

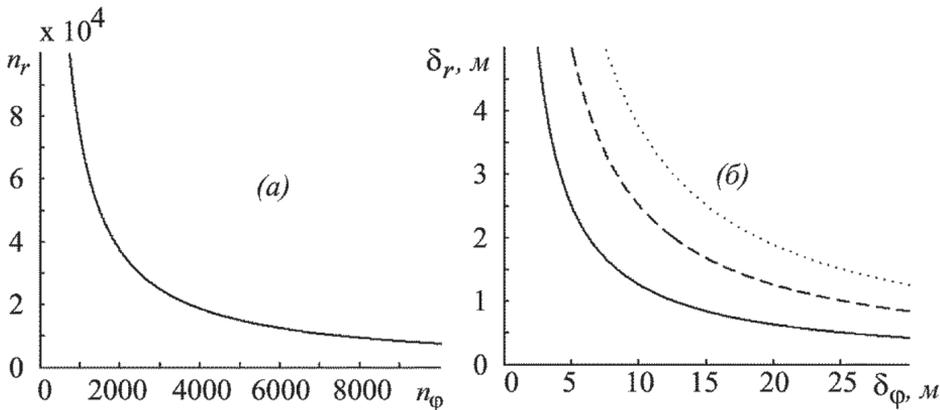


Рис. 3. Размеры матрицы амплитуд и соответствующие разрешения по углу и дальности

### Заключение

Как показывают приведённые в статье эксперименты и расчёты, реально достижимая на типовой ЭВМ со скоростью сетевого адаптера 1 Гбит/с скорость передачи данных составляет порядка 400 Мбит/с. В этом случае обусловленная дискретизацией РЛС сигнала разрешимость радиолокационного образа наблюдаемых объектов на характерных дальностях 10–15 км составляет порядка 10–15 м. Такая разрешимость и соответствующая погрешность измерений достаточны для решения многих задач наблюдения, например, связанных с оценкой навигационной обстановки и обеспечением безопасности коллективного движения наблюдаемых объектов [11–13].

Для задач, требующих на порядок меньшей погрешности измерения координат ~1 м [14, 15], для постоянной передачи к блоку вторичной обработки полной матрицы амплитуд необходима на два порядка большая скорость передачи данных ~5 Гбайт/с, недостижимая для типового сетевого оборудования общего назначения. Решение таких задач требует разработки специальных приёмо-передающих устройств и алгоритмов обработки данных.

---

1. Бакулев, П.А. Радиолокационные системы / П.А. Бакулев. – М: Радиотехника, 2004. – 320 с.
2. Пушинский, С.Н. Формирование эталонных радиолокационных портретов надводных кораблей с использованием ограниченного набора экспериментальных данных / С.Н. Пушинский // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2014. – № 2. – С. 13–19.
3. Donderi, D.C. Simulated Navigation Performance with Marine Electronic Chart and Information Display Systems (ECDIS) / D.C. Donderi, C.R. Mercer, M.B. Hong, C.D. Skinner // Journal of Navigation. – 2004. – Vol. 57. – P. 189–202.
4. Ростопшин, Д.Я. О проблемах использования данных автоматической идентификационной системы в задачах управления движением судов / Д.Я. Ростопшин, Д.А. Антонова // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 9. – С. 63–69.
5. Дмитриев, В.И. Автоматизированное рабочее место судоводителя – настоящее и будущее / В.И. Дмитриев, О.В. Соляков, Н.В. Турецкий // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. – 2014. – № 4. – С. 42–47.
6. Красников, В.В. Применение интегрированных навигационных систем для обеспечения безопасности судоходства на внутренних водных путях РФ / В.В. Красников, И.А. Поплёскин, М.С. Савченко // Вопросы радиоэлектроники. – 2009. – № 1. – С. 9–16.
7. Радарный процессор «RP-3.2» [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.mkis.su/catalog?gn=21> (дата обращения: 01.09.2015)
8. Сосулин, Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации / Ю.Г. Сосулин. – М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.
9. Девятисильный, А.С. Технология компьютерного моделирования радиолокационного эхосигнала / А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко, В.М. Гриняк // Информационные технологии. – 2002. – № 3. – С. 42–49.
10. Сафонов, В.О. Основы современных операционных систем / В.О. Сафонов. – М.: БИНОМ; Лаборатория знаний, 2011. – 584 с.
11. Дорожко, В.М. Радиолокационная регистрация начального этапа разгона морского судна / В.М. Дорожко // Измерительная техника. – 2010. – № 6. – С. 23–28.
12. Dorozhko, V.M. Radar logging of the initial stage of acceleration of a vessel / V.M. Dorozhko // Measurement techniques. – 2010. – № 6. – P. 629–636.

13. Гриняк, В.М. Нечеткое определение характера движения при многомодельном сопровождении траектории судна обзорной РЛС / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2013. – № 6. – С. 13–20.
14. Девятисильный, А.С. Идентификация воздушных объектов двухкоординатными измерителями / А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко, В.М. Гриняк // Измерительная техника. – 2004. – № 11. – С. 19–21.
15. Devyatisilnyi, A.S. A radar system for measuring the wave-forming properties of ships / A.S. Devyatisilnyi, V.M. Dorozhko, V.M. Grinyak // Measurement techniques. – 2004. – № 11. – P. 1061–1064.

© Гриняк, В.М., 2016

© Гриняк, Т.М., 2016

© Иваненко, Ю.С., 2016

**Для цитирования:** Гриняк, В.М. Об ограничении разрешения компьютеризированных РЛС кругового обзора / В.М. Гриняк, Т.М. Гриняк, Ю.С. Иваненко // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2016. – № 2. – С. 105–113.

**For citation:** Grinyak, T.M. On resolution of digital two-coordinate radar / V.M. Grinyak, T.M. Grinyak, Yu.S. Ivanenko // The Territory Of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service. – 2016. – № 2. – P. 105–113.

Дата поступления: 16.03.2016.