

УДК 621.396.96

В.А Ненашев*

кандидат технических наук, доцент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Повышение разрешающей способности радиолокационного изображения на основе интерполяции эхо-сигнала в малогабаритных бортовых РЛС

В данной работе рассмотрена процедура, реализующая восстановление радиолокационных оцифрованных данных в приемном тракте малогабаритных бортовых РЛС на основе метода интерполяции данных для повышения разрешения радиолокационных изображений при их формировании. Для решения указанной задачи рассматривается процесс восстановления радиолокационных данных в математическом понимании на примере существующих идей и методов интерполяции. Делается вывод о целесообразности применения процедуры интерполяции с точки зрения практического применения для решения задачи повышения разрешения у формируемого радиолокационного изображения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование земной поверхности, интерполяция, радиолокационный сигнал, малогабаритные бортовые РЛС, высокое разрешение.

V.A. Nenashev*

PhD, Associate Professor

** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INCREASING THE RESOLUTION OF A RADAR IMAGE BASED ON ECHO SIGNAL INTERPOLATION IN SMALL-SIZED AIRBORNE RADARS

In this paper, we consider a procedure that implements the reconstruction of radar digitized data in the receiving path of small-sized airborne radars based on the data interpolation method to increase the resolution of radar images during their formation. To solve this problem, the process of reconstructing radar data in the mathematical sense is considered using the example of existing ideas and methods of interpolation. The conclusion is made about the expediency of using the interpolation procedure from the point of view of practical application for solving the problem of increasing the resolution of the generated radar image.

Keywords: remote sensing of the earth's surface, interpolation, radar signal, small-sized airborne radars, high resolution.

Введение

Современные требования, предъявляемые к малогабаритным бортовым радиолокационным системам (МБРЛС) оперативного мониторинга, с каждым годом возрастают [1-10]. Решение задачи их повышения лежит в области разработки и исследования новых радиолокационных методов и подходов, способных качественно повысить разрешение формируемого радиолокационного изображения (РЛИ). Это повышение разрешения РЛИ можно получить, используя методы интерполяции радиолокационных оцифрованных данных эхо-сигнала в приемном тракте МБРЛС. Решение этой задачи может быть получено на основе применения интерполяционной функции с ядром $\sin(x)/x$.

$$X = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k \frac{\sin(t\Delta - k\pi)}{t\Delta - k\pi}, x_k = x\left(\frac{k\pi}{\Delta}\right) \quad (1)$$

По отсчетам значений аналогового сигнала в дискретные моменты времени с частотой дискретизации равной удвоенной наивысшей частоте в спектре сигнала, можно точно восстановить значения сигнала в любой момент времени. Функция $\sin(x)/x$, как и дельта-функция, обладает фильтрующим свойством, т.е. интегральная свертка этой функции с произвольным сигналом $x(t)$ выделяет значение сигнала при том значении аргумента, при котором аргумент дельта-функции обращается в нуль. Выражение (1) верно только для сигналов с конечной энергией [1].

Процедура интерполяции входного радиолокационного сигнала в приемном тракте МБРЛС

Принятый аппаратурой МБРЛС эхо-сигнал попадает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) [6, 8] и далее поступает на вход блока программной обработки, где реализуется процесс его восстановления - повышения дискретизации интерполяционным методом. При этом вносить изменения в конструкции аппаратуры приема или АЦП МБРЛС не требуется.

Чтобы повысить частоту дискретизации принятого сигнала на целочисленный множитель, необходимо интерполировать значения между отсчетами этого исходного оцифрованного сигнала. Для этого смоделирован сигнал с высокой частотой дискретизации для имитации «непрерывного» сигнала, и из него получен оцифрованный сигнал для демонстрации процесса его восстановления (рис. 1).

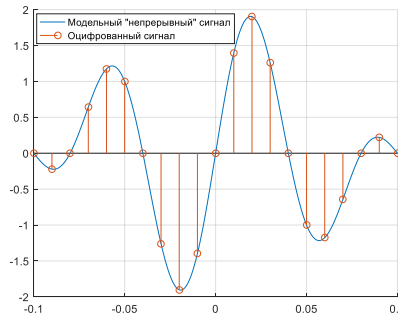


Рисунок 1 – Модельный "непрерывный" сигнал и его оцифрованный вариант

Таким образом, интерполяционная формула с $\text{sinc}(x)/x$ может быть применима и для восстановления дискретного сигнала с ограниченной полосой частотного спектра. Математическое выражение следующее:

$$x_c(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) \frac{\text{sinc}(t - kT)}{T}. \quad (2)$$

Суть выражения (2) заключается в том, что каждый цифровой отсчет эхо-сигнала взвешивает вариант функции *sinc*, сдвинутой к местоположению этой точки выборки по оси времени. Сумма этих взвешиваний и формирует «непрерывный» сигнал $x_c(t)$.

Следует заметить, что вклад в значения формируемой выборки $x_c(t)$ при $t=kT$ вносит только k -я *sinc*-функция, в то время как другие *sinc*-функции имеют нулевое значение в этой точке выборки, но вносят вклад в восстановленный сигнал $x_c(t)$ между исходными значениями точек выборки. (см. рис. 2).

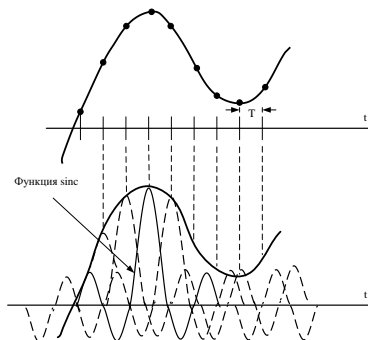
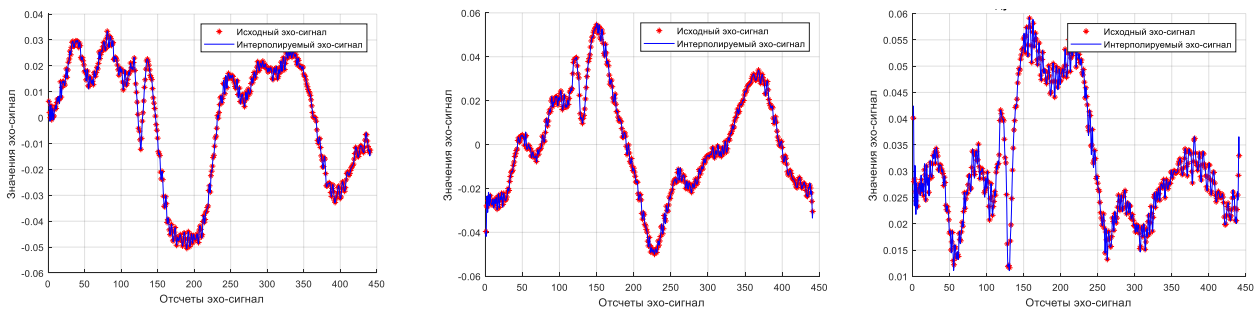


Рисунок 2 – Восстановление дискретного эхо-сигнала по оцифрованной выборке

Таким образом, чтобы получить значения «непрерывного» сигнала $x_c(t)$ в конкретных точках выборки отсчетов из оцифрованной последовательности следует воспользоваться выражением (2), которое обеспечивает процедуру повышения дискретизации входного сигнала после блока АЦП.

Эксперименты по интерполяции эхо-сигнала отраженного от земной поверхности

Покажем возможность реализации процедуры интерполяции эхо-сигнала на примере реального радиолокационного сигнала. На рис. 3а-3в представлен сигнал во временной области, отраженный от земной поверхности – и его восстановленная версия. Количество отсчетов принятого оцифрованного эхо-сигнала составляет 441 значений. На выходе процедуры интерполяции это значение было увеличено в 10 раз. Поскольку радиолокационные данные представлены в виде наборов комплексных чисел, то необходимо было отдельно интерполировать реальную (рис. 3а) и мнимую части (рис. 3б) эхо-сигнала, а также вычислить модуль комплексного эхо-сигнала (рис. 3в). Далее интерполируемый и исходный сигналы представлены на рисунках 3а-3в.



а) Реальная часть эхо-сигнала б) Мнимая часть эхо-сигнала в) Модуль эхо-сигнала

Рисунок 3 – Радиолокационный сигнал, отраженный от земной поверхности

Сопоставление графиков интерполируемого и исходного эхо-сигнала реальной (рис. 3а), мнимой (рис. 3б) частей и модуля комплексного эхо-сигнала (рис. 3в) показали возможность восстановления таким образом наблюдаемого оцифрованного сигнала до практически реального. Далее интерполируемые данные после процесса формирования РЛИ выводятся в виде значения яркости на индикаторе оператора.

Результаты повышения частоты дискретизации оцифрованного эхо-сигнала f_d (см. рис. 4) показывают, что при ее увеличении в 1,78 раз по сравнению с частотой наблюдаемой на выходе АЦП, разрешающая способность возрастает примерно в 1,487 раза. Повышение f_d частоты более чем в 1,78 раз не приводит к увеличению разрешающей способности по дальности (рис. 4).

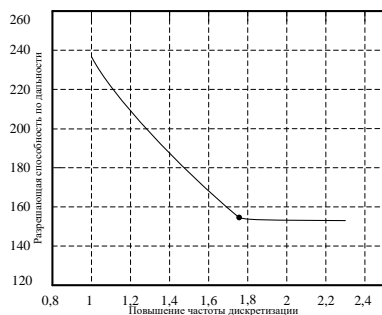


Рисунок 4 – Зависимость разрешающей способности по дальности от f_d

Таким образом можно сделать вывод о целесообразности применения интерполяционной *sinc*-функции для восстановления эхо-сигнала и повышения разрешения формируемого РЛИ.

Заключение

На основе введения в процесс обработки процедуры интерполяции для оцифрованного радиолокационного эхо-сигнала МБРЛС осуществляется повышение разрешения РЛИ при их формировании. В работе рассмотрен процесс восстановления оцифрованного сигнала через интерполяционную функцию. Приводится сопоставление оцифрованного эхо-сигнала, наблюдаемого после блока АЦП и восстановленного сигнала после применения интерполяционной процедуры. Делается вывод о целесообразности применения такой программной обработки с точки зрения практического применения для решения задачи повышения разрешения у формируемого РЛИ в МБРЛС.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00303).

Библиографический список

1. Левин Б.Р., Шварц В. Вероятностные модели и методы в системах связи и управления. М.: Радио и связь. 1985 г. 312 с.
2. Верба В.С. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч.3. М.: Радиотехника. 2010 г. 472 с.
3. Дудник П.И., Ильчук А.Р., Татарский Б.Г. Многофункциональные радиолокационные системы. М.: Дрофа, 2007 г.
4. Кондратенков Г.С. Авиационные системы радиовидения. М.: «Радиотехника», 2015. 648 с.
5. Ненашев В.А., Сенцов А.А., Куюмчев Г.В. Моделирование процесса формирования радиолокационного изображения высокого разрешения в бортовых РЛС с синтезированной апертурой // Вопросы радиоэлектроники, 2013, Т. 2. №3. С. 48-56.
6. Блаунштейн Н.Ш., Сергеев М.Б., Шепета А.П. Прикладные аспекты электродинамики. СПб: Аграф+, 2016. 272 с.
7. Shepeta A. P., Nenashev V. A. Modeling algorithm for SAR image based on fluctuations of echo signal of the Earth's surface // Proc. of SPIE Remote Sensing. Toulouse, France, 2015.
8. Подоплёкин Ю. Ф., Шепета Д. А., Ненашев В. А. Моделирование входных сигналов бортовой РЛС, обусловленных отражениями зондирующего сигнала от подстилающих поверхностей земли и моря // Морской вестник. 2016. №4. С.69-71.
9. Верба В.С., Татарский Б.Г., Меркулов В.И. и др. Радиолокационные системы авиационно-космического мониторинга земной поверхности и воздушного пространства / Под ред. В.С. Вербы, Б.Г. Татарского. Монография. М.: Радиотехника, 2014. 576 с.
10. Ненашев В.А., Сергеев А.М., Васильев И.А. Моделирование сложных кодомодулированных сигналов для современных систем обнаружения и передачи информации // Научная сессия ГУАП. Сб. докл. науч. сессии СПб.: ГУАП, 2019. С. 413-417.