

*Е.В. РОГОЖКИН, д-р физ.-мат. наук, Ю.И. ПОДЪЯЧИЙ, канд. физ.-мат. наук,
Л.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, канд. физ.-мат. наук*

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРЕМЫ ОТСЧЕТОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ УЗКОПОЛОСНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ С ИЗВЕСТНОЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТОТОЙ СПЕКТРА

Введение

Эффективное применение информационно-вычислительных систем для обработки и анализа радиосигналов требует их преобразования в цифровой формат. При этом основным условием использования такой процедуры является исключение необратимых потерь информации. Например, при исследованиях ионосферы с использованием радиолокаторов некогерентного рассеяния необходимо выделять связанный с вертикальным дрейфом плазмы доплеровский сдвиг. Величина сдвига не превышает 1/100 от ширины спектра рассеяния, что при обработке на видеочастоте усложняет аппаратуру: как и в РЛС приходится использовать два квадратурных канала обработки [1, 2]. Кроме того, в высотном профиле скорости дрейфа плазмы есть области изменения знака скорости (изменение направления движения плазмы). Это при отношении $P_s/P_n < 1$ серьезно ужесточает требования к идентичности и стабильности характеристик используемых каналов, так как в окрестности высоты изменения знака скорости доплеровский сдвиг имеет предельно низкие значения.

Согласно теореме Котельникова – Шеннона преобразование аналоговых сигналов в дискретную форму должно осуществляться с частотой не меньше удвоенной наивысшей частоты спектра преобразуемого сигнала. Если преобразование радиолокационного сигнала осуществляется на относительно высокой промежуточной частоте, то возникают проблемы с выбором вычислительного устройства достаточно высокой производительности. Один из вариантов решения проблемы заключается в поиске способов цифрового преобразования, позволяющих значительно уменьшить объем вычислительных операций без существенных потерь информации об огибающей и несущей [3].

Цель работы – уменьшение объема процедуры цифрового преобразования и обработки радиосигналов для получения информации о радиолокационных объектах в реальном времени.

Способ увеличения периода следования отсчетов

В когерентных РЛС при преобразовании аналогового сигнала в цифровой формат непосредственно на промежуточной частоте существует техническая возможность осуществлять отсчеты, синхронизируя их сигналом опорной частоты f [4 – 7], которая равна промежуточной в отсутствие доплеровского сдвига. Период следования отсчетов $u_0, u_1, \dots, u_k, u_{k+1}, u_{k+2}, \dots, u_{k+n}$ может быть выбран и кратно меньше [5], и кратно больше периода сигнала опорной частоты [8].

В отсутствие доплеровского сдвига каждый из отсчетов сигнала $u(t) = a \cos(2\pi ft + \alpha)$ можно представить комплексными амплитудами:

$$\dot{a}_0, \dot{a}_1, \dots, \dot{a}_k, \dot{a}_{k+1}, \dot{a}_{k+2}, \dots, \dot{a}_{k+n-1} = a(e^{i\alpha}, e^{i(\alpha+\delta)}, e^{i(\alpha+2\delta)}, \dots, e^{i[\alpha+\delta(n-1)]}),$$

где δ – шаг отсчетов по углу, n – число отсчетов на интервале $T=1/f$.

На рис. 1 приведена векторная диаграмма, иллюстрирующая вариант дискретизации для случая $n=3$ и $\alpha = \pi/3$. Здесь отсчеты представлены единичными векторами (u_1, u_2, u_3), исходящими из центра окружности, который совмещен с началом произвольно ориентированной системы декартовых координат:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 0; \quad y_1 + y_2 + y_3 = 0.$$

Можно показать, что в общем случае при количестве отсчетов $n \geq 3$ суммы вещественных и мнимых частей комплексных амплитуд при угловом шаге отсчетов $\delta=2\pi/n$ и $\delta=4\pi/n$ тождественно равны нулю:

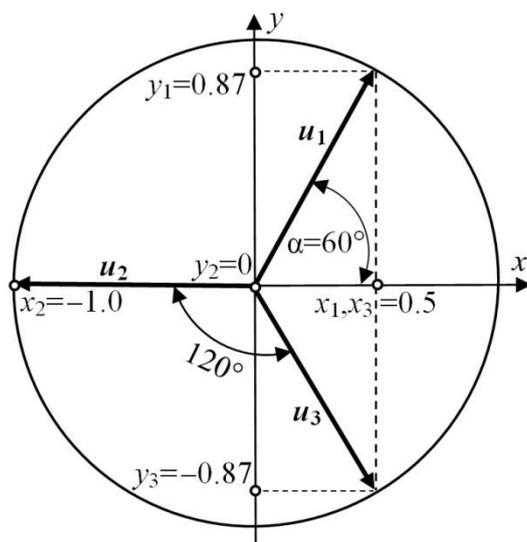


Рис. 1. Векторная диаграмма отсчетов для $n=3$; $\alpha=\pi/3$

$$a[\cos \alpha + \cos(\alpha + \delta) + \cos(\alpha + 2\delta) + \dots + \cos(\alpha + (n - 1)\delta)] = 0; \quad (1)$$

$$ia[\sin \alpha + \sin(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + 2\delta) + \dots + \sin(\alpha + (n - 1)\delta)] = 0.$$

Сумму квадратов отсчетов можно получить, используя уравнения (1) и известные тригонометрические формулы $\cos^2 x = (1 + \cos 2x)/2$; $\sin^2 x = (1 - \cos 2x)/2$:

$$a^2[\cos^2 \alpha + \cos^2(\alpha + \delta) + \cos^2(\alpha + 4\delta) + \dots + \cos^2(\alpha + (n - 1)2\delta)] = a^2 n/2; \quad (2)$$

$$a^2[\sin^2 \alpha + \sin^2(\alpha + \delta) + \sin^2(\alpha + 4\delta) + \dots + \sin^2(\alpha + (n - 1)2\delta)] = a^2 n/2.$$

Если амплитуда $a=1$, то сумма квадратов отсчетов, приходящихся на период синусоидального сигнала, определяется только количеством отсчетов.

Уравнения (2) для $n=3$, $n=4$, $a=1$ принимают вид:

$$\cos^2 \alpha + \cos^2(\alpha + 2\pi/3) + \cos^2(\alpha + 4\pi/3) = 3/2; \quad (3, a)$$

$$\sin^2 \alpha + \sin^2(\alpha + 2\pi/3) + \sin^2(\alpha + 4\pi/3) = 3/2;$$

$$\cos^2 \alpha + \cos^2(\alpha + \pi/2) + \cos^2(\alpha + \pi) + \cos^2(\alpha + 3\pi/2) = 4/2; \quad (3, б)$$

$$\sin^2 \alpha + \sin^2(\alpha + \pi/2) + \sin^2(\alpha + \pi) + \sin^2(\alpha + 3\pi/2) = 4/2.$$

Вывод можно сформулировать так: *если на интервал, равный периоду синусоидального сигнала $T=1/f$ с единичной амплитудой приходится n отсчетов, следующих с шагом по углу $2\pi/n$, то при $n>2$ независимо от фазы первого отсчета их сумма равна нулю, а сумма их квадратов равна $n/2$.*

В уравнениях (3, б) каждая пара соседних отсчетов квадратурно связана:

$$\cos^2 \alpha + \cos^2(\alpha + \pi/2) = 1;$$

$$\cos^2(\alpha + \pi/2) + \cos^2(\alpha + \pi) = 1;$$

$$\cos^2(\alpha + \pi) + \cos^2(\alpha + 3\pi/2) = 1.$$

Первый и четвертый отсчеты также образуют «квadrатуру»:

$$\cos^2 \alpha + \cos^2(\alpha + 3\pi/2) = 1.$$

Для второго уравнения (3, б) аналогично.

Образование смежных «квадратур» позволяет определять фазу, на которую приходится отсчет, и амплитуду [8]. Это позволяет составлять такие ряды отсчетов, в которых любые соседние пары будут образовывать «квадратуры». Например, при $n=4$ ряд отсчетов на временном промежутке, равном длительности N периодов, имеет вид:

$$\cos \alpha, \cos(\alpha + \delta), \cos(\alpha + 2\delta), \cos(\alpha + 3\delta), \dots; \delta = \pi N/2, N = 1, 3, 5, 7, 9, \dots \quad (4)$$

Из сказанного следует: если на интервал в N периодов синусоиды с единичной амплитудой приходится n отсчетов, следующих с шагом по углу $2\pi N/n$, то при $n > 2$ сумма их квадратов равна $n/2$. Это означает, что и в этом случае ($n=4$) независимо от фазы первого отсчета имеется полная информация о сигнале (о фазе и амплитуде). Такой результат согласуется с теоремой отсчетов для огибающей.

Из (4) следует, что полную информацию об амплитуде и фазе синусоиды с периодом колебаний T можно получать и в случае, когда период следования отсчетов T_0 больше периода синусоиды, то есть $T_0=5T/4, 7T/4, 9T/4, \dots$.

Аналогичные выводы можно сделать и для варианта $n=3$, с той лишь разницей, что N должно быть четным и не кратным трем ($N=4, 8, 10, \dots$), то есть $T_0=4T/3, 8T/3, 10T/3, \dots$.

Практические результаты предлагаемого способа

Пусть реальный аналоговый сигнал описывается выражением

$$u(t) = a(t) \cos [2\pi(f + F)t + \alpha]. \quad (5)$$

Здесь $F=2V_r/\lambda$ – доплеровский сдвиг, который определяется радиальной скоростью объекта V_r и длиной рабочей волны λ . Известны значения f и максимальная частота f_{\max} в спектре модулирующей функции $a(t)$ принятого сигнала. Отношение сигнал/шум $P_s/P_n \gg 1$.

Если доплеровский сдвиг пренебрежимо мал, то ориентируясь на характеристики $a(t)$ и теорему отсчетов, можно выбирать и формировать период следования отсчетов T_0 способом, который определяет выражение (4). В результате при сохранении информации об амплитуде и фазе несущей и модулирующей функции $a(t)$ имеем кратное сокращение подлежащих обработке числа отсчетов, что увеличивает время для выполнения всего комплекса операций в режиме on-line [8].

Оценка погрешностей при наличии доплеровского сдвига

Доплеровский сдвиг F в радиолокационных наблюдениях приводит к нарушению квадратурных соотношений в уравнениях (2). Естественно, в этом случае использование предлагаемого способа цифрового преобразования аналогового радиолокационного сигнала вызывает погрешности в определении амплитуды и фазы. Погрешность зависит от числа периодов N , на общей длительности которых осуществляется n отсчетов, опорной частоты сигнала f , длины зондирующей волны λ , фазы первого отсчета α и радиальной скорости объекта V_r . Идеальный случай радиолокационного сигнала – зондирование прямоугольными радиоимпульсами большой длительности.

Результаты расчета относительных погрешностей определения амплитуды сигнала для радара с $N=1, f=1$ МГц, $\lambda=1$ м приведены в таблице. (Для удобства погрешность дана в промилле.) Скорость 1 км/с соответствует максимальным скоростям современных истребителей.

Если используются другие значения λ, f и N , погрешность, приведенную в таблице, можно пересчитать, умножая ее на величину $a = 10N/(\lambda f)$, где размерность λ [м], $a f$ [МГц]. Для приведенных характеристик радара относительные погрешности при радиальных скоростях объектов меньше 1 км/с ничтожно малы. Например, для радара с характеристиками $N=1, \lambda=2$ м, $f=1$ МГц для скоростей меньше 1 км/с погрешность не превышает 0,3 %.

$N=1, \lambda=1\text{м}, f=10\text{ МГц}$									
α°	$-V_r, \text{ км/с}$				$+V_r, \text{ км/с}$				α°
	8	4	2	1	1	2	4	8	
0	-0,1	-0,02	-0,003	0,0	0,0	0,003	0,02	0,1	0
45	-5,0	-2,6	-1,3	-0,6	0,6	1,3	2,6	5,0	45
90	0,1	0,02	0,003	0,0	0,0	-0,003	-0,02	-0,1	90
135	5,0	2,6	1,3	0,6	-0,6	-1,3	-2,6	-5,0	135
180	-0,1	-0,02	-0,003	0,0	0,0	0,003	0,02	0,1	180
225	-5,0	-2,6	-1,3	-0,6	0,6	1,3	2,6	5,0	225

Свести к минимуму влияние ошибки при больших N и иных характеристиках радара можно либо разработав корректирующие алгоритмы, либо сформировав последовательность (4) с применением сдвоенных отсчетов с интервалом $T/4$ (рис. 2). Если амплитуда определяется с использованием сдвоенных отсчетов, то такая последовательность существенно смягчает требования к узкополосности, доплеровский сдвиг и изменения огибающей сказываются меньше (возможные интервалы $T/4$ или $3T/4$, или $5T/4$ в зависимости от промежуточной частоты).

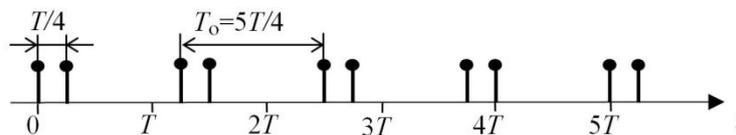


Рис. 2. Диаграмма следования отсчетов (вариант $n=4; N=5$)

Выводы

Предлагаемое преобразование в цифровой формат узкополосных радиосигналов с известной центральной частотой спектра позволяет существенно снизить объем выполняемых операций и может быть применимо при обработке сигналов некогерентного рассеяния, сигналов радиовещательных каналов с амплитудной модуляцией, а также и при обработке радиолокационных сигналов с фазовой ($0, \pi$) манипуляцией, если длительность элементов кода существенно больше периода сигнала опорной частоты.

Список литературы:

1. Skolnik M.I. Introduction to RADAR Systems. Second Ed. Singapore : McGraw Hill Publications, 1981.
2. Ziomek C., Corredoura P. Digital I/Q demodulator // Proceedings Particle Accelerator Conference 1-5 May 1995 USA, IEEE 2002. DOI: 10.1109/PAC.1995.505652.
3. Niranjana R.K., Rajendra Naik B. Approach of Pulse Parameters Measurement Using Digital IQ Method // International Journal of Information and Electronics Engineering. 2014. Vol. 4, No. 1. P. 31-35. DOI: 10.7763/IJIEE.2014.
4. Taran V.I., Rogozhkin E.V., Grigorenko E.I., Gridin A.N., Golobin V.I., Liokumovich V.I., Chernyaev S.V. Specialized measurement system of the Khar'kov Polytechnic Institute for investigating the ionosphere by the incoherent-scattering method // Radiophysics and Quantum Electronics. 1975. Vol. 18, Iss. 9, P. 1026-1027. DOI: 10.1007/BF01038201.
5. Рогожкин Е.В., Маенко Ф.А. Цифровой коррелометр для исследований сигналов с известной центральной частотой спектра // Вестник ХПИ. Сер. "Автоматика и приборостроение". Харьков, 1975. №103 (2). С. 70-74.
6. Рогожкин Е.В., Белозеров Д.П., Еремин А.Н. Информационные возможности цифровой обработки радиосигналов при известной несущей частоте // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. темат. вып. : Радиопизика и ионосфера. Харьков : НТУ "ХПИ", 2003. № 7, т. 4. С. 81-88.
7. Емельянов Л.Я., Лялюк А.И., Рогожкин Е.В. Особенности обработки сигналов некогерентного рассеяния на радаре Института ионосферы // Радиотехника. 2015. Вып. 182. С. 29-33.
8. Рогожкин Е.В., Подъячий Ю.И., Емельянов Л.Я. Модификация цифрового представления радиолокационных сигналов // Радиотехника. 2019. Вып. 196. С. 69-75.

Поступила в редколлегию 26.08.2020

Сведения об авторах:

Рогожкин Евгений Васильевич – д-р физ.-мат. наук, Национальный технический университет «Харьковский Политехнический Институт», заведующий кафедрой «Радиоэлектроника», Украина, e-mail: rogojkiner@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5310-3319>

Подъячий Юрий Иванович – канд. физ.-мат. наук, Национальный технический университет «Харьковский Политехнический Институт», профессор кафедры «Радиоэлектроника», Украина, e-mail: yuiyvod@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4848-947X>

Емельянов Леонид Яковлевич – канд. физ.-мат. наук, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, зав. отделом, Украина, e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2117-2675>