

УДК 621.376

ДОНАЙКВИСТОВА ВЫБОРКА И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ЛЧМ НА ОСНОВЕ ДРОБНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

НИНГФЕЙ ДОНГ¹, ДЖАНКСИН ВАНГ²¹Университет Яньтайя,
Китай, Яньтай, 264005²Нанкинский университет науки и технологий,
Китай, Нанкин, 210094

Аннотация. В последние годы большинство методов донайквистовой (sub-Nyquist) выборки и оценки параметров сигналов линейной частотной модуляции (ЛЧМ) основываются на теории сжатого распознавания CS (compressed sensing). Однако вычислительная сложность почти всех таких алгоритмов CS реконструкции высокая, что делает их трудными для аппаратной реализации. В данной статье предложена новая схема донайквистовой выборки ЛЧМ сигналов и метод оценки параметров малой сложности. Некогерентная выборка в теории CS внедряется в систему донайквистовской выборки, но, ни один алгоритм CS реконструкции не используется для оценки параметров. На основе накопления энергии ЛЧМ сигнала в пределах области определения дробного преобразования Фурье FRFT (fractional Fourier transform) скорость изменения частоты и центральная частота могут быть оценены с помощью линейных операций. Следовательно, предложенный метод оценки может быть легко реализован по сравнению с другими методами оценки на основе CS. Результаты имитационного моделирования подтверждают эффективность и точность метода.

Ключевые слова: сжатие дискретизации; дробное преобразование Фурье; линейная частотная модуляция (ЛЧМ); оценка параметров

1. ВВЕДЕНИЕ

Сигналы линейной частотной модуляции (ЛЧМ), также называемые chirp-сигналы, широко используются в различных областях, таких как коммуникация, гидролокация и радиолокация. Поскольку ЛЧМ-сигналы во многих приложениях являются широкополосными сигналами с большим произведением время–полоса частот, то широкая полоса частот приводит к трудностям обнаружения и обработки данного сигнала.

Согласно теории сжатого распознавания CS (compressed sensing) [1, 2], где сигнал имеет разреженное представление в некотором базисе, всю необходимую информацию для точной

реконструкции сигнала можно получить используя относительно небольшие неадаптивные линейные измерения. В некоторых ситуациях реконструкция сигнала не требуется, тогда теория CS может быть использована для оценки параметров сигнала с помощью непосредственной обработки данных CS [3–5].

Предложены некоторые методы оценки параметров ЛЧМ-сигналов на основе теории CS. Основная идея [6–8] — разработка избыточного словаря сигнального соответствия и затем нахождение наиболее подходящего элемента сигнала в словаре. Параметры ЛЧМ-сигнала могут быть оценены с помощью позиции элемента. Поскольку оценка параметров в

- Signal Processing*, Vol. 4, No. 2, P. 445-460, Apr. 2010. DOI: [10.1109/JSTSP.2009.2039178](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2009.2039178).
4. Song, Zha; Peigu, Liu; Jijun, Huang, "Parameter estimation of LFM signal via compressive sensing," *Proc. of IET Int. Radar Conf.*, 14-16 Apr. 2013, Xi'an, China. IEEE, 2013, pp. 1-5. DOI: [10.1049/cp.2013.0315](https://doi.org/10.1049/cp.2013.0315).
 5. Joneidi, M.; Zaeemzadeh, A.; Rezaeifar, S.; Abavisani, Mahdi; Rahnavard, Nazanin. "LFM signal detection and estimation based on sparse representation," *Proc. of 49th Annual Conf. on Information Sciences and Systems*, 18-20 Mar. 2015, Baltimore, MD, USA. IEEE, 2015, pp. 1-5. DOI: [10.1109/CISS.2015.7086856](https://doi.org/10.1109/CISS.2015.7086856).
 6. Yang, Z.; Cheng, W. Z. "DOA estimation of LFM signals based on compressed sensing," *Application Research Computers*, Vol. 26, No. 12, P. 4642-4644, Dec. 2009. DOI: [0.3969/j.issn.1001-3695.2009.12.067](https://doi.org/0.3969/j.issn.1001-3695.2009.12.067).
 7. Liu, Bing; Fu, Ping; Xu, Cong; Gai, Jian-xin. "Parameter estimation of LFM signal with compressive measurements," *J. Convergence Inf. Technol.*, Vol. 6, No. 3, P. 303-310, Mar. 2011. DOI: [10.4156/jcit.vol6.issue3.35](https://doi.org/10.4156/jcit.vol6.issue3.35).
 8. Wang, K.; Ye, W.; Lao, G.; Wang, Y. "Fast algorithm on parameter estimation of wideband LFM signal based on down-chirp and CS," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Signal Processing, Communications and Computing*, 5-8 Aug. 2014, Guilin, China. IEEE, 2014, pp. 133-136. DOI: [10.1109/ICSPCC.2014.6986168](https://doi.org/10.1109/ICSPCC.2014.6986168).
 9. Yan, H.; Dong, C.; Zhao, G. "Parameter estimation of LFM signal based on compressed sensing," *Chinese J. Radio Science*, Vol. 30, No. 3, P. 449-456, June 2015. DOI: [10.13443/j.cjors.2014070103](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2014070103).
 10. Tropp, J. A.; Laska, J. N.; Duarte, M. F.; Romberg, Justin K.; Baraniuk, Richard G. "Beyond Nyquist: Efficient sampling of sparse bandlimited signals," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 56, No. 1, P. 520-544, Jan. 2010. DOI: [10.1109/TIT.2009.2034811](https://doi.org/10.1109/TIT.2009.2034811).
 11. Almeida, L. B. "The fractional Fourier transform and time-frequency representations," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 42, No. 11, P. 3084-3091, Nov. 1994. DOI: [10.1109/78.330368](https://doi.org/10.1109/78.330368).
 12. Pei, S.-C.; Ding, J.-J. "Closed-form discrete fractional and affine Fourier transforms," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 48, No. 5, P. 1338-1353, May 2000. DOI: [10.1109/78.839981](https://doi.org/10.1109/78.839981).
 13. Fang, B.; Huang, G.; Gao, J. "Sub-Nyquist sampling and reconstruction model of LFM signals based on blind compressed sensing in FRFT domain," *Circuits, Systems, and Signal Processing*, Vol. 34, No. 2, P. 419-439, Feb. 2015. DOI: [10.1007/s00034-014-9859-5](https://doi.org/10.1007/s00034-014-9859-5).
 14. Wang, H.; Qi, L.; Zhang, F.; Zheng, N. "Parameters estimation of the LFM signal based on the optimum seeking method and fractional Fourier transform," *Proc. of Int. Conf. on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering*, 16-18 Dec. 2011, Changchun, China. IEEE, 2011, pp. 2331-2334. DOI: [10.1109/TMEE.2011.6199687](https://doi.org/10.1109/TMEE.2011.6199687).
 15. Pei, S.-C.; Yeh, M.-H.; Tseng, C.-C. "Discrete fractional Fourier transform based on orthogonal

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Donoho, D. L. "Compressed sensing," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 52, No. 4, P. 1289-1306, Apr. 2006. DOI: [10.1109/TIT.2006.871582](https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582).
2. Candes, E. J.; Wakin, M. B. "An introduction to compressive sampling," *IEEE Signal Processing Mag.*, Vol. 25, No. 2, P. 21-30, Mar. 2008. DOI: [10.1109/MSP.2007.914731](https://doi.org/10.1109/MSP.2007.914731).
3. Davenport, M. A.; Boufounos, P. T.; Wakin, M. B.; Baraniuk, Richard G. "Signal processing with compressive measurements," *IEEE J. Selected Topics*

projections,” *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 47, No. 5, P. 1335-1348, May 1999. DOI: [10.1109/78.757221](https://doi.org/10.1109/78.757221).

16. Rabah, H.; Amira, A.; Mohanty, B. K.; Almaaded, S.; Meher, P. K. “FPGA implementation of orthogonal matching pursuit for compressive sensing reconstruction,” *IEEE Trans. Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*,

Vol. 23, No. 10, P. 2209-2220, Oct. 2015. DOI: [10.1109/TVLSI.2014.2358716](https://doi.org/10.1109/TVLSI.2014.2358716).

17. Chen, Z.; Hou, X.; Gong, C.; Qian, X. “Compressive sensing reconstruction for compressible signal based on projection replacement,” *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 75, No. 5, P. 2565-2578, Mar. 2016. DOI: [10.1007/s11042-015-2578-5](https://doi.org/10.1007/s11042-015-2578-5).

Поступила в редакцию 30.04.2017

После переработки 22.07.2018
