

Эффективность магнного резервуарного компьютера на основе кольцевого генератора

А.В. Кондрашов¹, Ал.А. Никитин¹, Ан.А. Никитин¹, М.П. Костылев², А.Б. Устинов¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

²University of Western Australia

Аннотация: в данной работе мы численно исследовали эффективность магнного резервуарного компьютера на основе кольцевого генератора. В качестве основы для построения модели была использована теория нелинейных спин-волновых переходных процессов в магнитных пленках. Для оценки характеристик производительности резервуарного компьютера применялись тест кратковременной памяти (ТКП) и тест контроля четности (ТКЧ). Полученные результаты продемонстрировали высокий потенциал для улучшения характеристик резервуара и его вычислительных способностей. В ходе моделирования был получен набор параметров системы, использование которых позволяет увеличить емкости ТКП и ТКЧ в 2.5 раза по сравнению с экспериментально продемонстрированными.

Ключевые слова: резервуарный компьютер, маггоника, спиновые волны, нейроморфные вычисления

1. Введение

Резервуарные компьютеры (РК) являются одним из видов рекуррентных нейронных сетей, представляющих собой сложную систему взаимосвязанных нелинейных узлов, называемых искусственными нейронами. В отличие от традиционных рекуррентных сетей в процессе обучения РК определяются весовые коэффициенты только выходного слоя. Это в значительной степени упрощает процесс обучения, не снижая эффективности работы системы [1]. Резервуарные компьютеры демонстрируют высокую производительность при обработке в режиме реального времени различных сложных задач [2-4].

Важной особенностью, которую необходимо учитывать при разработке РК, является наличие нелинейности и «затухающей» памяти в динамической системе, используемой в качестве резервуара. В последние годы значительный интерес исследователей привлекает возможность использования магнных систем в качестве основы для построения РК [5-10]. Одним из возможных эффективных способов для реализации физического магнного РК является использование спин-волнового кольцевого генератора [11]. Недавно была предложена теоретическая модель нелинейных спин-волновых переходных процессов в режиме одночастотной автогенерации [12]. Основными физическими эффектами, определяющими такие переходные процессы, являются нелинейное затухание спиновых волн [13-15] и их нелинейный фазовый набег [14-22]. Модель, предложенная в [12], позволяет численно промоделировать работу экспериментального магнного РК. Вместе с тем, подробного исследования влияния параметров активного кольца на результаты ТКЧ и ТКП еще не проводилось.

В настоящей работе мы численно исследовали эффективность магнного РК. Анализ влияния параметров генератора позволит сформулировать основные требования для повышения эффективности работы РК.

2. Численная модель

Численная модель резервуарного компьютера на основе спин-волнового

кольцевого генератора подробно описана в работе [12]. Основным элементом генератора являлась нелинейная спин-волновая линия задержки (СВЛЗ) на поверхностных спиновых волнах [16], которая представляла собой ферритовую пленку, размещенную на спин-волновых антеннах. Выход СВЛЗ соединялся с ее входом через цепь обратной связи, состоящую из усилителя, направленного ответвителя и переменного аттенюатора. Поверхностные спиновые волны, распространявшиеся в ферритовой пленке, обеспечивали нелинейность и память, необходимые для работы резервуара. Усилитель компенсировал потери для перевода кольца в режим монохроматической генерации. Электронный аттенюатор служил для ввода данных в кольцо путем регулировки коэффициента усиления кольца G_a . Значения коэффициента затухания аттенюатора задавались бинарными значениями «0» и «1». Отсутствие потерь в аттенюаторе соответствовало логическому нулю. Единице соответствовало некоторое ненулевое значение коэффициента затухания аттенюатора. Переключение между «0» и «1» приводило к переходу резервуара из высокоэнергетического стационарного состояния в низкоэнергетическое и наоборот. Таким образом, входные данные представляли собой последовательность импульсов. Направленный ответвитель выделял часть циркулирующего в кольце сигнала для дальнейшего анализа. Выходной сигнал представлял собой временные реализации, поведение которых определяется изменением коэффициента усиления кольца.

Моделирование было проведено в несколько этапов. Каждый этап был посвящен исследованию влияния одного из параметров, определяющих производительность резервуара. Используя данные из экспериментальной работы [8], был сформирован набор базовых параметров: внешнее магнитное поле $H = 1780$ Э; намагниченность насыщения $4\pi M = 1990$ Гс; полуширина ферромагнитного резонанса $\Delta H = 0,5$ Э; толщина ферритовой пленки $L = 6,1$ мкм; расстояние между спин-волновыми антеннами $l = 8,3$ мм; коэффициент усиления усилителя $G_a = 380$; декремент нелинейного затухания третьего и пятого порядков $\eta_1 = 2$ нс⁻¹, $\eta_2 = 2$ пс⁻¹ соответственно. Эти параметры задавали собственную частоту 7,28 ГГц и время задержки спиновых волн в СВЛЗ $\tau_{sw} = 215$ нс. Поскольку электрическая длина СВЧ компонентов генератора пренебрежимо мала по сравнению с электрической длиной спин-волновой линии задержки, можно считать, что длина кольца равна расстоянию между антеннами, а время обхода сигнала по кольцу τ_{ring} равно времени задержки τ_{sw} .

Оценка эффективности резервуарного компьютера проводилась путем расчета емкостей ТКП и ТКЧ. Алгоритм тестирования приведен в [8]. Ниже мы кратко опишем основные особенности поставленной задачи. В качестве входного сигнала мы использовали случайную последовательность, состоящую из 4200 импульсов длительностью $T_p = 1998$ нс. Используя общепринятую технику мультиплексирования, по выходным временным реализациям определялись состояния 50 виртуальных нейронов для каждого импульса. Первые 200 импульсов не учитывались при проведении анализа. По последующим 2000 импульсам проводилось обучение резервуара. Емкости ТКП и ТКЧ рассчитывались по оставшимся 2000 импульсов.

3. Результаты моделирования

Результаты моделирования для базового набора параметров генератора показали, что резервуар «помнит» только один предыдущий импульс, что характеризуется низкими значениями емкостей. Так емкость ТКП оказалась 1.64, ТКЧ – 1.1.

На рисунке 1 показаны графики зависимости емкостей ТКП и ТКЧ для систематически варьируемых параметров спин-волнового кольцевого автогенератора. Наиболее заметное влияние на емкости оказали длительность входных импульсов, толщина ферромагнитной пленки, расстояние между антеннами спиновых волн, коэффициент усиления кольца, изменение коэффициента усиления кольца при вводе

входной последовательности, а также значение декремента нелинейного затухания третьего порядка. Изменение других параметров не оказывало заметного влияния на результаты тестирования.

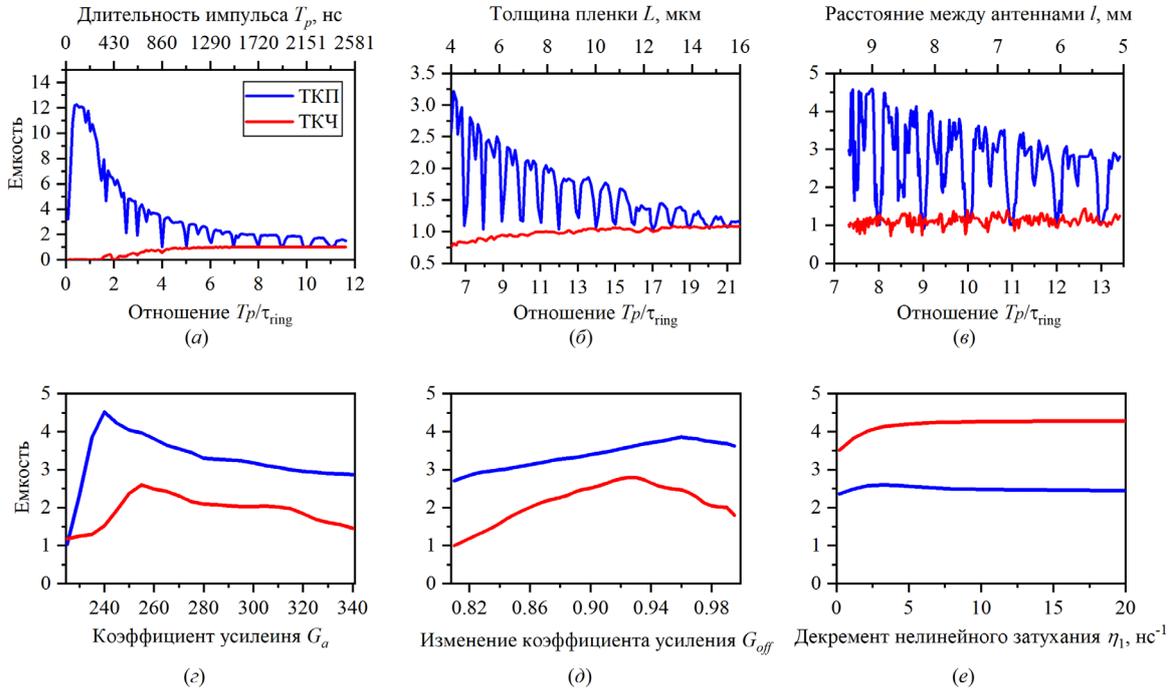


Рисунок 1. Изменение значений емкостей ТКП (синяя линия) и ТКЧ (красная линия) при различных параметрах спин-волнового кольцевого генератора: (а) – длительность импульса входного сигнала, (б) – толщина ферромагнитной пленки, (в) – расстояние между входной и выходной антеннами спиновых волн, (г) – коэффициент усиления кольца, (д) – изменение коэффициента усиления при вводе входной последовательности, (е) – декремент нелинейного затухания третьего порядка.

На рисунке 1(а-в) показано, как изменяется емкость ТКП и ТКЧ при изменении отношения длительности импульса к времени распространения сигнала по кольцу. Известно, что толщина ферритовой пленки определяет групповую скорость спиновых волн V_{gr} . Следовательно, время распространения сигнала по кольцу определяется выражением $\tau_{ring} = l/V_{gr}$. Поэтому при фиксированной длительности входных импульсов T_p изменение как толщины ферритовой пленки, так и расстояния между антеннами, приводит к изменению отношения T_p/τ_{ring} (см. рисунок 1 (б, в)).

Из рисунка можно видеть, что с ростом отношения T_p/τ_{ring} ёмкость ТКП спадает. Зависимость характеризуется рядом минимумов, которые возникают вблизи точек, где длительность импульса кратна времени прохода сигнала по кольцу. Спадающий характер зависимости объясняется тем, что с ростом T_p/τ_{ring} внешнее воздействие влияет на меньшее число импульсов циркулирующих в кольце, что эквивалентно уменьшению эффекта «памяти» резервуара. Провалы на зависимости объясняются резким спадом квадрата корреляционного коэффициента. Емкость ТКЧ при использовании коротких импульсов сильно снижается. Такое поведение объясняется сильным влиянием шума на форму выходного сигнала, который разрушает его тем сильнее, чем меньше длительность импульса.

Таким образом, для повышения эффективности магنونных резервуарных вычислений в исследуемых системах необходимо варьировать параметры так, чтобы величина T_p не была крана τ_{ring} . При этом необходимо учитывать, что в более тонких пленках и длинных кольцах значение ёмкости ТКП больше, так как в них время

распространения сигнала становится ближе к значению длительности входных импульсов.

Коэффициент усиления усилителя в цепи обратной связи G_a определяет во сколько раз увеличивается амплитуда циркулирующего в кольце сигнала. Напомним, что ввод входного сигнала в кольцо производится путем модуляции коэффициента усиления кольца. Логическому нулю соответствует высокий коэффициент усиления кольца. В модели он принимался за G_a . Логической единице соответствует низкий уровень усиления, он принимался $G_{on} = G_a (1 - G_{off})$, где G_{off} – величина определяющая изменение коэффициента усиления кольца. Значение G_{off} выбиралось из условия наибольшего соответствия ранее опубликованным работам. На всех этапах моделирования G_{off} было равно 0.94.

Рисунок 1(г,д) показывает, как влияет значение G_a и G_{off} на значение емкостей для тестов кратковременной памяти и контроля четности. Как видно из рисунков обе зависимости имеют максимум. Предельные значения G_a и G_{off} в выбранном диапазоне характеризуются очень быстрым переходом резервуара из высокоэнергетического стационарного состояния в низкоэнергетическое и обратно по причине либо близкого расположения этих состояний при малых G_a , либо высокого усиления при больших G_a . В результате значительно снижается «память» резервуара и значения емкостей. Максимальное значение емкости определяется максимальным временем перехода резервуара из высокоэнергетического в низкоэнергетическое состояния.

Влияние нелинейного затухания (см. рисунок 1 (е)) можно объяснить следующим образом. При большой амплитуде сигнала циркулирующего в кольце затухание спиновых волн возрастает, что приводит к снижению коэффициента усиления кольца. Увеличение декремента затухания приводит к более сильному снижению усиления. Результаты, представленные на рисунке, соответствуют $G_a = 340$. Таким образом, снижение коэффициента усиления будет приводить к небольшому росту емкостей.

Учитывая все выше описанное, мы сформировали набор параметров магنونного РК, значительно улучшающих его производительность: толщина пленки $L = 5.65$ мкм; расстояние между спин-волновыми антеннами $l = 8$ мм; коэффициент усиления $G_a = 255$; декременты нелинейного затухания третьего $\eta_1 = 1,19$ нс⁻¹ и пятого $\eta_2 = 3,17$ пс⁻¹ порядков. Данные параметры соответствуют частоте автоколебаний 7.28 ГГц и времени задержки СВ в ферритовой пленке $\tau_{ring} = 223$ нс (соотношение $T_p/\tau_{ring} = 8.679$). В этом случае магنونный РК характеризуется значениями емкости ТКП и ТКЧ, равными 3.97 и 2.6, соответственно.

4. Заключение

Проведенное численное исследование продемонстрировало возможность значительного увеличения эффективности магنونного РК за счет модификации параметров спин-волнового кольцевого генератора. Использование предложенного набора параметров позволило увеличить производительность ТКП и ТКЧ в 2.5 раза по сравнению с экспериментально продемонстрированными.

Работа в СПбГЭТУ выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках «Мегагранта» (соглашение № 075-15-2021-609).

Список литературы

1. Tanaka G. et al. Recent advances in physical reservoir computing: A review //Neural Networks. – 2019. – Т. 115. – С. 100-123.
2. Jaeger H. et al. Optimization and applications of echo state networks with leaky-integrator neurons //Neural networks. – 2007. – Т. 20. – №. 3. – С. 335-352.

3. Jaeger H., Haas H. Harnessing nonlinearity: Predicting chaotic systems and saving energy in wireless communication //science. – 2004.
4. Pathak J. et al. Model-free prediction of large spatiotemporally chaotic systems from data: A reservoir computing approach //Physical review letters. – 2018. – T. 120. – №. 2. – C. 024102.
5. Jiang W. et al. Physical reservoir computing using magnetic skyrmion memristor and spin torque nano-oscillator //Applied Physics Letters. – 2019. – T. 115. – №. 19. – C. 192403.
6. Nakane R., Tanaka G., Hirose A. Reservoir computing with spin waves excited in a garnet film //IEEE access. – 2018. – T. 6. – C. 4462-4469.
7. Papp A., Csaba G., Porod W. Characterization of nonlinear spin-wave interference by reservoir-computing metrics //Applied Physics Letters. – 2021. – T. 119. – №. 11. – C. 112403.
8. Watt S., Kostylev M. Reservoir computing using a spin-wave delay-line active-ring resonator based on yttrium-iron-garnet film //Physical Review Applied. – 2020. – T. 13. – №. 3. – C. 034057.
9. Watt S., Kostylev M., Ustinov A. B. Enhancing computational performance of a spin-wave reservoir computer with input synchronization //Journal of Applied Physics. – 2021. – T. 129. – №. 4. – C. 044902.
10. Watt S. et al. Implementing a magnonic reservoir computer model based on time-delay multiplexing //Physical Review Applied. – 2021. – T. 15. – №. 6. – C. 064060.
11. Ustinov A. B. et al. Progressive development of spin wave chaos in active-ring oscillators //Physical Review B. – 2021. – T. 104. – №. 14. – C. L140410.
12. Nikitin A. A. et al. Theoretical model for nonlinear spin-wave transient processes in active-ring oscillators with variable gain and its application for magnonic reservoir computing //Journal of Applied Physics. – 2022. – T. 131. – №. 11. – C. 113903.
13. Scott M. M. et al. Nonlinear damping of high-power magnetostatic waves in yttrium-iron-garnet films //Journal of applied physics. – 2004. – T. 95. – №. 11. – C. 6294-6301.
14. Ustinov A. B., Kalinikos B. A. Power-dependent switching of microwave signals in a ferrite-film nonlinear directional coupler //Applied physics letters. – 2006. – T. 89. – №. 17. – C. 172511.
15. Ustinov A. B., Kalinikos B. A. Ferrite-film nonlinear spin wave interferometer and its application for power-selective suppression of pulsed microwave signals //Applied physics letters. – 2007. – T. 90. – №. 25. – C. 252510.
16. Ustinov A. B., Kalinikos B. A. A microwave nonlinear phase shifter //Applied Physics Letters. – 2008. – T. 93. – №. 10. – C. 102504.
17. Hansen U. H., Demidov V. E., Demokritov S. O. Dual-function phase shifter for spin-wave logic applications //Applied Physics Letters. – 2009. – T. 94. – №. 25. – C. 252502.
18. Ustinov A. B., Drozdovskii A. V., Kalinikos B. A. Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing //Applied physics letters. – 2010. – T. 96. – №. 14. – C. 142513.
19. Ustinov A. B., Kalinikos B. A., Lähderanta E. Nonlinear phase shifters based on forward volume spin waves //Journal of Applied Physics. – 2013. – T. 113. – №. 11. – C. 113904.
20. Kuanr B. K. et al. Monolithic microwave nonlinear phase shifter //IEEE Magnetics Letters. – 2015. – T. 6. – C. 1-4.
21. Kozin A. E., Ustinov A. B. Nonlinear damping and nonlinear phase shift of intense spin waves in screened ferrite films //Technical Physics. – 2019. – T. 64. – №. 2. – C. 265-269.
22. Ustinov A. B. et al. Induced nonlinear phase shift of spin waves for magnonic logic circuits //Applied Physics Letters. – 2021. – T. 119. – №. 19. – C. 192405.