

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-83-50>

УДК 004.7, 004.056

ВОЛОКИТА Артем

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-9069-5544>

e-mail: artem.volokita@kpi.ua

МЕЛЕНЧУКОВ Микита

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0005-6615-4306>

e-mail: melenchukov.nikita@gmail.com

МЕТОД ВИБОРУ ЛІДЕРА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМУНІКАЦІЙ В РОЇ БПЛА

Сучасні безпілотні літальні апарати дедалі частіше застосовуються у складі рою, де необхідна координація дій та надійний обмін даними між елементами системи. У статті запропоновано метод вибору лідера, спрямований на підвищення ефективності та стійкості комунікацій у розподілених системах. Метод враховує топологію рою та обмеження радіусу зв'язку, що дозволяє зменшити затримку передачі та навантаження на вузли-ретранслятори.

Проведене моделювання показало зменшення середнього та максимального часу передачі до 15%, а також зниження ретрансляційного навантаження до 42% у топологіях зі значними обмеженнями зв'язності. Отримані результати підтверджують доцільність застосування методу для підвищення ефективності та безпеки групового польоту БПЛА.

Ключові слова: розподілені системи, вибір лідера, ефективність комунікацій, безпека, симуляція.

VOLOKYTA Artem, MELENCHUKOV Mykyta

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute"

LEADER ELECTION METHOD FOR IMPROVING COMMUNICATION EFFICIENCY IN UAV SWARMS

Unmanned aerial vehicle (UAV) swarms are increasingly employed in tasks requiring high coordination, resilience, and adaptability of communication systems. Ensuring efficient and reliable information exchange among swarm members is a critical challenge, particularly in dynamic environments with varying topology and communication constraints. Traditional leader election approaches in distributed systems rely primarily on static criteria such as energy levels, node degree, or link reliability. However, these methods often overlook the influence of message delivery delay, which directly affects synchronization, stability, and mission performance in UAV swarms.

This paper introduces an enhanced leader election method for UAV swarms that combines classical parameters with a novel temporal criterion: the estimated time required for a candidate leader to deliver messages to all swarm members. By integrating this factor into the utility function, the method accounts for both structural and dynamic characteristics of the swarm network. This approach allows for improved alignment of inter-drone interactions, reduced communication delays, and minimized relay load while maintaining energy efficiency.

The proposed method was evaluated through a series of simulations conducted in ROS 2 (Humble) with Gazebo. Swarms of 10 UAVs were modeled across different formations—line, wedge, and cube—under varying communication ranges. Leader failure scenarios were simulated to test re-election performance. Results demonstrated significant improvements: up to 15% reduction in average and maximum message delivery time and up to 42% decrease in relay load in topologies with limited connectivity. The most notable gains were observed in elongated (line) and constrained (cube with reduced range) formations, while performance improvements were less pronounced in densely connected networks. Importantly, energy consumption of elected leaders remained at a comparable level to baseline methods, confirming the efficiency of the proposed approach.

The study highlights the potential of incorporating temporal delivery metrics into leader election algorithms for UAV swarms. The method enhances communication robustness and coordination efficiency, thereby contributing to safer and more reliable swarm operations. Future research directions include integration with intrusion detection mechanisms and adaptive routing strategies for highly dynamic or adversarial environments.

Keywords: distributed systems, leader election, communication efficiency, security, simulation.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 14.08.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

У класичних підходах до вибору лідера у розподілених системах використовуються такі критерії, як рівень енергії, топологічні характеристики мережі чи надійність каналів зв'язку [1]. Для роїв БПЛА, які оперують у динамічних умовах, особливо важливим є фактор часу доставки повідомлень від лідера до інших учасників — контроль над затримками забезпечує узгодженість реакцій та зменшує ризик розсинхронізації [2].

У цій роботі пропонується метод вибору лідера, що поєднує класичні критерії з новим показником — оцінкою часу, необхідного потенційному лідеру для доставки повідомлення кожному члену рою. Такий підхід

дозволяє врахувати не лише статичні характеристики мережі, але й динаміку розповсюдження інформації, що особливо важливо в умовах змінної топології. Це сприяє підвищенню узгодженості взаємодії між дронами та зменшенню комунікаційних затримок, що безпосередньо впливає на стабільність і ефективність виконання групових місій.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Класичні алгоритми вибору лідера в розподілених системах були розроблені для різних топологій. Алгоритм Галлагера–Хамблєта–Спіра (GHS) забезпечує побудову мінімального дерева в довільному неорієнтованому графі, що слугує основою для розподіленого вибору лідера [3]. Алгоритм Ченга–Робертса, розроблений для кільцевих топологій, дозволяє обрати вузол із максимальним ідентифікатором за допомогою передачі повідомлень по колу [4], а його властивості було підтверджено у пізніших роботах з формальної верифікації [5]. Для більш загальних графів було запропоновано алгоритми типу Mega-Merger, які використовують ідею поступового злиття фрагментів із формуванням spanning tree і подальшим вибором кореня-лідера [6].

У дослідженнях роїв роботів увага приділяється простим і стійким алгоритмам. Karpov і Karpova розробили голосувальні алгоритми для статичних роїв, що базуються на локальному обміні вагами [7]. Walker та співавтори запропонували підхід, де кожен агент орієнтується на сусіда з найнижчим значенням стану, що забезпечує узгоджений рух [8]. Adoni та колеги реалізували модель leader-followers для роїв БПЛА, підтверджену експериментами в симуляційних середовищах [9].

Значна увага приділяється також консенсусним алгоритмам у динамічних і ненадійних мережах. Нещодавно Dev та співавт. запропонували SwarnRaft, який адаптує алгоритм Raft для координації рою дронів у середовищах зі зниженим рівнем GNSS-сигналу, забезпечуючи стійкість і толерантність до збоїв [10].

Ще одним важливим напрямом є дослідження впливу затримок і збоїв у зв'язку. Lucchesi показав, що затримки передачі повідомлень та відмови каналів можуть суттєво впливати на синхронізацію поведінки рою [11]. У роботі Zeng та ін. доведено, що в роях, підключених через мобільні мережі, існують граничні значення затримок, перевищення яких призводить до втрати стабільності керування [12].

ВИДІЛЕННЯ НЕДОСЛІДЖЕНИХ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Таким чином, у літературі окреслено чотири основні напрями:

- класичні алгоритми для статичних топологій ([3]–[6]);
- самоорганізаційні методи для роботизованих роїв ([7]–[9]);
- консенсусні алгоритми для динамічних умов і обмеженого зв'язку ([10]);
- аналіз затримок як фактора узгодженості рою ([11]–[12]).

Водночас відсутні підходи, які поєднували б класичні критерії (енергія, топологія) з урахуванням часу доставки повідомлень, що й визначає новизну запропонованого методу.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою дослідження є підвищення ефективності та надійності комунікацій у рої безпілотних літальних апаратів шляхом розробки та оцінювання методу вибору лідера, який враховує особливості топології та обмеження зв'язності у розподілених системах.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Рій дронів розглядається як часово-змінний граф

$$G_t = (V, E_t)$$

Формула 1 Модель рою дронів

Де $V = \{1, \dots, N\}$ - множина дронів, а $E_t \subseteq V \times V$ - множина каналів зв'язку у момент часу t . Зв'язок між вузлами існує, якщо їхня взаємна відстань не перевищує порогу радіуса R . Кожен дрон $i \in V$ характеризується зарядом батареї $E_i \in [0, 1]$, кількістю сусідів d_i та поточною позицією $x_i \in \mathbb{R}^3$. У моделі враховується, що радіосигнал поширюється миттєво, а затримки визначаються лише кількістю хопів у маршруті. Для маршрутур з $H(p)$ хопів вводимо час доставки:

$$T(p) = H(p) \cdot \beta$$

Формула 2 Час доставки

Де $\beta > 0$ - середня затримка одного хопу (передача, підтвердження). Час доставки повідомлення між вузлами i та j визначається як

$$T_{ij} = \beta \cdot \min_{p \in P_{i \rightarrow j}} H(p)$$

Формула 3 Час доставки повідомлення між вузлами

Де $P_{i \rightarrow j}$ - множина всіх маршрутів від i до j . Для кандидата у лідери i використовуються агреговані характеристики:

$$T_i^{max} = \max_{j \neq i} T_{ij}, T_i^{avg} = \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i} T_{ij}$$

Формула 4 Агреговані характеристики максимального та середнього часу доставки повідомлень для оцінки кандидатів у лідери

Базовий критерій. У класичному варіанті вибір лідера ґрунтується на енергетичних та топологічних параметрах. Нормалізуємо ступінь вузла:

$$d_i^{\sim} = \frac{d_i}{d_{max}}, d_{max} = \max_{k \in V} d_k$$

Формула 5 Нормалізований ступінь вузла

Функція корисності має вигляд:

$$U_i^{base} = \omega_1 E_i + \omega_2 d_i^{\sim}, \omega_1 + \omega_2 = 1, \omega_l \geq 0$$

Формула 6 Стандартна функція корисності для вибору лідера

Критерій із часовою складовою. У вдосконаленому варіанті до оцінки додається показник часу доставки повідомлень. Вводимо опорне значення

$$T^{ref} = \frac{1}{N} \sum_{i \in V} T_i^{avg}$$

Формула 7 Відносний показник часу доставки повідомлень

і визначаємо функцію корисності:

$$U_i^{ref} = \omega_1 E_i + \omega_2 d_i^{\sim} - \omega_3 \frac{T_i^{avg}}{T^{ref}}, \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1, \omega_l \geq 0$$

Формула 8 Запропонована вдосконалена функція корисності для вибору лідера

Правило вибору. У будь-якому варіанті лідером вважається

$$Leader = \arg \max_{i \in V} U_i$$

Формула 9 Метод вибору лідера

Де $U_i = U_i^{base}$ (алгоритм 1) або $U_i = U_i^{ref}$ (алгоритм 2). Перевибір ініціюється при втраті повідомлень «heartbeat» від поточного лідера протягом інтервалу Δt .

Експерименти. Для оцінки ефективності запропонованого методу було проведено серію симуляцій у середовищі ROS 2 (Humble) + Gazebo. Моделювався рій із 10 дронів, які рухалися уздовж заздалегідь заданих траєкторій, дальність зв'язку між дронами R була обрана як 12 та 7 з метою дослідження навантаження на передаточні вузли. У довільні моменти часу лідер виводився з ладу, після чого система мала обрати нового лідера за алгоритмами U^{base} або U^{ref} . Було перевірено значення різних ваг у оціночних функціях: U^{base} : $(\omega_1, \omega_2) \in \{(1,0), (0.5,0.5), (0,1)\}$ та U^{ref} : $(\omega_1, \omega_2, \omega_3) \in \{(1,0,0), (0,1,0), (0,0,1), (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})\}$ а також варіація U^{ref} : $(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = (\frac{(1-\omega_3)}{2}, \frac{(1-\omega_3)}{2}, \omega_3)$, $\omega_3 \in [0, 0.8]$. Результати досліджень для різних параметрів ω згруповані за середнім та максимальним значеннями та відображені у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння алгоритмів вибору лідера U^{base} та U^{ref}

Топологія Алгоритм	Сер. T^{avg}	Мін. T^{avg}	Сер. T^{max}	Мін. T^{max}	Сер. $load_{mean}$	Мін. $load_{mean}$	Сер. $load_{max}$	Мін. $load_{max}$	Заряд
Смуга, U^{base}	0.088	0.086	0.161	0.156	2.743	2.563	5.704	5.333	0.943
Смуга, U^{ref}	0.079	0.077	0.140	0.133	1.888	1.622	3.726	3.111	0.943
Куб U^{base} R=7,	0.082	0.073	0.139	0.128	2.743	2.098	5.667	3.444	0.948
Куб U^{ref} R=7,	0.075	0.073	0.130	0.128	2.247	2.098	3.957	3.444	0.948
Куб U^{base} R=12,	0.051	0.050	0.061	0.050	0.222	0.000	0.222	0.000	0.951
Куб U^{ref} R=12,	0.050	0.050	0.053	0.050	0.051	0.000	0.051	0.000	0.951
Клин, U^{base}	0.108	0.102	0.196	0.172	1.843	1.667	3.185	2.444	0.947
Клин, U^{ref}	0.104	0.102	0.178	0.172	1.707	1.667	2.615	2.444	0.947

Джерело: таблиця складена на основі даних отриманих авторами з експериментів у симуляції.

Експерименти проводились на трьох топологіях розташування дронів:

- Смуга — витягнута формація, що створює довгі багатохопові шляхи.
- Клин — асиметрична формація з «широкою» та «вузькою» частиною.
- Куб — компактна тривимірна формація з високою щільністю зв'язків.

Для порівняння результатів використовувались наступні метрики:

- Середній час доставки повідомлення від лідера: T^{avg}
- Максимальний час доставки: T^{max}
- Середнє та максимальне ретрансляційне навантаження вузлів: $load_{mean}$, $load_{max}$
- Заряд батареї лідера у момент обрання.

При використанні топології смуга, U^{ref} демонструє зменшення T^{avg} та T^{max} на 10% та 13-15% (рисунок 1), а також нижчі значення $load_{max}$ (на 34-42%) при схожому рівні заряду батареї. При топології клин покращення складає 4% та 10% для T^{avg} та T^{max} та 7% та 17% для середнього та максимального ретрансляційного навантаження. Топологія куб при великих дальностях зв'язку R наближається до повнозв'язної, тож комунікаційні метрики подібні для обох алгоритмів вибору лідера. При зменшенні R , U^{ref} зменшує середній час на 9% та 6.5% а ретрансляційне навантаження на 18% та 30% відповідно (рисунок 2).

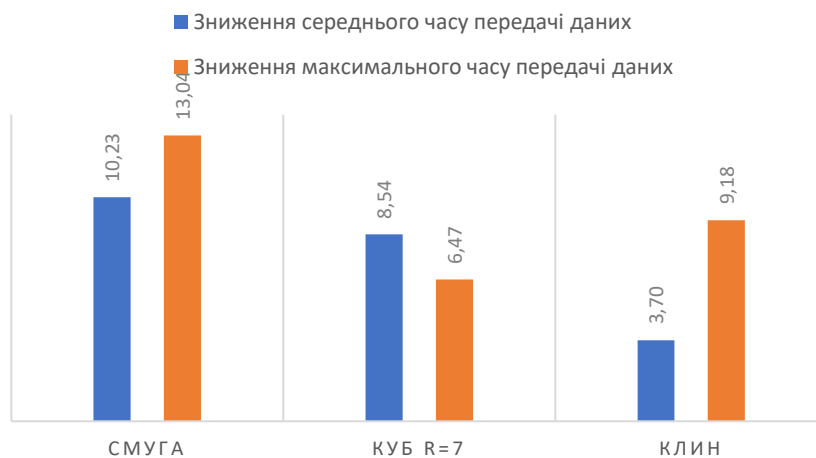


Рис. 1. Зниження часу передачі даних при використанні покращеного методу вибору лідера

Джерело: графік побудований на основі даних з таблиці 1

Результати моделювання показали, що застосування методу U^{ref} забезпечує покращення комунікаційних характеристик у більшості розглянутих топологій рою (рисунки 1 та 2). Найбільший ефект досягається для топології смуга та у випадку куба з обмеженим радіусом зв'язку, де спостерігається суттєве зменшення часу передачі та ретрансляційного навантаження при збереженні рівня енергоспоживання. У більш зв'язаних конфігураціях вииграш є менш значним, оскільки початковий рівень надійності комунікацій уже є високим.

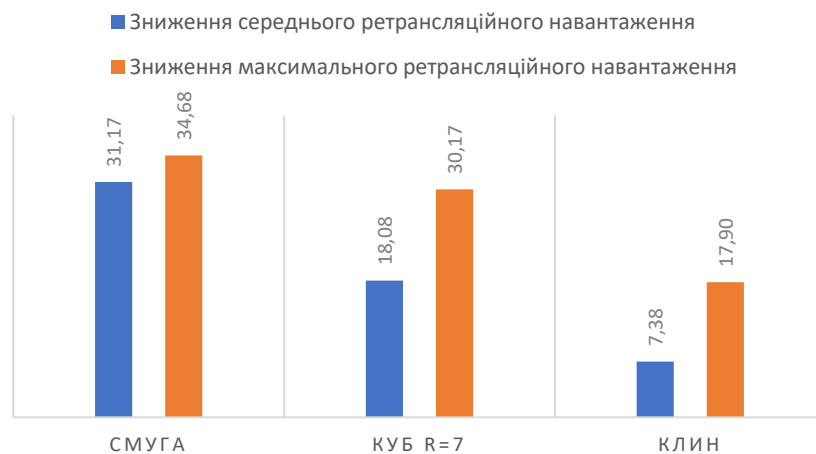


Рис. 2. Зниження ретрансляційного навантаження при використанні покращеного методу вибору лідера

Джерело: графік побудований на основі даних з таблиці 1

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Запропонований метод вибору лідера у розподілених системах дозволяє підвищити ефективність та надійність комунікації у рої безпілотників. Експериментальні результати підтвердили зменшення часу передачі та ретрансляційного навантаження без погіршення рівня енергоспоживання. Найбільший ефект досягається у топологіях зі значними обмеженнями зв'язності, що свідчить про придатність методу до застосування у складних умовах комунікації.

Отримані результати демонструють потенціал використання розробленого підходу для підвищення безпеки та ефективності розподілених систем у сценаріях групового польоту БПЛА. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на поєднання методу з алгоритмами виявлення атак та адаптації маршрутизації у динамічних середовищах.

Література

1. Rajesh, G., Mercilin, R. X., Padmanaban, S., & Eklas, H. Bio-Inspired Optimized Leader Election for Multiple Drones. *Sensors*, 20(11).
2. Lucchesi, L., Endler, M., & de Souza, B. J. O. (2024, May). Dynamic effects of communication delay, failure rates, and speed on UAV swarm formation. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)* (pp. 588-601). SBC.
3. Gallager, R. G., Humblet, P. A., & Spira, P. M. (1983). A distributed algorithm for minimum-weight spanning trees. *ACM Transactions on Programming Languages and systems (TOPLAS)*, 5(1), 66-77.
4. Chang, E., & Roberts, R. (1979). An improved algorithm for decentralized extrema-finding in circular configurations of processes. *Communications of the ACM*, 22(5), 281-283.
5. Garavel, H., & Mounier, L. (1996). *Specification and verification of various distributed leader election algorithm for unidirectional ring networks* (Doctoral dissertation, INRIA).
6. Awerbuch, B. (1987, January). Optimal distributed algorithms for minimum weight spanning tree, counting, leader election, and related problems. In *Proceedings of the nineteenth annual ACM symposium on Theory of computing* (pp. 230-240).
7. Karpov, V., & Karpova, I. (2015). Leader election algorithms for static swarms. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, 12, 54-64.
8. Walker, P., Amraii, S. A., Lewis, M., Chakraborty, N., & Sycara, K. (2014, October). Control of swarms with multiple leader agents. In *2014 IEEE international conference on systems, man, and cybernetics (SMC)* (pp. 3567-3572). IEEE.
9. Adoni, W. Y. H., Fareedh, J. S., Lorenz, S., Gloaguen, R., Madriz, Y., Singh, A., & Kühne, T. D. (2024). Intelligent Swarm: Concept, Design and Validation of Self-Organized UAVs Based on Leader-Followers Paradigm for Autonomous Mission Planning. *Drones*, 8(10), 575.
10. Dev, K., Madhwal, Y., Shevelo, S., Osinenko, P., & Yanovich, Y. (2025). SwarnRaft: Leveraging Consensus for Robust Drone Swarm Coordination in GNSS-Degraded Environments. *arXiv preprint arXiv:2508.00622*.
11. Lucchesi, L., Endler, M., & de Souza, B. J. O. (2024, May). Dynamic effects of communication delay, failure rates, and speed on UAV swarm formation. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)* (pp. 588-601). SBC.
12. Zeng, T., Mozaffari, M., Semiari, O., Saad, W., Bennis, M., & Debbah, M. (2018, October). Wireless communications and control for swarms of cellular-connected UAVs. In *2018 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers* (pp. 719-723). IEEE.

References

1. Rajesh, G., Mercilin, R. X., Padmanaban, S., & Eklas, H. Bio-Inspired Optimized Leader Election for Multiple Drones. *Sensors*, 20(11).
2. Lucchesi, L., Endler, M., & de Souza, B. J. O. (2024, May). Dynamic effects of communication delay, failure rates, and speed on UAV swarm formation. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)* (pp. 588-601). SBC.
3. Gallager, R. G., Humblet, P. A., & Spira, P. M. (1983). A distributed algorithm for minimum-weight spanning trees. *ACM Transactions on Programming Languages and systems (TOPLAS)*, 5(1), 66-77.
4. Chang, E., & Roberts, R. (1979). An improved algorithm for decentralized extrema-finding in circular configurations of processes. *Communications of the ACM*, 22(5), 281-283.
5. Garavel, H., & Mounier, L. (1996). *Specification and verification of various distributed leader election algorithm for unidirectional ring networks* (Doctoral dissertation, INRIA).
6. Awerbuch, B. (1987, January). Optimal distributed algorithms for minimum weight spanning tree, counting, leader election, and related problems. In *Proceedings of the nineteenth annual ACM symposium on Theory of computing* (pp. 230-240).
7. Karpov, V., & Karpova, I. (2015). Leader election algorithms for static swarms. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, 12, 54-64.
8. Walker, P., Amraii, S. A., Lewis, M., Chakraborty, N., & Sycara, K. (2014, October). Control of swarms with multiple leader agents. In *2014 IEEE international conference on systems, man, and cybernetics (SMC)* (pp. 3567-3572). IEEE.

-
9. Adoni, W. Y. H., Fareedh, J. S., Lorenz, S., Gloaguen, R., Madriz, Y., Singh, A., & Kühne, T. D. (2024). Intelligent Swarm: Concept, Design and Validation of Self-Organized UAVs Based on Leader-Followers Paradigm for Autonomous Mission Planning. *Drones*, 8(10), 575.
 10. Dev, K., Madhwal, Y., Shevelo, S., Osinenko, P., & Yanovich, Y. (2025). SwarnRaft: Leveraging Consensus for Robust Drone Swarm Coordination in GNSS-Degraded Environments. *arXiv preprint arXiv:2508.00622*.
 11. Lucchesi, L., Endler, M., & de Souza, B. J. O. (2024, May). Dynamic effects of communication delay, failure rates, and speed on UAV swarm formation. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)* (pp. 588-601). SBC.
 12. Zeng, T., Mozaffari, M., Semiar, O., Saad, W., Bennis, M., & Debbah, M. (2018, October). Wireless communications and control for swarms of cellular-connected UAVs. In *2018 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers* (pp. 719-723). IEEE.