

УДК 620.952: 629.113

МЕТОД ПЛАНУВАННЯ РОБІТ ПО ЗБОРУ ВРОЖАЮ БЕЗПЛОТНИМИ КОМБАЙНАМИ

С. А. Шворов, доктор технічних наук, професор

e-mail: sosdok@i.ua

Д. В. Чирченко, молодший науковий співробітник

e-mail: d.chirchenko@nubip.edu.ua

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація. У роботі на основі сучасних тенденцій розвитку «точного землеробства» запропоновано підхід та метод оптимального планування робіт для безпілотної збиральної техніки щодо збирання врожаю. Головна відмінність розробленого методу від існуючих полягає в тому, що для планування робіт розглядається як одиниця обліку не все поле в цілому, а кожна його окрема ділянка зі значенням програмованого врожаю. Процес планування змісту та часу виконання робіт поділяється на два основних етапи: уточнення об'ємів прогнозованих урожаїв на основі застосування безпілотних літальних апаратів та визначення плану застосування безпілотної збиральної техніки. На підставі зібраних і опрацьованих даних від БПЛА ця інформація постійно уточнюється для поетапного корегування плану збиральних робіт. Задача планування збиральних робіт вирішується методом динамічного програмування за критерієм максимізації об'ємів зібраного врожаю при часових та вартісних обмеженнях на збиральну кампанію.

Ключові слова: збирання врожаю, безпілотні літальні апарати, точне землеробство, планування робіт, часові та вартісні витрати, безпілотна збиральна техніка

Актуальність. Точне землеробство є одним із сучасних напрямків у розвитку ресурсозберігаючого землеробства. Стратегія використання технологій точного землеробства спрямована на максимальне повне залучення і використання різної інформації для вироблення агротехнологічних рішень, їх оптимізації стосовно господарських умов сільськогосподарського підприємства і диференційованого здійснення основних технологічних операцій (в межах поля) для досягнення максимальних кількісних і якісних показників. При цьому актуальним завданням є проведення досліджень щодо комплексного використання безпілотних літальних

апаратів (БПЛА) та безпілотної збиральної техніки (БЗТ) для підвищення ефективності збиральної кампанії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій [1-3] показує, що за кордоном та в Україні активно ведуться роботи по створенню «безпілотних» комбайнів для сільськогосподарського виробництва. Це викликане тим, що на процес збирання врожаю накладаються як часові, так і вартісні обмеження. Інколи агрофірми зазнають колосальних збитків через неможливість операторам комбайнів працювати 24-годинний робочий день, чого фізично не витримає людина. Виходячи з цього виникає необхідність у широкому застосуванні БЗТ та в оптимальному плануванні збиральних робіт (ЗР) безпілотними комбайнами, що забезпечить їх використання у нічний час та зменшення експлуатаційних витрат.

Мета дослідження – розробка методу планування робіт зі збору врожаю безпілотними комбайнами для підвищення ефективності застосування збиральної техніки.

Матеріали і методи дослідження. Процес планування змісту та часу виконання польових робіт поділяється на такі етапи: формування електронної карти місцевості та визначення обсягів врожаю на кожній ділянці на основі застосування методів статистичного аналізу та штучного інтелекту, а також визначення за допомогою методу динамічного програмування оптимального плану застосування збиральної техніки на полях.

Результати досліджень. При розробці методу оптимального планування ЗР для БЗТ передбачається, що процес планування ЗР є керованим N -етапним динамічним процесом, який на кожному (n -му) етапі характеризується двома видами параметрів: параметрами керування m_n (кількістю БЗТ або ЗР безпілотними комбайнами) і параметрами стану G_n, n_n (обсягами зібраного врожаю на n -му етапі). У вигляді обмежень виступає сумарний ресурс часу збиральних робіт (T) та вартісних витрат (C), що виділяються на збиральну кампанію.

Як показують результати експериментальних досліджень, при програмуванні врожаю можна ефективно використовувати звичайні цифрові фотокамери на БПЛА

[5, с. 148]. Після проведення фотозйомки на електронній карті поля на основі статистичної обробки RGB-сигналів визначається декілька контрастних зон (ділянок) за оптичними характеристиками. Для кожної із цих зон експериментально розраховуються контрольні обсяги врожаю, які використовуються для навчання нейронної мережі. Таким чином, на основі статистичної обробки спектральних характеристик цифрових знімків кожної ділянки місцевості та за допомогою апарату нейронних мереж визначаються обсяги врожаю на шляху руху безпілотних комбайнів, що забезпечує оперативне прийняття рішень для розподілу та планування збиральних робіт.

Кінцевою метою планування ЗР (W_N) є максимальний збір урожаю.

Загалом задача оптимального планування ЗР та їх виконання БЗТ може бути подана так.

Знайти

$$\max W_N = \sum_{n=1}^N G_n m_n \quad (1)$$

при
$$T_N \leq T; \quad C_N \leq C, \quad (2)$$

де T_N – використаний час на протязі N етапів збиральної кампанії; C_N – витрати на протязі N етапів ЗР.

Таким чином, необхідно знайти такі значення (m_n) на кожному етапі, щоб максимізувати цільову функцію (1) при таких обмеженнях:

$$\left. \begin{array}{l} \text{а) } m_n = 0, 1, 2, \dots, \\ \text{б) } \sum_{n=1}^N t_n m_n \leq T, \\ \text{в) } \sum_{n=1}^N c_n m_n \leq C, \end{array} \right\} \quad (3)$$

де t_n – час виконання робіт на n -ій ділянці поля; c_n – вартісні витрати застосування БЗТ при виконанні n -го етапу ЗР.

Для знаходження оптимальних значень (m_n) скористаємося методом динамічного програмування [6].

Оскільки в задачі є два види ресурсів (T та C), тому необхідно ввести два параметри становищ ξ_T та ξ_C .

Позначимо

$$\max_{m_1, \dots, m_k} \sum_{n=1}^k G_n(m_n)$$

при умові

$$\sum_{n=1}^k t_n m_n \leq \xi_T; \quad \sum_{n=1}^k c_n m_n \leq \xi_C; \quad m_n \geq 0, \quad n = 1, \dots, k.$$

через $A_k(\xi_T; \xi_C)$.

Після нескладних перетворень приходимо до такого основного рекурентного співвідношення динамічного програмування:

$$A_k(\xi_T, \xi_C) = \max_{0 \leq m_k \leq \delta_k} G_k(m_k) + A_{k-1}(\xi_T - t_k m_k; \xi_C - c_k m_k)$$

де

$$\delta_k = \min \left\{ \left[\begin{array}{c} \xi_T \\ t_k \end{array} \right]; \left[\begin{array}{c} \xi_C \\ c_k \end{array} \right] \right\}.$$

Одночасно з $A_k(\xi_T; \xi_C)$ знаходимо й оптимальне рішення $m_k^o(\xi_T; \xi_C)$. На N -му етапі визначаємо $A_N(T; C)$ та одночасно – $m_N^o(T; C)$.

Найбільш ваговою перешкодою у вирішенні цієї задачі є велика її розмірність. Тому з метою зниження розмірності від задачі (1-2) перейдемо до задачі з одним обмеженням

$$\max W_1 = \max_{m_n} \sum_{n=1}^N G_n(m_n) - \lambda \sum_{n=1}^N c_n m_n \quad (4)$$

при умові

$$\sum_{n=1}^N t_n m_n = T; \quad m_n \geq 0,$$

де λ – множник Лагранжа.

Використання методу Лагранжа дозволяє зменшити розмірність і тому задача (4) незрівнянно простіша початкової.

Апріорі величина λ невідома, і тому задачу (4) доводиться вирішувати при декількох довільних значеннях λ . Оптимальне рішення задачі (4) буде залежати від λ :

$$m_{n\text{opt}} = m_n^o \quad (n = 1, \dots, N).$$

Якщо знайдене рішення m_n^o відповідає обмеженню (3), то воно і є рішенням задачі (1-2). В іншому випадку значення λ треба корегувати. Зокрема, якщо з'ясується, що $\sum_{n=1}^N c_n m_n^o > C$, то необхідно збільшувати λ .

Для швидкого визначення λ може бути застосований метод послідовних наближень. Якщо для значень λ_1, λ_2 знайдені оптимальні рішення $m_1^o(\lambda_1), m_2^o(\lambda_2)$, то на наступному кроці отримуємо λ_3 з формули

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{h_2 - h_1} (C - h_1) + \lambda_1,$$

де

$$h_2 = \sum_{n=1}^N c_n m_n^o(\lambda_2); \quad h_1 = \sum_{n=1}^N c_n m_n^o(\lambda_1).$$

Оскільки у задачі (4) розглядається один вид ресурсу (C), тому необхідно ввести один параметр стану ξ_C .

Позначимо

$$\max_{m_1, \dots, m_k} \sum_{n=1}^k G_n m_n$$

при умові

$$\sum_{n=1}^k t_n m_n \leq \xi_C; \quad m_n \geq 0, n = 1, \dots, k.$$

через $A_k(\xi_C)$.

Тоді основне рекурентне співвідношення динамічного програмування має такий вигляд:

$$A_k \leq C = \max_{m_k} G_k m_k - \lambda c_k m_k + A_{k-1} \leq C - c_k m_k$$

Необхідно відзначити, що метод динамічного програмування є направленим послідовним перебором варіантів, що обов'язково приводить до глобального максимуму й оптимального вирішення задачі (1).

У процесі планування ЗР за допомогою вищезазначеного методу для кожного етапу функціонування визначаються оптимальні значення (m_n^o), тобто знаходиться оптимальна кількість БЗТ для досягнення кінцевої мети W_N .

Вирішення цієї задачі здійснюється за допомогою спеціального автоматизованого робочого місця планування (АРМ-П) під контролем оператора. Завдяки розробленому математичному апарату та програмному забезпеченню АРМ-П здійснюється визначення оптимальної кількості БЗТ, тобто формування за допомогою запропонованого методу у визначеній часовій послідовності оптимального плану функціонування кожного комбайна для виконання ЗР.

У процесі функціонування СППР, доки мета не досягнута, здійснюється наступна послідовність дій:

відповідно до оптимального плану здійснюється планування для поетапного відпрацювання такого набору ЗР, при якому забезпечується досягнення максимального значення ($A_n \leq C$);

на основі порівняння поточного значення якості виконання типових завдань з необхідним ($A_n \leq C$) приймається рішення про подальший хід збиральної кампанії. Якщо поточне значення якості не нижче необхідного – виконання ЗР продовжується відповідно до оптимального плану. В інших випадках, залежно від досягнутого значення якості на n -му етапі виникає необхідність в адаптивній зміні (повторній оптимізації) плану виконання ЗР. Із цією метою за допомогою вищезазначеного методу для кожного етапу (починаючи з n -го) збиральних робіт забезпечується корегування та формування оптимального плану з урахуванням поточного значення якості (об'єму зібраного врожаю), обмежень по вартості та відведеного залишку часу.

Висновки і перспективи

Таким чином, за допомогою запропонованого методу планування робіт зі збору врожаю безпілотними комбайнами забезпечується підвищення ефективності збиральної кампанії, залежно від об'ємів урожаю, визначених за допомогою БПЛА, що передбачає більш високу оперативність та точність керування БЗТ, а також зменшення витрат пального.

Список літератури

1. Нагайцев М.В. «Беспилотные» автомобили – этапы разработки и испытаний / М. В. Нагайцев, А. М. Сайкин, Д. В. Ендачѳв // Журнал автомобильных инженеров 2012. – №5 (76) – С. 32-39.

2. Перший безпілотний [Електронний ресурс]. – Режим доступу: КрАЗ – перший «розумний» український автомобіль. Режим доступу: <https://ria.ru/world/20161006/1478677087.html>, <http://www.autokraz.com.ua/index.php/uk/novini-ta-media/news/item/2839-pershyi-bezpilotnyi-kraz-pershyi-rozumnyi-ukrainskyi-avtomobil>

3. Система автоматического вождения Trimble Autopilot [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.poletehnika.com.ua/ru/item/43-sistema_avtomaticheskogo_vozhdeniya_trimble_autopilot

4. Ачасов А. Б. Щодо використання БПЛА для оцінки стану посівів / А. Б. Ачасов, А. О. Ачасова, Г. В. Титенко, Г. В. Селиверстов, А. О. Седов // Вісник ХНУ імені В.Н. Каразіна. Серія «Екологія». – 2015. – Випуск 13. – С. 13-18.

5. Лисенко В.П. Використання БПЛА для дистанційного зондування посівів під час програмування врожаю / В. П. Лисенко, О. О. Опришко, Д. С. Комарчук, Н. А. Пасічник // Науковий вісник НУБіП України. – 2016. – Випуск 256. – С. 146-150.

6. Ленков С.В. Методологічні основи побудови та організації функціонування роботизованих систем спеціального призначення / С. В. Ленков, С. А. Шворов, Ю. В. Гунченко, Д. В. Чирченко // Вісник інженерної академії України. – 2012. – № 1. – С. 205-210.

References

1. Nagaitsev, M.V., Saikin, A.M., Endachyov, D.V. (2012). «Bespilotnyye» avtomobili – etapy razrabotki i ispytaniy [Unmanned vehicles are stages of development and testing]. Journal of Automotive Engineers, 5 (76), 32-39.

2. Pershyi bezpilotnyi [The first unmanned KrAZ - the first "smart" Ukrainian car]. Available at: <http://www.autokraz.com.ua/index.php/uk/novini-ta-media/news/item/2839-pershyi-bezpilotnyi-kraz-pershyi-rozumnyi-ukrainskyi-avtomobil>

3. Sistema avtomaticheskogo vozheniya [Automatic driving system Trimble Autopilot]. Available at : [http://www.poletehnika.com.ua/ru/item/43-sistema_avtomaticheskogo_vozheniya_trimble_autopilot](http://www.poletehnika.com.ua/ru/item/43-sistema_avtomaticheskogo_vozhdeniya_trimble_autopilot)

4. Achasov, A.B., Achasova, A.O., Titenko, G.V., Seliverstov, O., Sedov, A.A. (2015). Shhodo vykorystannya BPLA dlya ocinky stanu posiviv [To use the UAV to assess the status of crops]. Journal of Kharkov National University. Series "Ecology", 13, 13-18.

5. Lysenko, V., Opryshko, A., Komarchuk, D., Pasichnyk N. (2016). Vy`kory`stannya BPLA dlya dy`stancijnogo zonduvannya posiviv pid chas programuvannya vrozhayu [The use of UAVs for remote sensing of crops during harvest programming]. Scientific Journal NUBiP Ukraine, 256, 146-150.

6. Lyenkov, S., Shvorov, S., Hunchenko, Y., Chyrchenko, D. (2012). Metodologichni osnovy` pobudovy` ta organizaciyi funkcionuvannya roboty`zovany`x sy`stem special`nogo pryznachennya [Methodological bases of construction and operation of robotic systems for special purposes]. Journal of Engineering Academy of Ukraine, 1, 205-210.

МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТ ПО СБОРУ УРОЖАЯ БЕСПИЛОТНЫМИ КОМБАЙНАМИ

С. А. Шворов, Д. В. Чирченко

Аннотация. *В работе на основе современных тенденций развития «точного земледелия» предложен подход и метод оптимального планирования работ для беспилотной уборочной техники по сбору урожая. Главное отличие разработанного метода от существующих состоит в том, что для планирования работ рассматривается как единица учета не все поле в целом, а каждый его отдельный участок со значением программируемого урожая. Процесс планирования содержания и времени выполнения работ делится на несколько этапов, а именно: уточнение объемов прогнозируемого урожая на основе применения беспилотных летательных аппаратов и определение плана применения беспилотной уборочной техники. На основании собранных и обработанных данных от БПЛА, эта информация постоянно уточняется для поэтапной корректировки плана уборочных работ. Задача планирования уборочных работ решается методом динамического программирования по критерию максимизации объемов собранного урожая при временных и стоимостных ограничениях на уборочную кампанию.*

Ключевые слова: *сбор урожая, беспилотные летательные аппараты, точное земледелие, планирование работ, временные и стоимостные затраты, беспилотная уборочная техника*

METHOD FOR PLANNING THE HARVEST UNMANNED COMBINES ROUTES

S. Shvorov, D. Chyrchenko

Abstract. *Based on the current trends in the development of "Precision farming", in this paper proposed approach and method for optimal planning of unmanned harvesting machinery for harvesting. The main difference between the existing developed method is that planning work is considered as unit of account of each individual piece of ground with the value programmed harvest, not the all field at once. The process of work tasks and time planning is divided into two main stages: clarify the volumes of forecast crops*

through the use of unmanned aerial vehicles and determination plan for use of unmanned harvesting machinery. Based on the collected and processed data from UAVs this information is continuously clarified for gradual adjustment plan of harvesting. The task of scheduling harvesting solved by dynamic programming criterion maximizing amounts of harvested in the time and cost constraints on harvesting process.

Key words: *harvesting, unmanned aerial vehicles, precision agriculture, work planning, time and cost expenditures, unmanned harvesting equipment*