

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.391

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/02>

Сушин І.О.

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

Лисенко О.І.

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

УНІВЕРСАЛЬНА МЕТОДИКА ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СЕНСОРІВ СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ

Сенсорні вузли є невід'ємними компонентами безпроводових сенсорних мереж, які оснащуються змінними або постійними антенами. Використання ефективних антен та їх вдосконалення є актуальним питанням у галузі. Тому у статті було проаналізовано та порівняно сучасні антени для мобільних пристроїв спрямованої та всеспрямованої дії за допомогою яких можливо організувати зв'язність вузлів мобільних безпроводових сенсорних мереж з телекомунікаційними аероплатформ (ТА) на базі БПЛА гелікоптерного та літакового типів. Правильний вибір антен для вузлів МБСМ є важливим фактором для досягнення необхідних параметрів мережі: часу функціонування, мінімальної кількості необхідних БПЛА, пропускної здатності тощо. В більшості мобільних пристроїв (а також сенсорних вузлах) використовуються антени всеспрямованої дії, що не завжди є рішенням, яке задовольняє усі вимоги, тому існує необхідність в ефективному використанні енергетичного ресурсу вузлів із застосуванням антен спрямованої дії. Це створює наукову задачу, яка полягає у розробці методики передачі даних із використанням сенсорів спрямованої дії з урахуванням можливості застосування у багаторівневих наземно-повітряних мережах (НПМ). Виконано теоретичний розрахунок довжини лінії зв'язку ТА-вузол. Отримані результати підтверджуються при моделюванні у програмному комплексі Atoll. За допомогою викладених двох підходів було порівняно пропускну здатність лінії зв'язку при різних вхідних параметрах мережі та відстані лінії зв'язку із застосуванням антен всеспрямованої, спрямованої та вузькоспрямованої дії. На основі отриманих залежностей створений алгоритм реалізації методу передачі даних із використанням сенсорів спрямованої дії. Це дасть можливість його застосування при створенні передових НПМ великої дальності зі збільшеною пропускну здатністю.

Ключові слова: МБСМ, телекомунікаційна аероплатформа, сенсорні вузли, спрямовані антени, БПЛА.

Постановка проблеми. Зростаюча популярність мобільних безпроводових мереж на тлі великої кількості природних лих, війн тощо, ставить нові виклики до розвитку наземно-повітряних мереж у цивільних та військових сферах, а саме до організації та покращення зв'язності між мережевими елементами (вузлами та БПЛА).

Зазвичай сенсорний вузол МБСМ складається із всеспрямованої антени вбудованого чи зовнішнього типу [1,2], але не завжди це дозволяє досягнути необхідної відстані лінії зв'язку, пропускної здатності тощо. Також не менш важливим є завдання ефективного використання наявного обмеженого енергетичного ресурсу мобільних

пристроїв. Тому варто розглянути сценарій використання спрямованих антен [3-6], що дозволить покращити вказані вище параметри. Питання оптимального вибору антенних систем стає все актуальнішим, особливо при застосуванні у НПМ.

Вдосконалення НПМ полягає у збільшенні часу функціонування, зменшенні мінімально необхідної кількості мережевих елементів (БПЛА, вузлів), досягненні необхідної пропускної здатності тощо. А отже, необхідним стає порівняння параметрів лінії зв'язку (відстані, пропускної здатності) при використанні спрямованих та всеспрямованих антен вузлів та створення універсальної методики передачі даних із використанням сен-

сорів спрямованої дії. Це дозволить покращити основні параметри при постановці мінімально необхідних вимог до мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

На даний час сенсори (вузли) всеспрямованої дії у МБСМ є класичним варіантом пристроїв, які можуть приймати або передавати сигнал в усіх напрямках навколо них. Вони охоплюють (покривають) повне коло навколо своєї точки кріплення (згідно діаграми спрямованості антени, що використовується пристроєм), що робить їх придатними для застосувань, коли події або зміни в середовищі можуть відбуватися з будь-якого напрямку, тобто область покриття має дозволити їм передавати дані на центральний вузол або інші датчики поблизу. Коефіцієнт підсилення даних антен складає від 1.94 до 5 dB. Споживання електроенергії є критичним фактором для сенсорних вузлів, особливо у МБСМ, що працюють від одноразових або багаторазових джерел живлення. Також всеспрямовані датчики можуть зіткнутися з проблемами, такими як перешкоди від інших пристроїв, обмежену дію на великих відстанях і потребу в ефективних алгоритмах обробки даних для отримання інформації, які передає вузол [7-9].

Для усунення зазначених недоліків всеспрямованих антен доцільно використовувати спрямовані антени. Вони відіграють вирішальну роль у МБСМ із використанням БПЛА, фокусуючи своє випромінювання в певному напрямку (підсилення для антен може коливатися від 6 до 40 дБ), що призводить до збільшення області покриття в цільовому напрямку. Це особливо корисно для зв'язку на великі відстані, так як забезпечується більший коефіцієнт підсилення порівняно з всеспрямованими антенами, що призводить до покращення рівня сигналу на приймаючій стороні.

Постановка завдання. Відсутність ефективного використання енергетичного ресурсу вузлів МБСМ при використанні БПЛА є одним з основних напрямків вдосконалення НПМ військового та цивільного призначення.

Основна кількість вузлів всеспрямованої дії показує необхідність впровадження та розвитку спрямованих антен для збільшення довжини каналу зв'язку ТА-вузол або його пропускної здатності.

Виходячи з існуючого напрямку досліджень можна сказати, що існує потреба у розробці ефективної універсальної методики передачі інформації із використанням сенсорів спрямованої дії, яку можна використовувати для різних протоколів передачі даних.

Виклад основного матеріалу. Сучасні МБСМ використовують велике розмаїття протоколів передачі даних (NB-IOT, Bluetooth LoRaWAN, IEEE 802.11, 802.16 тощо). Після їх аналізу та порівняння було обрано IEEE 802.11ax, так як він має найбільшу максимальну смугу пропускання (з можливістю її зміни під необхідні задачі) при відносно невеликому споживанні енергії, що дозволяє досягти необхідної пропускної здатності для виконання поставлених задач. Також в даному стандарті передбачений механізм економії енергії, який дозволяє переводити вузли у режим очікування (без витрат енергії), коли вузол не виконує передачу даних або знаходиться не в зоні покриття БПЛА. В залежності від того який режим роботи буде обраний, встановлюються такі параметри як смуга пропускання, чутливість приймача; буде змінюватися швидкість та пікове споживання енергії [10,11].

Виходячи із характеристик режимів роботи IEEE 802.11ax отримуємо залежності (рис. 1) на яких видно, що максимальна швидкість зростає пропорційно збільшенню мінімально необхідної чутливості приймача.

Виходячи із наявних вихідних даних можливо також встановити залежність довжини лінії зв'язку від чутливості приймача. Для цього необхідно скористатися формулою 1 розрахунку мінімальної чутливості приймача [12]:

$$P_{прм} = P_{прд} - L_{АФТ_1} + G_{прм} - L_{мед} - L_{зан} + G_{прд} - L_{АФТ_2}, \quad (1)$$

де $G_{прм}$ та $G_{прд}$ – коефіцієнти підсилення приймальної та передавальної антен у dB. $L_{мед}$ – медіанні втрати потужності ЕМХ викликані втратами у вільному просторі, в гідрометеорах та за рахунок дифракції у dB:

$$L_{мед} = L_{віл} + L_{атм} + L_{дифр} \quad (2)$$

В даному випадку $L_{дифр[dB]} = 0$, а втрати у вільному просторі (ITU-R P.525):

$$L_{віл} = 20 \lg \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) = 32,5 + 20 \lg(f) + 20 \lg(r) \quad (3)$$

Отримане рівняння розрахунку довжини траси:

$$20 \lg(r) + (\gamma_{свх.ловітря} + \gamma_{H_2O})r = -32,5 - 20 \lg(f) - P_{прм} + P_{прд} - L_{АФТ_1} - L_{АФТ_2} - L_{зан} + G_{прм} + G_{прд} \quad (4)$$

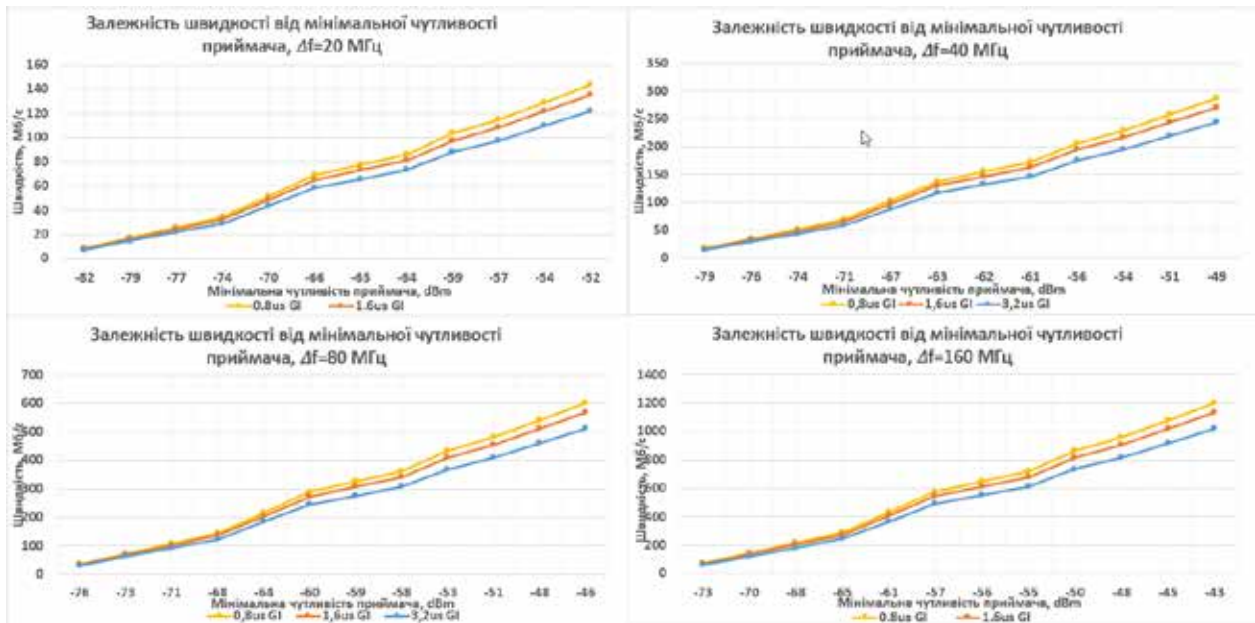


Рис. 1. Залежність швидкості від мінімальної чутливості приймача при смузі пропускання 20, 40, 80, 160 МГц

Проведемо розрахунки довжини каналу зв'язку від мінімальної чутливості приймача при використанні спрямованої антени для двох робочих частот 5200 МГц та 2447 МГц, тому втрати в гідрометеорах будуть мати наступні значення:

В сухому повітрі:

$$\gamma_{\text{сух.повітря}} = 7,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{dB}}{\text{km}} \text{ для } 5200 \text{ МГц}$$

$$\gamma_{\text{сух.повітря}} = 7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{dB}}{\text{km}} \text{ для } 2447 \text{ МГц}$$

В парах води:

$$\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 1,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{dB}}{\text{km}} \text{ для } 5200 \text{ МГц}$$

$$\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 0 \frac{\text{dB}}{\text{km}} \text{ для } 2447 \text{ МГц}$$

Потужність передавача у систем стандарту 802.11ах $P_{\text{прд}} = 15 - 30 \text{ dBm}$ (для розрахунку обрані значення 15, 25, 30 dBm). Робоча частота знаходиться у двох діапазонах 2400 МГц – 24835 МГц та 5150 МГц – 7125 МГц (для розрахунку візьмемо значення $f = 5200 \text{ МГц}$ та $f = 2447 \text{ МГц}$). Так як антена з'єднується безпосередньо до плати у БПЛА та вузлах, то втрати в АФТ будуть мінімальні. Прийемо їх $L_{\text{АФТ}_1} = L_{\text{АФТ}_2} = 0,1 \text{ dB}$.

Розрахунок довжини лінії зв'язку був виконаний двома способами: теоретичний та за допомогою програмного комплексу Atoll із потужностями $P_{\text{прд}} = 15, 25, 30 \text{ dBm}$ для двох блоків порівнянь:

1. Із використанням спрямованої антени ($G = 17 \text{ dB}$) для БПЛА із спрямованою ($G = 17 \text{ dB}$) та всеспрямованою ($G = 5 \text{ dB}$) антенами вузла відповідно (рис. 2–4).

2. Із використанням всеспрямованої антени БПЛА ($G = 6 \text{ dB}$) та вузькоспрямованої антени ($G = 40 \text{ dB}$) вузла (рис. 5).

Як бачимо залежності при різних вхідних значеннях коефіцієнтів підсилення, потужностей передавача та робочих частотах мають однакову експоненційну залежність та спадний характер. Тобто при збільшенні мінімально необхідної чутливості приймача зменшується максимальна відстань каналу зв'язку. Також значення теоретичного розрахунку підтверджуються розрахунком за допомогою Atoll. З отриманих результатів першого блоку порівнянь можна зробити висновок, що з використанням сенсорів спрямованої дії (у порівнянні с сенсорами всеспрямованої дії) при однакових інших умовах можна досягти збільшення висоти розташування (або відстані до вузла) телекомунікаційних аероплатформ.

Слід звернути увагу на те, що максимальна довжина лінії зв'язку обмежується пропускну здатністю каналу зв'язку. Тому другий блок порівнянь показує, що при використанні вузькоспрямованої антени ($G = 40 \text{ dB}$) можливо збільшити пропускну здатність (або зменшити витрати енергії при зменшенні потужності передавача з та пропускну здатності) при умові розташування БПЛА 1-го рівня на висоті від пів кілометра до одиниць кілометрів. Виходячи із отриманих сімейств гра-

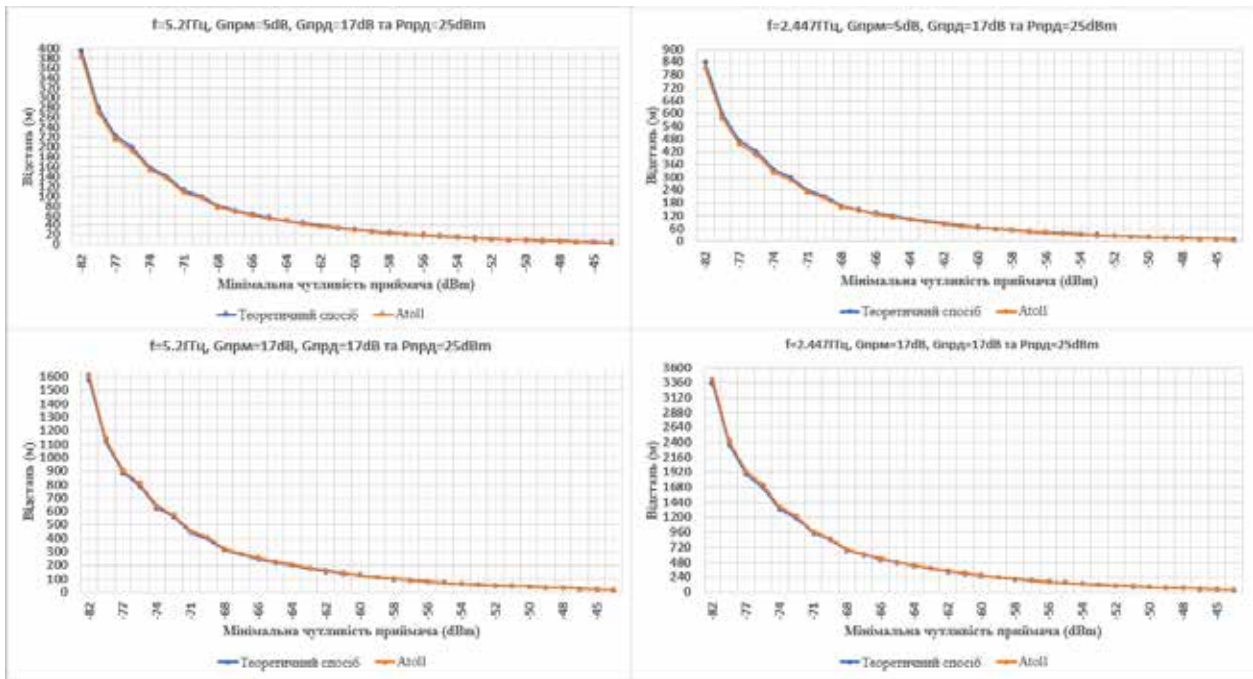


Рис. 2. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при потужності передавача $P_{\text{прд}} = 25 \text{ dBm}$

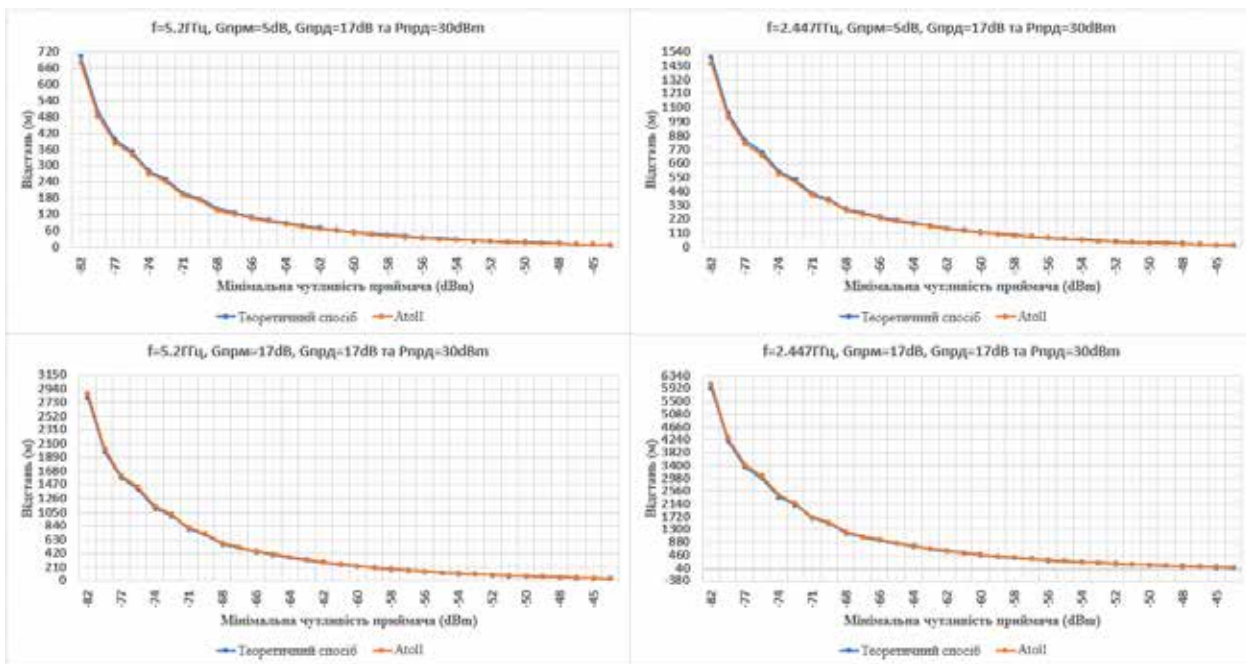


Рис. 3. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при потужності передавача $P_{\text{прд}} = 30 \text{ dBm}$

фіків залежності швидкості від мінімальної чутливості передавача (рис. 1) та залежності відстані від мінімальної чутливості передавача (рис. 2–5) можна зробити висновок, що максимальна швидкість передачі даних зменшується зі збільшенням довжини каналу зв'язку. Одна із отриманих залежностей наведена як приклад у табл. 1.

Отримавши результати розрахунків та моделювання при використанні спрямованих антен та виграш (в порівнянні із всеспрямованими антенами) у відстані та пропускній здатності при заданій потужності передавача перейдемо до алгоритму, що реалізує метод передачі даних із використанням сенсорів спрямованої дії.

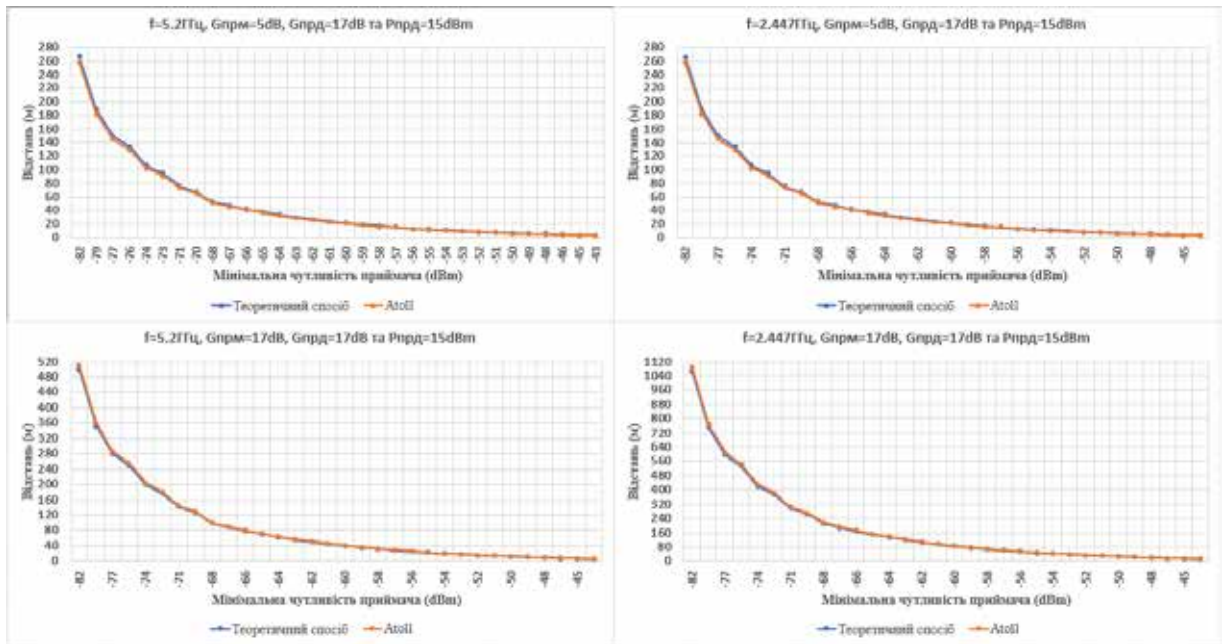


Рис. 4. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при потужності передавача $P_{прд} = 15 \text{ dBm}$

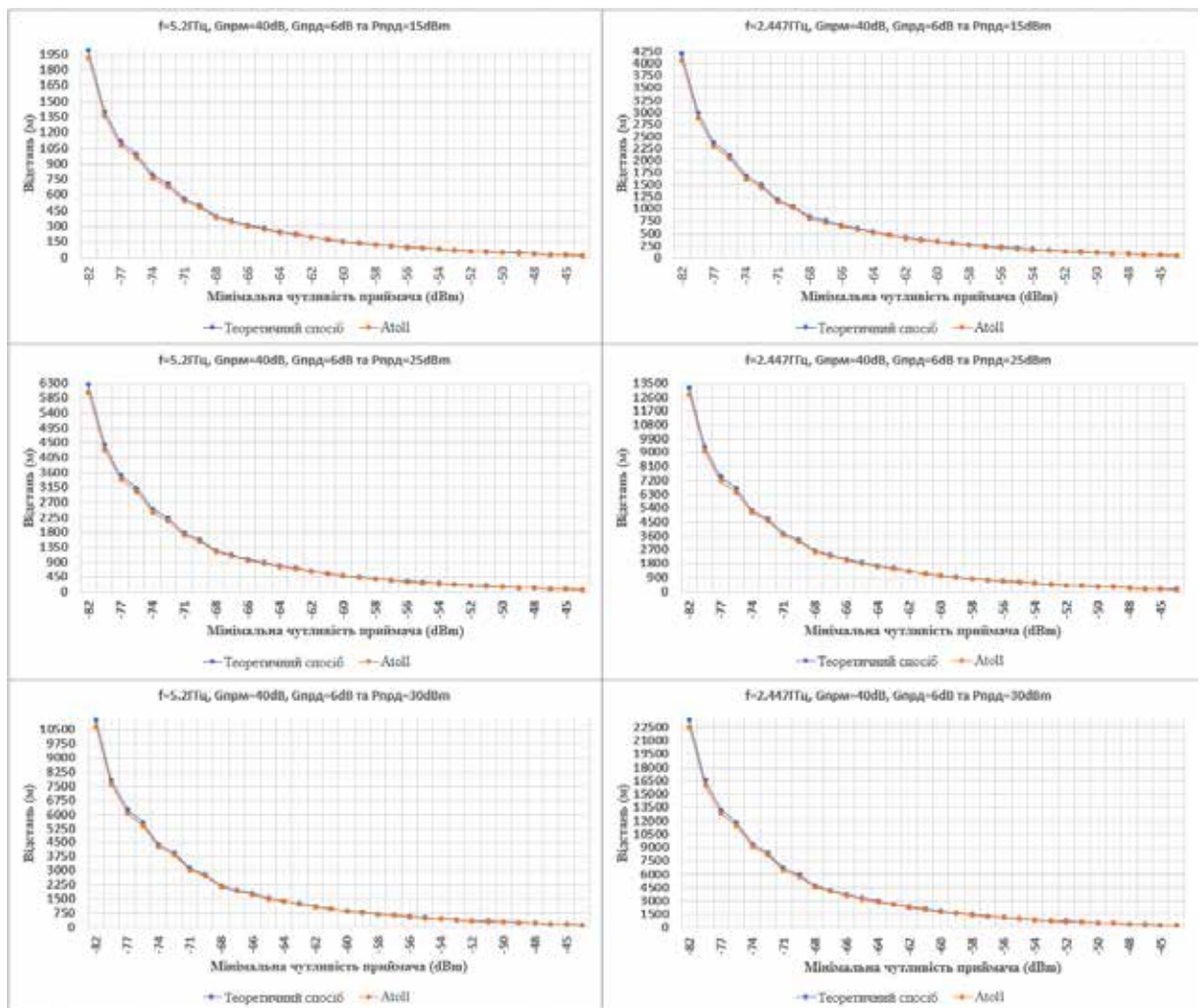


Рис. 5. Залежність мінімальної чутливості приймача від відстані при потужності передавача $P_{прд} = 15, 25, 30 \text{ dBm}$ з використанням всепрямованої антени $G = 6 \text{ dB}$ та вузькоспрямованої антени $G = 40 \text{ dB}$

Схема даного алгоритму зображена на рис. 6, а основні етапи наступні:

1. Задання параметрів лінії зв'язку, а саме: коефіцієнтів підсилення антен $G_{прм}$ та $G_{прд}$, потужності передавача $P_{прд}$, енергетичного запасу лінії $L_{зан}$, відстань $r = [r_{min}, r_{max}]$, гранична швидкість передачі даних $s_{зад}$.

2. Знаходження доступного діапазону частот та смуг пропускання.

3. Перевірка пріоритету цільової функції $s \rightarrow max$. Якщо так, то перейти до пункту 3.1. В інакшому випадку перехід до пункту 4.

3.1. Реалізація правил максимізації пропускної здатності із перевіркою $s_{зад} \geq s_{max}$ (пункт 3.2):

а) збільшення смуги пропускання;

б) зменшення робочої частоти до діапазону 2.4 ГГц;

в) збільшення потужності передавача.

Таблиця 1

Залежність пропускної здатності від довжини каналу зв'язку при використанні спрямованої ($G = 17$ dB) та всеспрямованої ($G = 5$ dB) антен вузлів на частоті 5200 МГц із енергетичним запасом 30 dB з використанням спрямованої антени ($G = 17$ dB) та потужністю передача 25 dBm (теоретичний розрахунок та за допомогою Atoll)

MCS	DCM	Ширина каналу 20 МГц					Ширина каналу 40 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	4.3	4	3.6	397/384	1579/1614	8.6	8.1	7.3	281/271	1118/1143
	0	8.6	8.1	7.3			17.2	16.3	14.6		
1	1	8.6	8.1	7.3	281/271	1118/1143	17.2	16.3	14.6	199/192	792/810
	0	17.2	16.3	14.6			34.4	32.5	29.3		
2	-	25.8	24.2	21.9	223/216	888/908	51.6	48.8	43.9	158/153	629/643
3	1	17.2	16.3	14.6	158/153	629/643	34.4	32.5	29.3	112/108	445/456
	0	34.4	32.5	29.3			68.8	65	58.5		
4	1	25.8	24.2	21.9	100/96	397/407	51.6	48.8	43.9	71/68	281/288
	0	51.6	48.8	43.9			103.2	97.5	87.8		
5	-	68.8	65	58.5	63/61	250/256	137.6	130	117	45/43	177/181
6	-	77.4	73.1	65.8	56/54	223/228	154.9	146.3	131.6	40/38	158/162
7	-	86	81.3	73.1	50/49	199/204	172.1	162.5	146.3	35/34	141/144
8	-	103.2	97.5	87.8	28/27	111/115	206.5	195	175.5	20/19	80/81
9	-	114.7	108.3	97.5	22	90/91	229.4	216.7	195	16/15	63/64
10	-	129	121.9	109.7	16/15	63/64	258.1	243.8	219.4	11	45
11	-	143.4	135.4	121.9	13/12	50/51	286.8	270.8	243.8	8.8/9	35/36
MCS	DCM	Ширина каналу 80 МГц					Ширина каналу 160 МГц				
		Швидкість, Мб/с			Відстань, м		Швидкість, Мб/с			Відстань, м	
		0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB	0.8us GI	1.6us GI	3.2us GI	G = 5 dB	G = 17 dB
0	1	18	17	15.3	199/192	792/810	36	34	30.6	140/136	561/573
	0	36	34	30.6			72.1	68.1	61.3		
1	1	36	34	30.6	140/136	561/573	72.1	68.1	61.3	100/96	397/407
	0	72.1	68.1	61.3			144.1	136.1	122.5		
2	-	108.1	102.1	91.9	112/108	445/456	216.2	204.2	183.8	80/77	315/323
3	1	72.1	68.1	61.3	80/77	315/323	144.1	136.1	122.5	56/54	223/228
	0	144.1	136.1	122.5			288.2	272.2	245		
4	1	108.1	102.1	91.9	50/49	199/204	216.2	204.2	183.8	35/34	141/144
	0	216.2	204.2	183.8			432.4	408.3	367.5		
5	-	288.2	272.2	245	32/30	126/129	576.5	544.4	490	22	90/91
6	-	324.3	306.3	275.6	28/27	111/115	648.5	612.5	551.3	20/19	80/81
7	-	360.3	340.3	306.3	25/24	100/102	720.6	680.6	612.5	18/17	70/72
8	-	432.4	408.3	367.5	14/13	56/58	864.7	816.7	735	10	40
9	-	480.4	453.7	408.3	11	45	960.7	907.4	816.6	7.9/8	32
10	-	540.4	510.4	459.4	7.9/8	32	1080.9	1020.8	918.8	5.6/5	22/23
11	-	600.4	567.1	510.4	6.3/6	25	1201	1134.2	1020.8	4.5/4	18

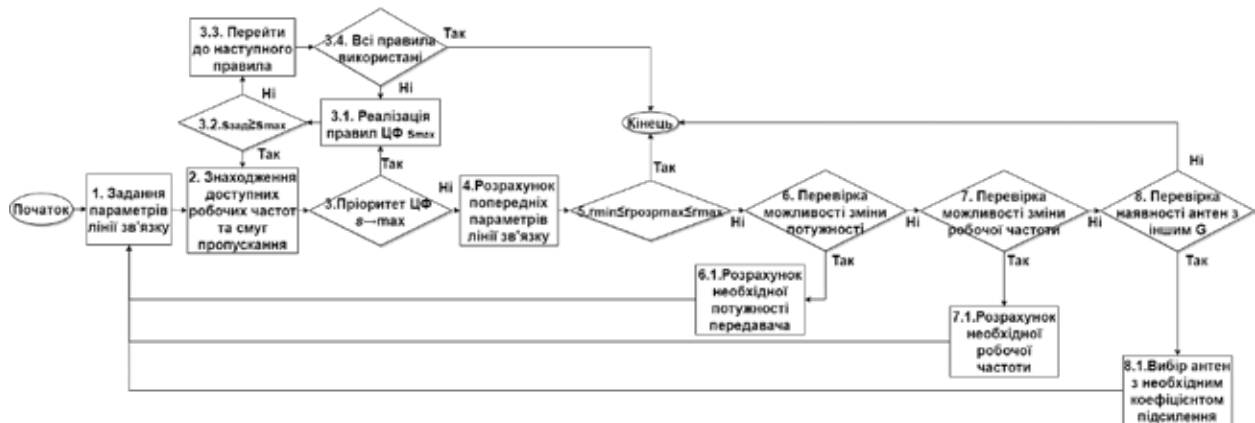


Рис. 6. Алгоритм передачі даних з використанням сенсорів спрямованої дії

3.2. Якщо умова $s_{зад} \geq s_{max}$ досягнута, то повернутися до пункту 2. В іншому випадку перейти до пункту 4.3.

3.3. Реалізувати наступне правило і виконати перевірку на доступність інших правил (пункт 3.4).

3.4. Якщо правил більше не лишилося, то завершити алгоритм із вказанням неможливості досягнення заданої пропускної здатності.

4. Розрахунок максимальної довжини лінії зв'язку $r_{розрmax}$ при заданій пропускній здатності $s_{зад}$ із вказанням робочої частоти, смуги пропускання.

5. Перевірка $r_{min} \leq r_{розрmax} \leq r_{max}$. Якщо умова досягнута, то завершити алгоритм із вказанням параметрів каналу зв'язку. В іншому випадку перейти до пункту 6.

6. Перевірка можливості зміни потужності $P_{прд}$. Якщо так, то перейти до пункту 6.1, інакше – до пункту 7.

6.1. Розрахунок необхідної потужності для досягнення умови в пункті 5 (при заданих обмеженнях).

7. Перевірка можливості зміни робочої частоти. Якщо так, то перейти до пункту 7.1, інакше – до пункту 8.

7.1. Розрахунок необхідної частоти для досягнення умови в пункті 5 (при заданих обмеженнях).

8. Перевірка наявності антен з іншим коефіцієнтом підсилення G . Якщо так, то перейти до пункту 7.1, інакше завершити алгоритм із вказанням неможливості досягнення діапазону довжини лінії зв'язку.

8.1. Вибір антен з необхідним коефіцієнтом підсилення для досягнення умови в пункті 5.

Корегування параметрів лінії зв'язку є багатокритеріальною задачею і у вихідних даних може

бути надано пріоритет визначеним параметрам і певні допустимі поступки (відхилення) для інших. У випадку вищого пріоритету функції максимальної пропускної здатності у пункті 3 алгоритм обирає із допустимих варіантів найкращий із допустимим відхиленням у потужності передавача $P_{прд}$, відстані r , смуги пропускання та робочій частоті. При необхідності досягнення необхідної довжини лінії зв'язку (пункт 5) із заданою пропускною здатністю $s_{зад}$ допустимі поступки у потужності передавача, робочій частоті та коефіцієнтах підсилення антен.

Висновки. В статті викладено два підходи до розрахунку параметрів лінії зв'язку (зокрема максимальної довжини лінії зв'язку) ТА-вузол: теоретичний спосіб та за допомогою моделювання у програмному комплексі Atoll.

Виконані розрахунки та моделювання для трьох можливих значень потужностей 15, 25 та 30 dBm при використанні частот із діапазонів 2.4 та 5 ГГц. Було проведено два блоки порівнянь: із використанням спрямованої антени ($G = 17$ dB) для БПЛА із спрямованою ($G = 17$ dB) та всеспрямованою ($G = 5$ dB) антенами вузла відповідно; із використанням всеспрямованої антени БПЛА ($G = 6$ dB) та вузькоспрямованої антени ($G = 40$ dB) вузла.

Отримані результати теоретичного розрахунку підтверджуються розрахунком за допомогою Atoll (з урахуванням допустимого відхилення). Виходячи з них побудовано сімейство графіків та таблиць. Порівнюючи сімейство графіків залежності швидкості від мінімальної чутливості передавача (зростаючий характер) та залежності відстані від мінімальної чутливості передавача (спадний характер) можна зробити висновок, що максимальна швидкість передачі даних зменшується зі збільшенням довжини каналу зв'язку.

З отриманих результатів першого блоку порівнянь можна зробити висновок, що максимальна відстань лінії зв'язку між вузлом (при використанні всеспрямованої ($G = 5$ dB) та спрямованої антен ($G = 17$ dB) та БПЛА 1-го рівня (або між БПЛА 1-го та 2-го рівнів) відрізняється у 3,9–4,6 разів. Тобто з використанням сенсорів спрямованої дії при умові однакових інших умов можна досягти збільшення висоти розташування (або відстані до вузла) телекомунікаційних аероплатформ. Також варто звернути увагу на те, що максимальна довжина лінії зв'язку обмежується пропускну здатністю каналу зв'язку. Тому другий блок порівнянь показує, що при використанні вузькоспрямованої антени ($G = 40$ dB) можливо

збільшити пропускну здатність у 1,7–3,5 рази при зміні частоти з 5200 на 2447 МГц (або зменшити витрати енергії при зменшенні потужності передавача з 30 до 15 dBm та пропускну здатності у 5–6 разів) при умові розташування БПЛА 1-го рівня на висоті від пів кілометра до одиниць кілометрів.

Запропонований алгоритм реалізації методу передачі даних із використанням сенсорів спрямованої дії. Наукова новизна якого полягає у вдосконаленні функціонування НПМ за допомогою сенсорів спрямованої дії, що дозволяють більш ефективно розподіляти випромінювану енергію із метою максимізації пропускну здатності (або мінімізації затрачуваних енергоресурсів).

Список літератури:

1. Zhijun Zhang. Antenna design for mobile devices / Zhijun Zhang. – Tsinghua University, China: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2011. – 289 с.
2. Zhi Ning Chen. Antennas for portable devices / Zhi Ning Chen. – Institute for Infocomm Research, Singapore: John Wiley & Sons, Ltd, 2007. – 307 с.
3. Ramos, A.; Varum, T.; Matos, J.N. Compact Multilayer Yagi-Uda Based Antenna for IoT/5G Sensors. *Sensors* 2018, 18, 2914. <https://doi.org/10.3390/s18092914>.
4. Suraj Verma, Prashant Pillai, Yim Hu, Performance Evaluation of Alternative Network Architectures for Sensor-Satellite Integrated Networks, Proceedings – 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, WAINA 2013, 10.1109/WAINA.2013.56
5. S. K. Jain and S. S. Pawar, "Characterization of log periodic planar dipole array antenna," 2016 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Roorkee, India, 2016, pp. 43-48, doi: 10.1109/ICIINFS.2016.8262905.
6. A. Vasylenko, M. Fernández-Bolaños, S. Brebels, W. de Raedt and G. A. E. Vandenbosch, "Conformal phased array for a miniature wireless sensor node," 2010 Conference Proceedings ICECom, 20th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications, Dubrovnik, Croatia, 2010, pp. 1-4.
7. Maxworth. A. Far-Field Radiation Characteristics of Folded Monopole Antennas over a Conducting Ground Plane. *Eng* 2022, 3, 142–160. <https://doi.org/10.3390/eng30100128>.
8. M. G. Tampouratzis, D. Vouyioukas and D. I. Stratakis, "Discone Rectenna Implementation for Broadband RF Energy Harvesting," 2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Thessaloniki, Greece, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/MOCASST.2019.8741639.
9. G. Q. Luo, Z. F. Hu, L. X. Dong and L. L. Sun, "Planar Slot Antenna Backed by Substrate Integrated Waveguide Cavity," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, pp. 236-239, 2008, doi: 10.1109/LAWP.2008.923023.
10. Wi-Fi 6 802.11ax Receiver Input Sensitivity Testing. Режим доступу: <https://www.rfwireless-world.com/test-and-measurement/Receiver-input-sensitivity-testing-for-IEEE-802-11ax-device.html>
11. Wi-Fi 6 Technology and Evolution White Paper, 2020 ZTE Corporation. Режим доступу: https://www.zte.com.cn/content/dam/zte-site/res-www-zte-com-cn/mediare/zte/files/pdf/white_book/Wi-Fi_6_Technology_and_Evolution_White_Paper-202009232125.pdf
12. Лінії радіозв'язку та антенні пристрої. Навчальний посібник / [М.Д. Ільїнов, Т.Г. Гурський, І.В. Борисов, К.М. Гриценко]. – К.: BITI, 2018. – 268 с.

Sushyn I.O., Lysenko O.I. UNIVERSAL METHOD OF DATA TRANSMISSION USING DIRECTED ACTION SENSORS

Sensor nodes are integral components of wireless sensor networks, which are equipped with variable or permanent antennas. The use of efficient antennas and their improvement is a topical issue in the industry. Therefore, the article analyzed and compared modern antennas for mobile devices of directional and omnidirectional action, with the help of which it is possible to organize the connectivity of nodes of mobile wireless sensor networks with telecommunication aerial platforms (TA) based on UAVs of helicopter and aircraft types. The correct choice of antennas for MWSN nodes is an important factor for achieving the required

network parameters: operation time, the minimum number of required UAVs, bandwidth, etc. Omnidirectional antennas are used in most mobile devices (as well as sensor nodes), which is not always a solution that satisfies all requirements, so there is a need for efficient use of the energy resource of nodes using directional antennas. This creates a scientific problem, which consists in the development of data transfer techniques using directional action sensors, taking into account the possibility of application in multi-level ground-air networks (GAN). The theoretical calculation of the length of the TA-node communication line was performed. The obtained results are confirmed by modeling in the Atoll software complex. With the help of the above two approaches, the bandwidth of the communication line was compared with different input parameters of the network and the distance of the communication line using omnidirectional, directional, and narrowly directional antennas. Based on the obtained dependencies, an algorithm for the implementation of the data transmission method using directional action sensors was created. This will make it possible to use it in the creation of advanced long-range GANs with increased bandwidth.

Key words: *MWSN, telecommunication aerial platform, sensor nodes, directional antennas, UAV.*