

Олег Александрович Білобородов (кандидат технічних наук)

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки ЗС України, Україна

## УПРАВЛІННЯ ШИРИНОЮ ДІАГРАМИ НАПРАВЛЕНОСТІ І ПОТУЖНІСТЮ ВИПРОМІНЮВАННЯ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ

Для боротьби з групами безпілотних літальних апаратів, а також для інших завдань ефективним є застосування засобів електромагнітного впливу. При зміні відстані до групової цілі її кутовий розмір змінюється, тому актуальним є завдання ефективного регулювання ширини діаграми направленості антенної системи випромінювального радіотехнічного засобу і потужності, що випромінюється. У статті наведені основні співвідношення для забезпечення заданої густини потоку потужності випромінювання у заданій області з урахуванням поглинання енергії в атмосфері. Представлені результати аналізу методів синтезу антен та обґрунтовані основні методи регулювання ширини діаграми направленості: використання апертури змінного розміру, а також варіювання параметрів для параметричних амплітудних розподілів збуджуючих струмів вздовж апертури антени. Проведено аналіз впливу зазначених параметрів на показники поля випромінювання антен. Представлено розроблені алгоритми варіювання параметрів і потужності випромінювання для забезпечення заданого рівня впливу густини потоку потужності випромінювання на ціль. Отримані результати дозволяють обґрунтовувати вимоги до радіотехнічних засобів електромагнітного впливу (боротьби з безпілотним літальними апаратами, системами управління противника тощо). Результати можна застосовувати у складі алгоритмів систем управління спеціальних радіотехнічних засобів.

**Ключові слова:** радіотехнічний засіб; антенна система; діаграма направленості; потужність випромінювання; густина потоку потужності.

### Вступ

В останні роки стрімко поширюється обсяг застосування безпілотних літальних апаратів [1]. Групи БпЛА застосовуються для атаки як військових об'єктів, так і важливих об'єктів інфраструктури. Для боротьби з такого роду викликами, а також для інших завдань можливо застосування засобів електромагнітного впливу [2]. При цьому засоби електромагнітного впливу мають переваги перед іншими саме для протидії групам БпЛА [3].

**Постановка проблеми.** У випадку зміни відстані між складною (груповою) ціллю і засобом електромагнітного впливу її кутовий розмір також змінюється (рис. 1).

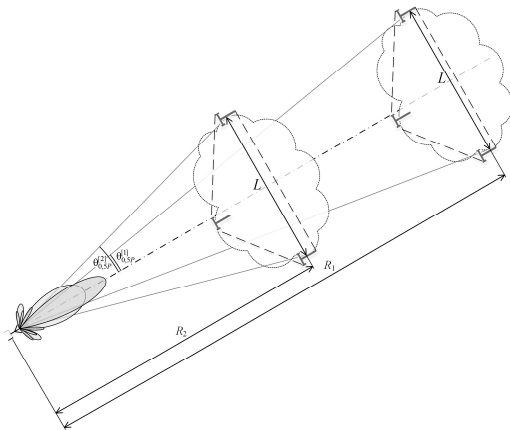


Рис. 1. Зміна необхідної ширини ДН

Для забезпечення необхідної напруженості поля (густини потоку потужності випромінювання) постає проблема ефективного регулювання ширини діаграми направленості (ДН) антенної системи випромінювального радіотехнічного засобу і потужності, що випромінюється.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз методів синтезу антен свідчить, що управління шириною ДН для заданої антени можна здійснювати зміною амплітудно-фазового розподілу струмів збудження [4]: більш швидке спадання амплітуди збуджуючих струмів від центру до краю апертури призводить до розширення ДН. Але для такого способу необхідно розроблювати систему управління необхідного розподілу струмів збудження [5], що може значно ускладнити антенну систему [6]. Крім того, ширина ДН, при інших рівних умовах, залежить від розміру випромінювальної апертури: зі збільшенням розмірів антени ДН звужується. Дискретний варіант зазначеного способу можна просто реалізувати у фазованій антенній решітці [7, 8] шляхом регулювання кількості рядків випромінювання і кількості активних елементів випромінювання у рядку.

Враховуючи зазначене метою статті є запропонування антенної системи та синтез алгоритму управління нею для забезпечення опромінювання області заданого розміру із інтенсивністю, не менше заданої.

У ході дослідження використовувались такі методи: аналіз теоретичних джерел з проблем синтезу антен, синтез випромінювальних систем, синтез ДН, математичне моделювання.

**Виклад основного матеріалу дослідження**

1. *Енергетичні співвідношення.* Поверхнева густина потоку потужності електромагнітного випромінювання у дальній зоні  $R$  без урахування затухань визначається формулою [9]:

$$S_0 = \frac{PD\eta_A}{4\pi R^2}, \quad (1)$$

де  $P$  – середня потужність, що підводиться до антени,  $D$  – коефіцієнт направленої дії,  $\eta_A$  – коефіцієнт корисної дії антени.

При наявності затухань густина потоку зменшується [9]:

$$S = \frac{S_0}{10^{0,1\gamma R}} = \frac{PD\eta_A}{4\pi R^2 \cdot 10^{0,1\gamma R}}, \quad (2)$$

де  $\gamma$ , [дБ/км] – коефіцієнт затухання (табл. 1) за напрямком поширення хвиль електромагнітного випромінювання ( $R$ , [км]).

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів затухання для нормального стану атмосфери [10; 11]

$\lambda$ , [см]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,46	0,6	0,7	0,8	1
$\gamma$ , [дБ/км]	6	2	0,5	0,35	2	0,4	0,2	0,12	0,1
$\lambda$ , [см]	2	3	5	10	21	24	25	65	150
$\gamma$ , [дБ/км]	$4 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$

Якщо у заданій області необхідно забезпечити  $S \geq S_{\min}$ , то з (2) необхідна потужність, що підводиться до антени:

$$P \geq \frac{4\pi S_{\min} R^2}{D\eta_A} \cdot 10^{0,1\gamma R}. \quad (3)$$

2. *Просторово-енергетичні характеристики випромінювання антен.* Результати аналізу методів синтезу антен дозволили, у якості основних методів регулювання ширини ДН, визначити наступні: використання апертур з можливістю зміни розміру, а також використання параметричних амплітудних розподілів. У якості апертури перемінного розміру розглядається антенна решітка (АР) із зміною кількості випромінювачів. Збільшення кількості випромінювачів, при інших незмінних умовах, дозволяє таким чином впливати на множник АР, що головний максимум результуючої ДН звужується. Управління шириною ДН пропонується здійснювати шляхом увімкнення/вимкнення рядків випромінювання і елементів у рядках таким чином, щоб забезпечити попадання заданого району у перетин головної пелюстки ДН антенної системи. У такій постановці можна сказати, що в якості варійованого параметру виступає кількість рядків (випромінювачів у рядку)  $N$ .

Серед параметричних амплітудних розподілів було обрано такі, у яких просто організовується регулювання параметра амплітудного розподілу, а саме: розподіл типу “косинус на п’єдесталі” (регульований параметр – величина п’єдесталу  $\Delta$ ) і розподіл типу  $\cos^n$  (регульований параметр – ступінь  $n$ ).

Результати попереднього моделювання показали, що для розширення можливостей доцільно поєднувати методи, що базуються на використанні параметричних амплітудних розподілів за методом варіювання кількості

випромінювачів. У якості базової антенної системи була обрана АР з ізотропними випромінювачами, а параметричні розподіли реалізовані у їх симетричному дискретному варіанті.

2.1. *Варіювання кількості рядків (елементів) випромінювання  $N$ .* Аналіз характеристик поля випромінювання АР у дальній зоні за відомими співвідношеннями, як зазначалось, показує, що варійованим параметром для регулювання ширини ДН може виступати кількість активних рядків випромінювання і елементів у рядках при рівномірному розподілі збуджуючих струмів вздовж апертури антени. Результати моделювання можливостей зміни ширини ДН для різної кількості випромінювачів наведені на рис. 2.

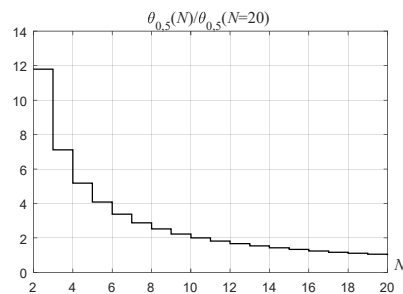


Рис. 2. Варіювання ширини ДН АР з рівномірним розподілом залежно від кількості рядків (елементів) випромінювання  $N$

Аналіз результатів моделювання свідчить, що метод варіювання кількості активних елементів випромінювання АР дозволяє досягти зміни ширини ДН до  $\sim 12$  разів для АР  $20 \times 20$  випромінювачів.

Для реалізації методу регулювання ширини головної пелюстки випромінювання АР шляхом варіювання кількості активних елементів випромінювання розроблено блок-схему алгоритму обчислень, що наведена на рис. 3.

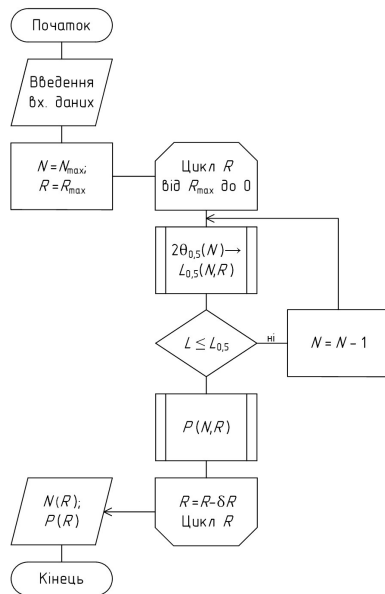


Рис. 3. Блок-схема алгоритму обчислень варіювання рядків (елементів) і потужності випромінювання АР з рівномірним розподілом струмів збудження

Далі розглянемо можливість регулювання ширини ДН зміною параметрів амплітудного розподілу збуджуючих струмів в апертурі антени.

2.2. Амплітудний розподіл типу “косинус на п’єдесталі”. Розглянемо найбільш поширений варіант амплітудного розподілу, а саме – розподіл типу “косинус на п’єдесталі”. Аналіз виразу для ДН у дальній зоні, як зазначалось, свідчить, що регулювання ширини ДН можна здійснювати шляхом варіювання параметра розподілу  $\Delta$  ( $\Delta = 1$  відповідає рівномірному розподілу,  $\Delta = 0$  відповідає зниженню амплітуд збуджуючих струмів на краях апертури до нуля). Результати моделювання можливостей зміни ширини ДН методом варіювання параметра  $\Delta$  наведені на рис. 4.

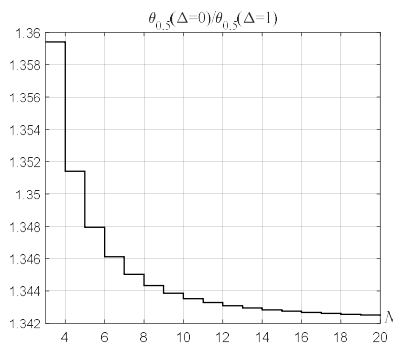


Рис. 4. Варіювання ширини ДН залежно від параметра  $\Delta$

Аналіз результатів моделювання свідчить, що метод варіювання параметру  $\Delta$  розподілу типу “косинус на п’єдесталі” дозволяє досягти варіювання шириною ДН АР від  $\sim 1,34$  разів для багатоеlementних АР до  $\sim 1,36$  для малорозмірних АР.

Для реалізації методу регулювання ширини головної пелюстки ДН АР шляхом варіювання параметру  $\Delta$  розподілу типу “косинус на п’єдесталі” розроблено блок-схему алгоритму обчислень, що наведена на рис. 5.

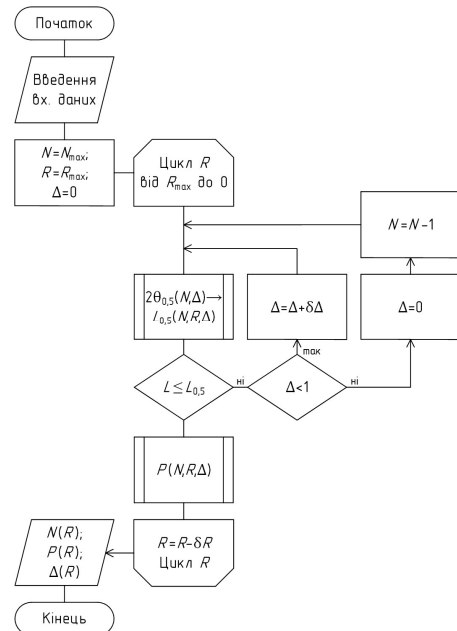


Рис. 5. Блок-схема алгоритму обчислень варіювання параметра  $\Delta$  і потужності випромінювання для розподілу типу “косинус на п’єдесталі”

2.3. Амплітудний розподіл типу  $\cos^n$ . Іншим видом розподілу, який дозволяє регулювати ширину ДН є розподіл типу  $\cos^n$ . Аналіз виразу для ДН антени у дальній зоні свідчить, що регулювання ширини ДН можна здійснювати, як зазначалось, шляхом варіювання параметра  $n$ . Результати моделювання можливостей зміни ширини ДН методом варіювання параметра  $n$  наведені на рис. 6.

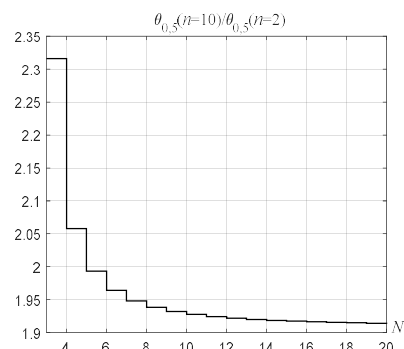


Рис. 6. Варіювання ширини ДН залежно від параметра  $n$

Таким чином, регулювання параметру  $n$  для розподілу  $\cos^n$  дозволяє досягти зміни ширини ДН від  $\sim 1,9$  разів для багатоеlementних АР до  $\sim 2,35$  для малорозмірних АР.

Для реалізації методу регулювання ширини головної пелюстки ДН АР шляхом варіювання параметру  $n$  розподілу типу  $\cos^n$  розроблено блок-схему алгоритму обчислень, що наведена на рис. 7.

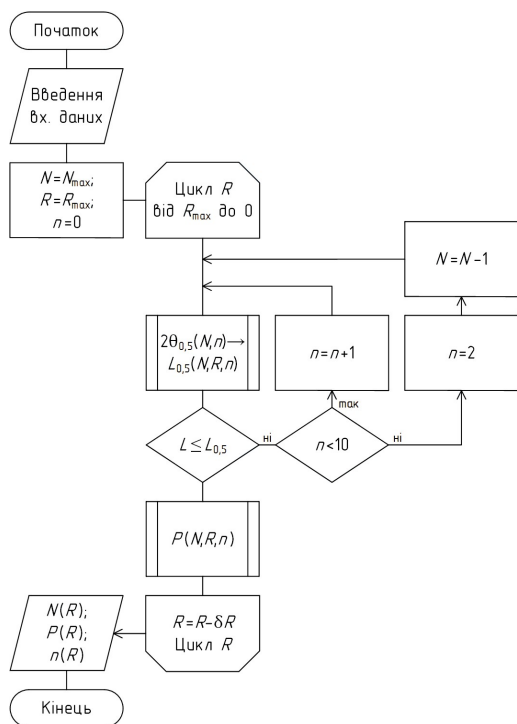


Рис. 7. Блок-схема алгоритму обчислень варіювання параметра  $n$  і потужності випромінювання для розподілу типу  $\cos^n$

2.4. *Моделювання і перевірка отриманих результатів.* Відповідно до розроблених алгоритмів було проведено програмне моделювання. Для обчислень було обрано наступні вхідні дані: максимальна кількість рядків АР та елементів у рядках  $N_{\max}=20$ ; довжина хвилі  $\lambda=3$  см, що відповідає  $\gamma=0,014$  Дб/км; відношення  $d/\lambda=0,5$ ; максимальна дальність до цілі  $R_{\max}=1,2$  км. Для вироблення управляючих команд було синтезовано програмний комплекс формування команд управління радіотехнічним засобом при зміні відстані до району опромінення та перевірено його працездатність (рис. 8).

Для різних типів розподілу було проведено порівняння енергетичних показників (рис. 9).

2.5. *Обговорення результатів.* Отримані залежності і результати моделювання підтверджують основні положення теорії антен, зокрема щодо:

характеру залежності ширини головної пелюстки ДН залежно від розміру апертури і розподілу збуджуваних струмів вздовж апертури антени;

зменшення впливу розподілу збуджуваних струмів на показники направленості із збільшенням розміру АР.

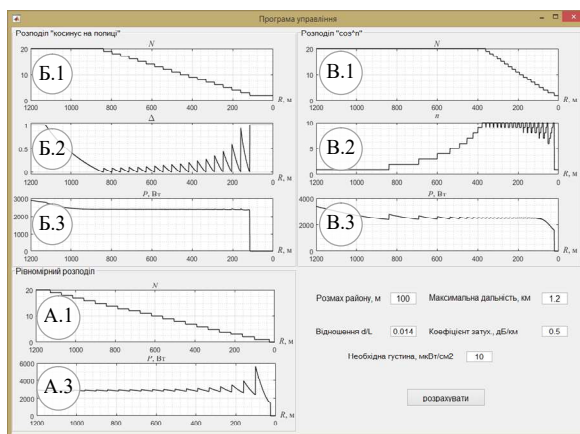


Рис. 8. Послідовність формування команд управління залежно від дальності до цілі у програмному модулі: необхідна кількість рядків (елементів) випромінювання (1), необхідне значення варіюваного параметра (2), необхідна потужність (3) для рівномірного розподілу (А), розподілу типу “косинус на п’єдесталі” (Б) та типу  $\cos^n$  (В)

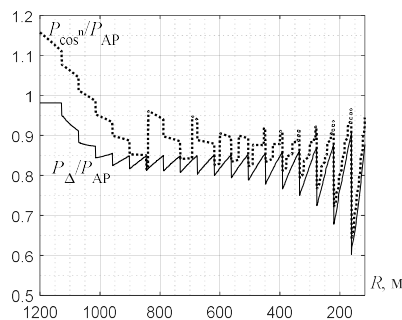


Рис. 9. Порівняння енергетичних показників

Для впливу на великі дистанції показники направленості антени необхідно збільшувати, а єдиним шляхом для цього є збільшення розмірів апертури. Отже, запропонований метод варіювання як розмірів апертури, так і розподілу збуджуваних струмів виявився виправданим.

Аналіз отриманих результатів моделювання стосовно енергетичних показників свідчить: для рівномірний розподіл більш ефективний лише на великих відстанях, коли розмір області опромінення менше розміру перерізу головної пелюстки ДН антени.

Розроблені алгоритми і програмний модуль дозволяють обґрунтовувати вимоги до радіотехнічних засобів електромагнітного впливу (боротьби з БпЛА, системами управління противника тощо).

Типові операції з обґрунтування вимог до зразка:

у залежності від максимальної потужності генераторного пристрою, обґрунтовуються вимоги до зразка стосовно дальності дії (рис. 10);

у залежності від ширини ДН і відповідної дальності застосування обґрунтовуються вимоги стосовно фазових неоднорідностей, точності наведення і стабілізації антенної системи;

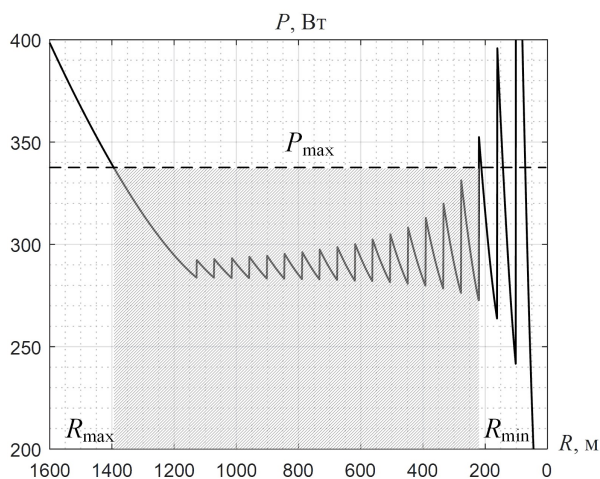


Рис. 10. Використання отриманих результатів для обґрунтування пропозицій щодо побудови засобів впливу

у залежності від необхідної дальності визначаються вимоги до потужності або до розмірності АР (рис. 10);

у випадку високої динаміки роботи радіотехнічного засобу, відсутності регулювання у реальному часі параметрів розподілу збуджуючих струмів, або відсутності оперативних даних про

відстань до області впливу, у якості параметрів управління можна обирати усереднені (або граничні) вимоги до енергетичних параметрів і параметрів розподілу збуджуючих струмів для певного інтервалу дії.

### Висновки й перспективи подальших досліджень

У результаті проведених досліджень розроблено алгоритми і програмний модуль синтезу сигналів управління параметрами розподілу збуджуючих струмів і потужністю випромінювання для регулювання ширини ДН і забезпечення у заданій області необхідного потоку потужності електромагнітного випромінювання для функціонального ураження цілей. Отримані результати можна застосовувати при обґрунтуванні тактико-технічних вимог до зразків спеціальних радіотехнічних засобів, а також у складі систем управління ними. Напрямок подальших досліджень можна визначити обґрунтування вимог щодо точності наведення і стабілізації розглянутих засобів, а також синтез системи управління для сканувальних антенних систем.

### Література

1. James DeShaw Rae. Analyzing the Drone Debates: Targeted Killing, Remote Warfare, and Military Technology. Springer, 2014. 147 p. DOI: 10.1057/9781137381576.
2. Семенец В. О., Трухин М. П. Способы противодействия беспилотным летательным аппаратам. *Наукоёмкие технологии в космических исследованиях Земли*. 2018. Т. 10. № 3. С. 4-12. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10070.
3. Теодорович Н. Н., Строганова С. М., Абрамов П. С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами. *Интернет-журнал "Науковедение"*. 2017. Т. 9, № 1. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf>. (дата звернення: 19.11.2019).
4. Сахацкий В. Д., Щеглов А. Ю. Антенный излучатель для систем диагностики подповерхностных объектов. *Scientific Journal «ScienceRise»* № 5/2 (4). 2014. С. 60-63.
5. Белоусов О. А., Рязанов Е. В., Колмыкова А. С., Дякин А. И. Применение алгоритмов нечеткой логики в системе управления диаграммообразующим устройством гибридной зеркальной антенны. *Программные продукты и системы*. 2018. № 4 (31). С. 757-762. DOI: 10.15827/0236-235X.031.4.757-762.
6. Митрохин В. Н., Пропастин А. А. Синтез излучающей системы, формирующей секторную диаграмму направленности с минимизацией эффекта Гиббса. *Радиооптика*. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. № 6. с. 1-13. DOI: 10.7463/rdopt.0616.0852509.
7. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток : Учеб. пособие для вузов / Под ред. Д.И. Воскресенского. М. : Радиотехника, 2012. 744 с.
8. Robert C. Hansen. Phased array antennas. 2009. 547 p.
9. Черный Ф. Б. Распространение радиоволн. М. : Сов. Радио, 1972. 464 с.
10. Рекомендация МСЭ-R Р.676-6. Затухание в атмосферных газах (Вопрос МСЭ-R 201/3). 2005. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-6-200503-S!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-6-200503-S!!PDF-R.pdf). (дата звернення: 20.11.2019).
11. Захаров А. И., Кувалкин Е. С. Программная реализация методики расчета затухания радиосигнала в атмосферных газах для спутниковой связи. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*. Серия: Физико-математические и технические науки. 2019. № 1. С. 18-27.

## УПРАВЛЕНИЯ ШИРИНОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ И МОЩНОСТЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ

Олег Александрович Белобородов (кандидат технических наук)

Центральный научно-исследовательский институт вооружения и военной техники ВС Украины, Украина

Для борьбы с группами беспилотных летательных аппаратов, а также для других задач эффективно применение средств электромагнитного воздействия. При изменении расстояния до групповой цели ее угловой размер изменяется, поэтому актуальной является задача эффективного регулирования ширины диаграммы направленности антенной системы излучающего радиотехнического средства и излучаемой мощности. В статье приведены основные соотношения для обеспечения заданной плотности потока мощности излучения в заданной области с учетом поглощения энергии в атмосфере. Представлены результаты анализа методов синтеза антенн и обоснованы основные методы регулирования ширины диаграммы направленности: использование апертуры переменного размера, а также варьирования параметров для параметрических амплитудных распределений возбуждающих токов вдоль апертуры антенны. Проведен анализ влияния указанных параметров на пространственно-энергетические показатели поля излучения антенн. Представлены разработанные

алгоритмы варьирования параметров и мощности излучения для обеспечения заданного уровня воздействия плотности потока мощности излучения на цель. Полученные результаты позволяют обосновывать требования к радиотехническим средствам электромагнитного воздействия (борьбы с беспилотными летательными аппаратами, системами управления противника и т.д.). Результаты можно применять в составе алгоритмов систем управления специальных радиотехнических средств.

**Ключевые слова:** радиотехническое средство; антенная система; диаграмма направленности; мощность излучения; плотность потока мощности.

## CONTROL BEAMWIDTH AND RADIATION POWER OF ANTENNA SYSTEM

*Oleh Biloborodov (Candidate of Technical Sciences)*

*Central Research Institute of Armament and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, Ukraine*

To combat groups of unmanned aerial vehicles, as well as for other tasks, the use of electromagnetic means is effective. When the distance to the group target changes, its angular size changes, therefore, the urgent task is to effectively control the radiation pattern width of the antenna system of the radiating radio equipment and the radiation power. The article describes the basic relationships for ensuring a given radiation power flux density in a given region, taking into account energy absorption in the atmosphere. The results of the analysis of antenna synthesis methods are presented and the main methods for controlling the width of the radiation pattern are substantiated: the use of aperture of variable size, as well as variation of parameters for the parametric amplitude distributions of exciting currents along the antenna aperture. The analysis of the influence of parameters on the spatial and energy parameters of the radiation field of the antennas is carried out. The developed algorithms for varying the parameters and radiation power to provide a given level of impact on the target are presented. The results obtained allow us to justify the requirements for radio equipment of electromagnetic effects (combat unmanned aerial vehicles, enemy control systems, etc.). The results can be used as part of control systems algorithms for special radio equipment.

**Keywords:** radio engineering tool; antenna system; radiation pattern; radiation power; power flux density.

### References

1. James DeShaw Rae (2014), Analyzing the Drone Debates: Targeted Killing, Remote Warfare, and Military Technology. Springer, 147 p. DOI: 10.1057/9781137381576.
2. Semenets V. O., Truhin M. P. (2018), Ways to counter unmanned aerial vehicles [Sposoby protivodeystviya bespilotnyim letatelnyim apparatam]. Naukoemkie tehnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli, Vol.10. No.3. pp. 4-12. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10070.
3. Teodorovich N. N., Stroganova S. M., Abramov P. S. (2017), Methods for detecting and combating small-sized unmanned aerial vehicles [Sposoby obnaruzheniya i borby s malogabaritnyimi bespilotnyimi letatelnyimi apparatami]. Internet-zhurnal "Naukovedenie", Vol. 9, No. 1, available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf>.
4. Sahatskiy V. D., Scheglov A. Yu. (2014), Antenna emitter for diagnostic systems of subsurface objects [Antennyiy izluchatel dlya sistem diagnostiki podpoverhnostnykh ob'ektov]. Scientific Journal «ScienceRise», No. 5/2 (4), pp. 60-63.
5. Belousov O. A., Ryazanov E. V., Kolmyikova A. S., Dyakin A. I. (2018) The use of fuzzy logic algorithms in the control system of a beam-forming device of a hybrid mirror antenna. [Primenenie algoritmov nechetkoy logiki v sisteme upravleniya diagrammoobrazuyuschim ustroystvom gibridnoy zerkalnoy anteny], Programmnye produkty i sistemy, No. 4 (31). pp. 757-762. DOI: 10.15827/0236-235X.031.4.757-762.
6. Mitrohin V. N., Propastin A. A. (2016), Synthesis of a radiating system forming a sector radiation pattern with minimization of the Gibbs effect [Sintez izluchayushey sistemy, formiruyushey sektornuyu diagrammu napravlenosti s minimizatsiyey efekta Gibbsa], Radiooptika, MGTU im. N. E. Bauman, No. 6. pp. 1-13. DOI: 10.7463/rdopt.0616.0852509.
7. Microwave devices and antennas. Designing Phased Antenna Arms: Textbook for High Schools [Ustroystva SVCh i anteny. Proektirovanie fazirovannykh antenykh reshetok : Ucheb, posobie dlya vuzov], Ed. Voskresensky D. I., Radiotekhnika, Moscow (2012), 744 p.
8. Robert C. Hansen (2009), Phased array antennas, 547 p.
9. Chernyy F. B. (1972), Radiowave propagation [Rasprostraneniye radiovoln], M. : Sov. Radio, 464 p.
10. Recommendation ITU-R P.676-10. (09/2013). Attenuation by atmospheric gases, available at: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-10-201309-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-10-201309-S!!PDF-E.pdf).
11. Zaharov A. I., Kuvalkin E. S. (2019), Software implementation of the method for calculating the attenuation of a radio signal in atmospheric gases for satellite communications [Programmnyaya realizatsiya metodiki rascheta zatuhaniya radiosignala v atmosferynykh gazakh dlya sputnikovoy svyazi], Vestnik Baltiyskogo federalnogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tehnicheckie nauki, No. 1, pp. 18-27.