

УДК:621.396.677.4; [539.37.38:621.396.946]

## СПІРАЛЬНІ АНТЕНИ З РЕГУЛЬОВАНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Юрій Міць

Запорізька державна інженерна академія

*Анотація:* Розглядається можливість застосування просторової кінчної періодичної спіральної антени з регульованими радіопеленгаційними характеристиками в сотовому телефоні спеціального призначення.

*Summary:* The usage of space conical periodical spiral antenna with regulation radio direction funding characteristics in cell radiotelephones of special assignment is considered.

*Ключові слова:* Сотовий телефон, спіральна антена, діаграма спрямованості.

### I Вступ

Ефективність технічного виявлення та термінового захисту несанкціонованого витоку конфіденційної інформації з сучасних електронних мереж, боротьба з хабарництвом, корупцією, організованою злочинністю та тероризмом тощо в сучасних умовах практично неможливі без використання спеціальних малогабаритних мобільних ширококутових радіотехнічних систем навколосемного та космічного радіозв'язку, радіоастрономії, радіостеження, радіопеленгації, радіоборотьби, радіовимірювання, технічної радіорозвідки, заснованих на використанні малогабаритних надширококутових просторових спіральних антен з регульованими радіопеленгаційними характеристиками та параметрами зовнішнього поля випромінювання.

На тимчасову відсутність такої радіоапаратури можливо і продовжують розраховувати різні злочинні угруповання, плануючи проведення безвідповідальних терористичних актів. Відомо, наприклад, що один з таких терористичних актів відбувся у московському театральному центрі на Дубровці 23 – 26 жовтня 2004 р. ЗМІ повідомляли, що ФСБ Росії під час провадження терористами теракту мали лише можливість прослуховувати розмови замовників теракту та визначити приблизні координати розташування замовників теракту, але у ФСБ не було відповідних технічних засобів щодо вимірювання точних координат місця їх перебування (квартира, підвал, гараж тощо). Це позбавило ФСБ вийти на переговори з замовниками теракту щодо узгодження умов припинення терористами неконституційних дій та негайного визволення заручників, оскільки спеціальні підрозділи Служби Безпеки поки що не мають на озброєнні багатофункціональних малогабаритних переносних радіопеленгаторів з регульованими радіопеленгаційними характеристиками та параметрами поля випромінювання, які можна застосовувати для точної радіопеленгації (точне вимірювання координат випромінювача) будь-яких сигналів у смузі частот 300-3000 МГц і вище, що випромінюються з окремих квартир багатоповерхових житлових будинків чи сховищ.

### II Постановка завдання

Основним завданням цієї роботи є *розробка спеціальної ефективної та скрито носимої багатофункціональної мобільної малогабаритної ширококутової радіопеленгаційної радіоапаратури, яка б давала можливість не тільки прослуховувати розмови кримінальних абонентів по мобільному радіозв'язку, але і дозволяла ефективно виявляти точні координати розташування власників мобільних телефонів, де б вони не знаходилися.*

Сучасний розвиток малогабаритних багатофункціональних радіотехнічних систем спеціального призначення і сьогодні стримується не відсутністю самих радіотехнічних систем прийому-передачі та перетворення високочастотних сигналів у низькочастотний сигнал, а відсутністю, головним чином, *малогабаритних багатофункціональних ширококутових антен з регульованими радіопеленгаційними характеристиками та параметрами поля випромінювання, здатних за спрощеною схемою формувати в дальній зоні та в широкій смузі робочих частот (450-3000 МГц) різні за шириною та формою діаграми спрямованості (ДС), в тому числі і три класичні радіопеленгаційні ДС.*

Відомо, що сучасні РТС спеціального призначення і сьогодні використовують ширококутові малогабаритні *фазовані антенні решітки*. Їх застосування іноді є неможливим, внаслідок відомих недоліків, а саме:

- низька гарантія бути непоміченим навколишнім людським оточенням у разі відпрацювання спеціальних оперативних завдань: радіопеленгування, радіостеження, радіоборотьби, елементів технічної розвідки тощо;

- залежність ефективності роботи усієї радіосистеми (тривалість, точність, оперативність) від потужності елементів живлення.
- значна вага та габарити радіосистеми, що знижують ефект скритності;
- складна система електронного регулювання параметрів антенної системи, значна вартість антенної решітки і низька надійність усієї радіосистеми в цілому.

Для покращення характеристик спеціальних сучасних РТС було поставлено завдання: на підставі однієї окремої елементарної конструкції малогабаритної ширококутної просторової однозаходної дротової періодичної кінцевої спіральної антени [1 – 3, 6, 7] з незмінними кінцевими геометричними розмірами, з незмінними характеристиками та параметрами поля випромінювання *розробити спеціальну малогабаритну надширококутну антену UNF діапазону [4, 5] зі спрощеною механічною системою регулювання характеристик та параметрів поля випромінювання (ширина та форма ДС, ширина смуги робочих частот, коефіцієнт поляризації тощо)* для застосування в серійних сотових телефонах (СТ) для значного підвищення якості прийому-передачі інформації, отримання додаткової функції спеціального призначення – функції ширококутної радіопеленгації UNF діапазону, здатного вирішувати багатofункціональні задачі радіозв'язку (в тому числі і космічного) у широкому спектрі робочих частот, а також забезпечення ефективного виконання завдань технічного виявлення несанкціонованого витоку конфіденційної інформації з електронних джерел державного призначення, систем технічної радіорозвідки, радіонавігації, радіокерування, радіостеження, радіоборотьби тощо.

### III Головна частина

Відомо [1, 2], що спіральні антени зі стаціонарними характеристиками та параметрами поля випромінювання, як плоскі, так і просторові, останнім часом набули широкого розповсюдження і почали використовуватися фактично в усіх галузях сучасного радіо приладобудування. Просторові спіральні антени з нерегульованими параметрами поля випромінювання знайшли своє використання і в сучасних конструкціях сотових радіотелефонів [3], що привело до значного підвищення якості прийому-передачі радіосигналів. Існуюча їм альтернатива – мікросмужкові антени – залишаються проблематичними при узгодженні лінії радіозв'язку, оскільки якість роботи СТ значною мірою залежить не тільки від форми, розмірів антени та конструкції самого корпусу, але і від їх орієнтації у просторі. Треба додати, що використання мікрополоскових антен в СТ продовжується, незважаючи на те, що кожна конструкція звичайних корпусів СТ для узгодження лінії радіозв'язку потребує своєї окремої та відповідної конструкції мікрополоскової антени, чим фактично знижуються позитивний ефект модернізації та стандартизації старих СТ.

Спіральні антени, що використовуються сьогодні в СТ, хоча універсальні, мають незмінні характеристики та параметри поля випромінювання, виконуються за спрощеною технологією і мають статус окремого автономного елемента випромінювальної системи (часто з вхідним опором 50 Ом), але вони не завжди задовольняють конструктора СТ, оскільки конструкція будь-якого сучасного СТ з такою антеною спроможна формувати лише одну типову діаграму спрямованості (ДС) з використанням, як правило, максимуму, направлено перпендикулярно осі спіралі, тобто базуються на так званому «боковому випромінюванні».

Оскільки спосіб формування різних ДС спіральною антеною зі стаціонарними механічними характеристиками фактично неможливий, варто розглянути один із можливих варіантів спіральної антени, здатної формувати в дальній зоні різні за шириною та формою променя ДС. Це можна виконати лише тоді, коли для отримання  $n$  відповідних форм ДС існує і  $n$  конструкцій спіральних антен з відповідними стаціонарними характеристиками та параметрами спіралей-випромінювачів.

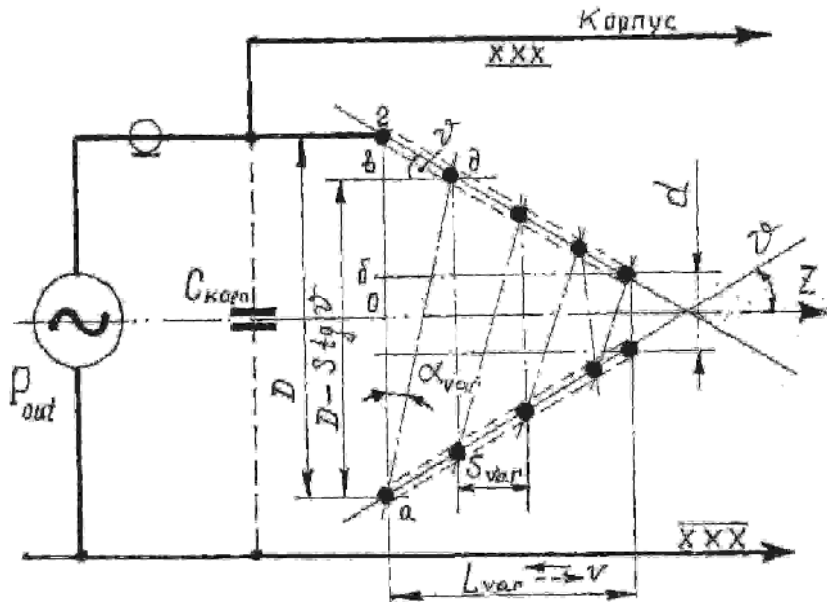
До суттєвих недоліків цього способу можна віднести:

- незручний перехід з однієї ДС на іншу ДС, оскільки такий перехід змушує оператора проводити заміну однієї стаціонарної спіральної антени на іншу відповідну зі своїми характеристиками та параметрами зовнішнього поля випромінювання;
- спіральна антена з нерегульованим періодом має значно нижчу та нерегульовану ширину смуги робочих частот стосовно спіралі з регульованим періодом;
- перебудова СТ зі спіральною антеною зі стаціонарними характеристиками та параметрами на будь-який інший режим роботи, наприклад, виявлення розшукуваного сигналу, вимірювання пеленга на сигнал та його точних координат – неможлива, оскільки спіральна антена працює тільки в одному з трьох режимів.

Вказаних вище недоліків можна уникнути, якщо замість *ширококутних* просторових періодичних спіральних антен з *нерегульованими* характеристиками та параметрами поля випромінювання встановити спеціальні малогабаритні *надширококутні* просторові періодичні спіральні антени з *регульованими*

характеристиками та параметрами поля випромінювання.

На рис. 1 показана еквівалентна схема періодичної ширококугової кінчної спіральної антени з регульованими радіопеленгаційними характеристиками та параметрами поля випромінювання шляхом регулювання осової відстані  $S_{var}$  між витками спіралі-випромінювача.

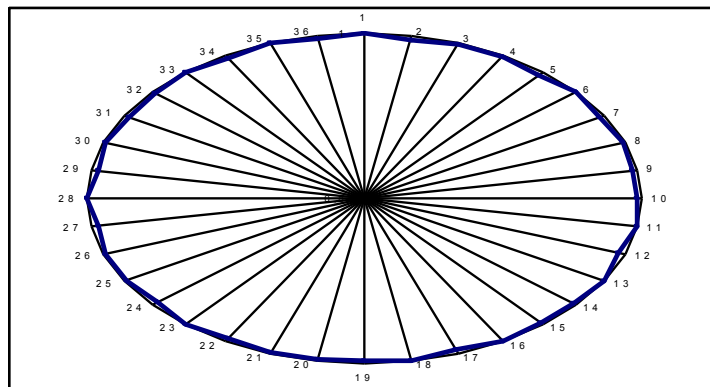


**Рисунок 1 – Еквівалентна схема кінчної спіральної антени з регульованими радіопеленгаційними характеристиками**

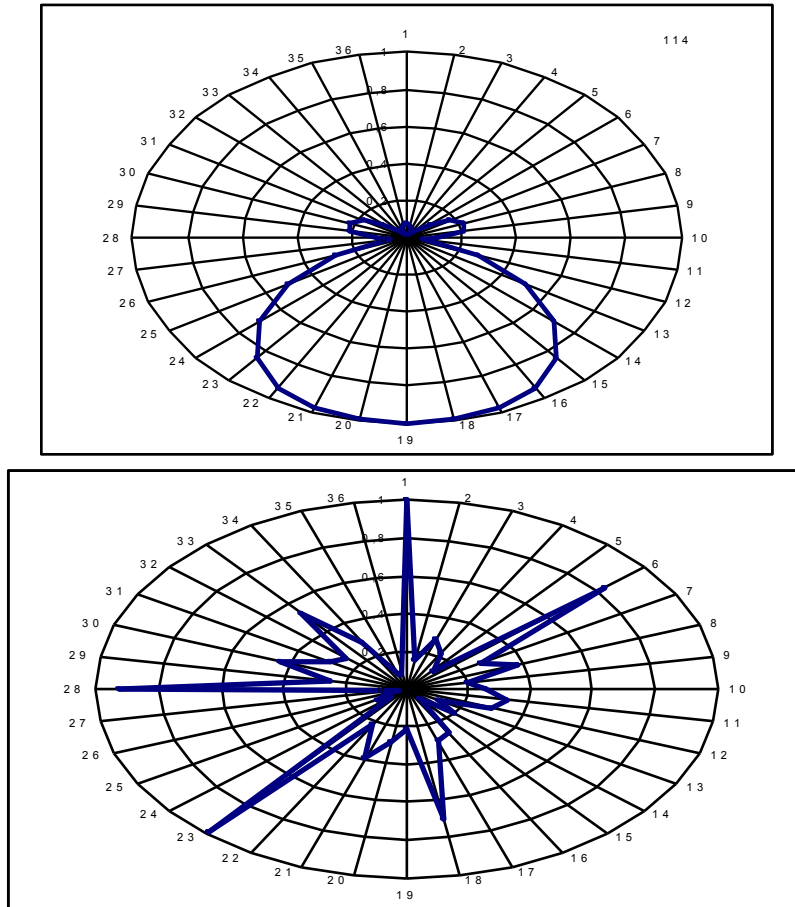
В результаті в дальній зоні формуються різні за шириною та формою ДС, в тому числі і три класичні радіопеленгаційні ДС, а саме:

- ДС (рис. 2,а) у формі “тора” (для встановлення факту існування в ефірі відомого або невідомого випромінювання);
- ДС (рис. 2,б) у формі “воронки” з «гострим мінімумом» сигналу по осі спіралі Z (для вимірювання точного пеленгу на випромінювач та його координат);
- ДС (рис. 2,в) з «гострим максимумом» по осі (для вимірювання пеленгу на випромінювач).

(а)



(б)



**Рисунок 2 – Радіопеленгаційні діаграми спрямованості антени: оглядова (а), з максимумом по осі (б) та з мінімумами прийому (в)**

Регулюванням відстані  $S_{\text{var}} = S_i$  можна реалізувати два крайніх варіанти:

– у першому варіанті кінцева спіраль стиснута у *плоску спіраль Архімеда* з незмінною радіальною відстанню між витками  $S_R - d_0$ , де  $S_R$  – радіальна відстань між осями витків плоскої спіралі Архімеда,  $d_0$  – діаметр дроту, з якого виготовлена спіраль; ДС такої антени має максимум по осі спіралі (рис. 2,в); максимальна довжина  $L_{\text{max}}$  плоскої спіралі Архімеда (аналог довжини  $L_{\text{max}}$  просторової спіралі) вздовж осі буде дорівнювати діаметру дроту  $d_0$ , тобто  $L_{\text{max}} = d_0$ ;

– у другому варіанті плоска спіраль Архімеда перетворюється (розтягуванням витків вздовж осі спіралі) у просторову *кінчну спіральну антену з регульованого відстанню між витками спіралі*,  $S_0 \neq 0$ . У цьому випадку осьова відстань між витками кінчної спіралі  $S_0$  змінюється від мінімальної  $S_{0 \text{ min}}$  до максимальної  $S_{0 \text{ max}}$ , за якої спіраль зберігає пружні властивості.

Максимальну довжину просторової кінчної спіральної антени можна розрахувати з формули  $L_{\text{max}} = (N - 1) S_{0 \text{ max}}$ , де  $N$  – число витків спіралі.

Регулювання відстані  $S_{\text{var}} = S_i$  дає можливість формувати в дальній зоні різні за шириною та формою променів ДС.

Оскільки в кінчних спіральних структурах уздовж осі випромінюють лише окремі резонансні витки (активна зона – 1 – 3 витка), геометрична довжина яких близька до робочої довжини хвилі  $\lambda_p$ , то резонуючі витки кінчної спіралі розглядаються як резонуючі витки еквівалентної циліндричної спіралі (принцип «локальної еквівалентності» [6, 7]. Такі припущення правомірні і дозволяють [7] розраховувати *статичні* характеристики та параметри поля випромінювання будь-якого окремого витка кінчної спіралі-випромінювача з діаметром  $d_i$  та незмінної довжини спіралі, а саме:

$$E(\vartheta) = \frac{\sin \left[ \frac{\pi L_z}{\lambda_0} (n_z - \cos \vartheta) \right]}{n_z - \cos \vartheta} \cos \left( \frac{\pi d_i}{\lambda_0} \right) n \vartheta, \quad (1)$$

де:

$E(\vartheta)$  – відносний статичний розподіл поля випромінювання в дальній зоні резонансним витком конічної спіральної антени як функція  $\vartheta$  – кута спостереження за ціллю;

$L_z$  – довжина конічної просторової спіралі-випромінювача;

$\lambda_0$  – довжина хвилі у вільному просторі;

$$n_z = \frac{\varphi \lambda_p}{2 \pi S_0}, \quad (2)$$

$\varphi$  – різниця фаз між струмами в сусідніх витках (з обох боків) та резонуючим витком спіралі;

$\lambda_p$  – довжина резонуючої хвилі в спіралі;

$S_0$  – осьова відстань між витками спіральної антени;

$d_i$  – діаметр резонуючого витка конічної спіралі;

$$\varphi = \frac{2 \pi l_p}{\lambda_0} \frac{c}{v} - \text{різниця фаз між струмами сусідніх бокових витків та резонуючим витком};$$

$l_p$  – довжина резонуючого витка спіралі;

$c$  – швидкість світла;

$v$  – швидкість хвилі в провіді резонуючих витків спіралі.

Якщо вважати, що швидкість хвилі, що випромінюється з резонуючого витка спіралі у вигляді поверхневих біжучих хвиль, близька до швидкості світла ( $c \cong v$ ), то початкова відстань  $S_0$  між витками спіралі залежить від кута  $\alpha$  підйому витків спіралі, тобто  $S_0(\alpha)$ , тому *статичне* рівняння (2) перетворюється на *динамічне*:

$$n_z = \frac{l_p}{S_i(\alpha)}, \quad (3)$$

Підстановкою динамічного параметру (3) в основне статичне рівняння (1), можна отримати основне *динамічне рівняння* для поля випромінювання в дальній зоні конічної просторової періодичної спіральної антени з регульованою відстанню  $S_i(\alpha)$ :

$$E(\vartheta) = \frac{\sin \left[ \frac{\pi L_z}{\lambda_0} \left( \frac{l_p}{S_i(\alpha)} - \cos \vartheta \right) \right]}{\frac{l_p}{S_i(\alpha)} - \cos \vartheta} \cos \left( \frac{\pi d_i}{\lambda_0} \right) n \vartheta. \quad (4)$$

Довжина спіралі вздовж осі симетрії  $L_z$  розраховується з рівняння:

$$L_z = NS_i(\alpha)_{2,1}, \quad (5)$$

де  $N$  – число витків конічної спіралі;

$$S_i(\alpha)_2 = \frac{D \operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \vartheta}, \quad (6)$$

$$S_i(\alpha)_1 = \frac{d \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \vartheta}, \quad (7)$$

де  $D$  та  $d$  – більший та менший діаметри витків просторової конічної спіралі, відповідно.

Практичне значення для конічного просторового випромінювача з регульованою відстанню між витками спіралі має коефіцієнт перекриття діапазону по частоті  $K_n$ , який для прямого випромінювання має

ВИГЛЯД:

$$K_n^+ = \frac{\lambda_{\max}^+}{\lambda_{\min}^+} = \frac{f_{\max}^+}{f_{\min}^+} = \frac{D}{d} = \frac{1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \vartheta}{1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \vartheta}, \quad (8)$$

де  $\lambda_{\max}^+$ ,  $\lambda_{\min}^+$  - максимальна та мінімальна довжина хвилі робочої смуги, відповідно.

$$\lambda_{\max}^+ = \frac{4 \pi D [(1 - \operatorname{Sin} \alpha)]}{[(2 N + 1) \operatorname{Cos} \alpha]}; \quad (9)$$

$$\lambda_{\min}^+ = \frac{2 \pi d [(1 - \operatorname{Sin} \alpha)]}{[(2 N + 1) \operatorname{Cos} \alpha]}. \quad (10)$$

У рівняннях (8 – 10) індекс <sup>(+)</sup> вказує, що просторова конічна спіраль антени випромінює лише прямі хвилі (зворотні хвилі відсутні).

Ширину робочої смуги частот можна розрахувати за формулою:

$$\Delta F = f_{\max}^+ - f_{\min}^+, \quad (11)$$

де:  $f_{\min}^+ = \frac{c}{\lambda_{\max}^+}$ ,  $f_{\max}^+ = \frac{c}{\lambda_{\min}^+}$  – менша та більша частота смуги робочих частот, відповідно  $c$  – швидкість світла у вакуумі;

Деякі типи ДС, розраховані за допомогою рівняння (1) для резонуючих витків просторової конічної спіральної антени, наведені на рис. 2. Видно, що ДС різняться між собою не тільки за формою, але і за шириною та кількістю променів.

Випромінювальний елемент радіоантени, виконаний у вигляді нерегулярної просторової однозаходної дрової конічної спіралі, має такі характеристики та параметри:

- діаметр більшого витка спіралі  $D = 0,14$  м;

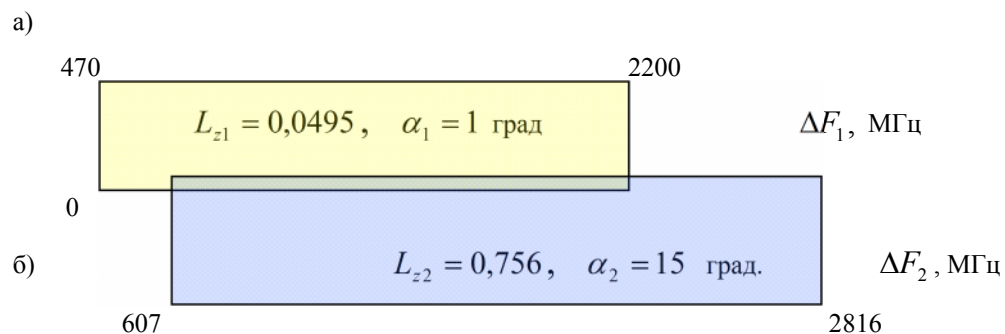
- менший діаметр витка  $d = 0,02$  м;

- кількість витків спіралі-випромінювача  $N = 7$ ;

- діапазон регулювання кута підйому навитих витків:  $\alpha_{\min} = 1^0$ ,  $\alpha_{\max} = 15^0$ ;

- діапазон регулювання довжини робочої поверхні періодичного випромінювача від  $L_{z1} = 0,0495$  м (для  $S_{\min} = 0,005$ м), до  $L_{z2} = 0,756$ м (для  $S_{\max} = 0,084$ м).

На рис. 3 наведена загальна ширина смуги робочих частот  $\Delta F_1$ , розрахована для довжини робочої поверхні випромінювача  $L_z = 0,0495$  м і  $\alpha = 1^0$ . Максимальна ширина смуги в цьому випадку складає:  $\Delta F_1 = 2200 - 470 = 1730$  МГц. Зі збільшенням довжини конічної спіралі до  $L_z = 0,756$  м (при  $\alpha = 15^0$ ) смуга робочих частот  $\Delta F_2$  переміщується в сторону високих частот, а ширина смуги становить  $\Delta F_2 = 2820 - 610 = 2210$  МГц



**Рисунок 3 – Ширина смуги робочих частот: конічна спіраль стиснута (а); конічна піраль розтягнута (б)**

Коефіцієнти перекриття робочих діапазонів спіральної антени по частоті фактично не змінюються, що відповідає відомим дослідженням. Так, для стиснутої спіралі ( $\alpha_{\min} = 1^0$ ) коефіцієнт перекриття діапазону по частоті складає  $K_H = 4,68$ , для розтягнутої ( $\alpha_{\max} = 15^0$ ) –  $K_H = 4,62$ .

Антенa може працювати у надширокій смузі робочих частот, а саме від 0,3 до 3,0 ГГц. Максимальні розміри антени з механізмом регулювання: діаметр антени з екраном 0,1 м, довжина  $L = 0,170$  м, вага  $P = 0,231$  кг.

Спосіб формування поля випромінювання в дальній зоні не потребує використання дорогого обладнання та значних коштів. Тому така антена є перспективною для нових та майбутніх радіотехнічних систем спеціального призначення.

Для антени цього класу використовують дуже просту та дешеву технологію виготовлення, яка дозволяє вже сьогодні розробляти спеціальні антени з потужністю від 100 мВт до 100 кВт. Антени ефективні, економічні, надійні, багатофункціональні і можуть використовуватися для здійснення навколосемного та космічного радіозв'язку. Такі антени можна застосовувати у будь-яких галузях, наприклад, у радіопристроях нового покоління, а саме: в сучасних та нових радіотехнічних системах технічного виявлення та захисту несанкціонованого витоку конфіденційної інформації з різних електронних-інформаційних джерел, у радіоапаратурі технічної та військової розвідки та радіоборотьби, радіостеження, радіоастрономії, радіонавігації, радіопеленгації, радіовимірювання, радіоастрономії тощо.

*Література:* 1. Kraus J. *Antennas*. 2-nd Ed. 1988. 892 p. 2. Fudjimoto K., James J. R. *Mobile Antenna Systems Handbook*. 2-nd Ed. 2001. 710 p. 3. Крушин А. Спіральні антени в сотових телефонах. «Інженерна мікроелектроніка». Україна. <http://chipnews.com.ua>. Березень, 2004 р. 4. Курбатов І. Ю., Міць Ю. К. Радіопеленгаційна антена UNF діапазону. Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні, вип.. 2 (13), 2006 р. С. 199–201. 5. Міць Ю. К., Курбатов І. Ю. Спіральна антена. Патент UA №20040705815. Бюл. №2, 15.02.200 р. 6. Рудольф Кюн «Микроволновые антенны». 7. Антенны сверхвысоких частот. Пер. с нем. В. И. Тарабарина и др., под ред. проф. М. П. Долуханова. – Л.: Судостроение, 1967, с. 424–464.