

УДК 621.396.677

С.М. Власік, Г.В. Єрмаков

*Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

## **ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДШИРОКОСМУГОВОЇ ДЗЕРКАЛЬНОЇ АНТЕНИ ІЗ СПРАЛЬНИМ КОНІЧНИМ ОПРОМІНЮВАЧЕМ У НАБЛИЖЕННІ ФІЗИЧНОЇ ОПТИКИ**

*Обґрунтовано конструкцію й проведено розрахунок просторових і часових характеристик надшироко-смугової (НШС) дзеркальної антени з опромінювачем у вигляді конічної спіралі. Визначено форму НШС сигналу при різному положенні точки спостереження. Відзначається, що антена має колову поляризацію й коефіцієнт перекриття 30. Розраховані часові залежності НШС сигналів у передній напівсфері дозволяють оцінити ефективність використання загороджувальних перешкод для блокування лінії керування вибуховими пристроями, а в задній півсфері - дати оцінку електромагнітної обстановки НШС РТС із іншими радіотехнічними засобами, включаючи засоби зв'язку.*

**Ключові слова:** *густина поверхневого струму, пікова діаграма спрямованості.*

### **Вступ**

Проведення натурних експериментів по визначенню характеристик спрямованості НШС антенних систем вимагає наявності відповідного радіолокаційного полігона й дорогого вимірювального встаткування. Використання зменшених моделей випромінюючих систем не завжди дозволяє одержати адекватні результати. Тому розрахункові методи визначення тимчасових і просторових характеристик короткоімпульсних антен у багатьох випадках мають першочергове значення.

Як відзначається в раніше опублікованих роботах [1, 2], для блокування радіолінії керування вибуховими пристроями (РКВП) доцільно використовувати крупноапертурну дзеркальну антену з опро-

мінювачем у вигляді конічної спіралі, що дає можливість випромінювання поля із круговою поляризацією. У силу невизначеності частоти, що використовується в РКВП, для її блокування пропонується використати загороджувальну заваду, ширина спектру якої становить  $100 \text{ МГц} \div 3 \text{ ГГц}$ , діаметр дзеркальної антени  $d = 1,5 \text{ м}$ .

З огляду на той факт, що розміри короткоімпульсної дзеркальної антени в більшій частині досліджуваного діапазону є більшими в порівнянні з робочими довжинами хвиль ( $\lambda = 3,0 \div 0,1 \text{ м}$ ), для розрахунку густини поверхневого струму й надалі її часових і просторових характеристик доцільно використати метод уточнення наближення фізичної оптики [3]. На користь обраного методу говорить той факт, що, як показали експериментальні дослідження, на-

ближення фізичної оптики дає гарні результати також у резонансному й релеєвському діапазонах [4]. Тому метою даної статті є визначення часових і просторових характеристик НШС дзеркальної антени зі спіральним конічним опромінювачем з використанням методу наближення фізичної оптики.

### Основна частина

У загальному випадку під просторово-часовою характеристикою (ПЧХ) антени  $\vec{E}(\omega, \Theta, \phi)$  будемо розуміти залежність напруженості випромінюваного поля від частоти й кутових координат при видаленні точки спостереження (у вільному просторі) у нескінченність.

Фур'є-перетворення від ПЧХ описує просторово-часову характеристику, під якою розуміється залежність напруженості випроміненого поля від часу й кутових координат при видаленні точки спостереження (у вільному просторі) у нескінченність:

$$\vec{E}(t, \Theta, \phi) = \frac{1}{2\pi\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}(\omega, \Theta, \phi) \exp(-j\omega t') d\omega,$$

де  $t' = t - r/c$  – час запізнення,  $r$  – відстань до точки спостереження,  $c$  – швидкість світла.

Під діаграмою спрямованості (ДС) НШС дзеркальної антени будемо розуміти пікову ДС по амплітуді, тобто залежність максимального значення випроміненого поля від кутових координат  $E_{\max}(t, \Theta, \phi)$ , що визначають положення точки спостереження.

Відзначимо відразу, що мова йде про визначення інтегральних характеристик випромінювання, при яких помилки, що виникають при проведенні розрахунків чисельними методами, усереднюються й одержувана точність лежить у межах, обмежених неврахуванням взаємного впливу опромінювача й рефлектора.

**Постановка задачі.** Розглядається випадок збудження дзеркальної антени за допомогою опромінювача у вигляді конічної спіралі гаусовим відеоімпульсом струму одиничної амплітуди й тривалістю  $\tau_i = 0,5$  нс (просторова тривалість НШС сигналу  $\sigma_{\tau_i} = 15$  см); взаємний вплив опромінювача й дзеркальної антени не враховується; діаметр антени – 1,5 м, фокусна відстань – 1 м.

Форма імпульсу струму, що збуджує опромінювач, описується залежністю:

$$I(t) = A \exp(-t/2\tau_i)^2,$$

де  $A$  – амплітуда імпульсу,  $t$  – час, відлічуваний з моменту збудження,  $\tau_i$  – тривалість імпульсу за рівнем 0,5.

Спектр сигналу, нормований до максимального значення, описується залежністю:

$$I(\omega) = \sqrt{2\pi} A \tau_i \exp(-\omega^2 \tau_i^2 / 2).$$

З огляду на те, що дзеркальна антена являє собою абсолютно провідне тіло, рівняння Стретона-Чу для розглянутого випадку може бути представлене у вигляді:

$$\vec{H}(\vec{M}, \omega) = \vec{H}^i(\vec{M}, \omega) + \frac{1}{4\pi} \iint_{S'} \left\{ \text{grad}_P \frac{\exp(-jk(\omega)r_{MP})}{r_{MP}} \times \vec{J}(\vec{P}, \omega) \right\} dS, \quad (1)$$

де  $\vec{H}^i(\vec{M}, \omega)$  – напруженість магнітного поля, створеного джерелом у поверхні дзеркальної антени,  $k$  – хвильове число,  $\vec{J}$  – вектор густини поверхневого струму,  $M$  і  $P$  – точки спостереження й інтегрування відповідно.

Інтегральне уявлення тангенціальної складової магнітного поля на освітленій частині поверхні дзеркала можна представити у вигляді [5]:

$$\begin{aligned} \left[ \vec{H}_\tau(\vec{P}_0, \omega) \right]^+ &= \left[ \vec{H}_\tau^i(\vec{P}_0, \omega) \right] - \\ &- \frac{1}{2\pi} \iint_S \left\{ \vec{n}_{P_0}^e \times \left[ \vec{K}(\vec{P}, \omega) \times \text{grad}_P \frac{\exp(-jk(\omega)r_{PP_0})}{r_{PP_0}} \right] \right\} dS + \\ &+ \frac{1}{2} \vec{K}(\vec{P}_0, \omega), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\vec{K} = \vec{H}_\tau^+ - \vec{H}_\tau^- = \vec{J}_S^+ - \vec{J}_S^-$  – густина поверхневого струму на поверхні  $S$ ;  $\vec{H}_\tau^+$ ,  $\vec{H}_\tau^-$  – тангенціальна компонента напруженості магнітного поля із внутрішньої (освітленої) і зовнішньої (тіньової) сторони поверхні;  $\vec{J}_S^+$ ,  $\vec{J}_S^-$  – густина поверхневого струму на внутрішній і зовнішній сторонах розсіювача;  $\vec{n}_{P_0}^e$  – зовнішня нормаль;

$$r_{PP_0} = \sqrt{x_P - x_{P_0}}^2 + y_P - y_{P_0}}^2 + z_P - z_{P_0}}^2.$$

Вираз (2) містить дві невідомі густини струму  $\vec{J}_S^+$  й  $\vec{J}_S^-$ , для визначення яких можна скористатися методом уточнення наближення фізичної оптики. Спочатку, використовуючи наближення фізичної оптики, визначається густина поверхневого струму на освітленій поверхні  $\vec{J}_S^+$ , що збуджується чотирма диполями, два з яких розташовані вертикально і два горизонтально на одному витку спіралі:

$$\begin{aligned} \vec{J}_S^0(\vec{P}_0, \omega) &= \vec{J}_S^+(\vec{P}_0, \omega) = \\ &= 2 \vec{n}_{P_0}^e \times \vec{H}_y^i(\vec{P}, \omega) + 2 \vec{n}_{P_0}^e \times \vec{H}_x^i(\vec{P}, \omega), \end{aligned} \quad (3)$$

де

$$\vec{H}_y^i(\vec{P}, \omega) = \vec{e}_y \frac{I(\omega) l_{\text{виг}} k^2 \exp(-jkr)}{4\pi} \left( \frac{j}{kr} + \frac{1}{kr^2} \right) \sin \Theta -$$

напряженність магнитного поля возле зеркальной антенны, создаваемая вертикально ориентированным диполем;

$$\vec{H}_x^i P, \omega = \vec{e}_x \frac{I \omega l_{\text{виб}} k^2 \exp(-jk r)}{4\pi} \left( \frac{j}{kr} + \frac{1}{kr^2} \right) \cos \Theta -$$

напряженність магнитного поля возле зеркальной антенны, создаваемая горизонтально ориентированным диполем;  $r$  – расстояние от соответствующего диполя, расположенного в фокальной плоскости до точки наблюдения на зеркальной антенне;  $l_{\text{виб}}$  – длина джерела.

Після знаходження  $\vec{J}_S^+ P_0, \omega$  відповідно до (3), для визначення густини поверхневого струму на тінювій поверхні  $\vec{J}_S^-$  вирішується рівняння Фока з уточненою правою частиною:

$$\begin{aligned} & \vec{J}_S^- P_0, \omega - \frac{1}{2\pi} \int_S \vec{n}^e P_0 \times \\ & \times \left[ \vec{J}_S^- P, \omega \times \text{grad}_p \frac{\exp -jk(\omega)r_{pp_0}}{r_{pp_0}} \right] dS = \\ & = 2\vec{J}_S^0 P_0, \omega - \vec{J}_S^+ P_0, \omega - \frac{1}{2\pi} \int_S \vec{n}^e P_0 \times \\ & \times \left[ \vec{J}_S^+ P, \omega \times \text{grad}_p \frac{\exp -jk(\omega)r_{pp_0}}{r_{pp_0}} \right] dS. \end{aligned} \quad (4)$$

На наступному етапі при рішенні (2) уточнюється  $\vec{J}_S^+$  за умови, що  $\vec{J}_S^-$  – відома величина.

Далі визначається стрибок струму:

$$\vec{K} P_0, \omega = \vec{J}_S^+ P_0, \omega - \vec{J}_S^- P_0, \omega. \quad (5)$$

Таким чином, задача знаходження розподілу щільності поверхневого струму зводиться до ітераційного процесу, на кожному етапі якого вирішується інтегральне рівняння Фока щодо поверхневої густини струму на освітленій або на тінювій стороні дзеркала.

Для визначення параметрів НШС сигналу (тривалість, крутість фронтів) був проведений ряд розрахунків відповідно до алгоритму, наведеному вище. Форма НШС сигналу, випроміненого дзеркальною короткоімпульсною антенною в різних напрямках у передній напівсфері, представлена на рис. 1 – 3.

Розрахунки показали, що при зміні просторових координат точки спостереження в межах головної пелюстки ДС, форма випроміненого імпульсу практично не змінюється: значно міняється лише абсолютне значення негативного піка. Ширина пікової ДС по полю становить  $15^\circ$ , КНД – порядку 120, рівень бічного фону – 20 дБ.

При значному відхиленні від напрямку головного максимуму форма випромінюваного сигналу

перетерплює більш істотні зміни: вирівнюються значення позитивного й негативного піків, передній і задній фронти випромінюваного сигналу стають більш пологими (рис. 2).

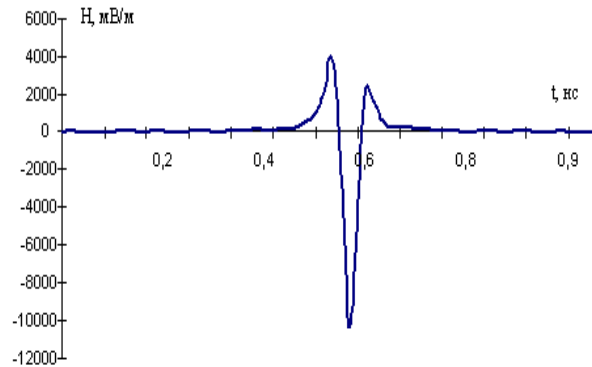


Рис. 1. Форма НШС сигналу в напрямку головного максимуму

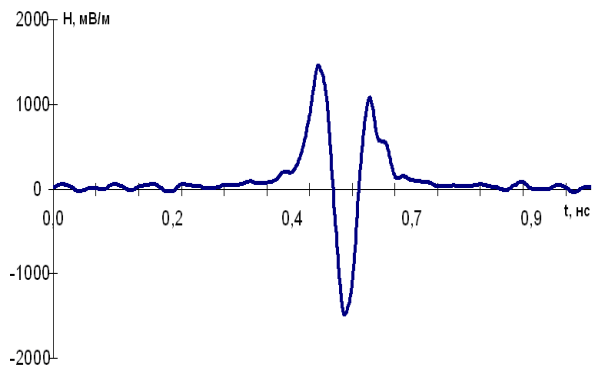


Рис. 2. Форма НШС сигналу в напрямку  $\Theta = 20^\circ$

При подальшому відхиленні випромінюваного НШС сигналу від напрямку головного максимуму пікової ДС спостерігаються більш істотні зміни часової структури імпульсу (рис. 3).

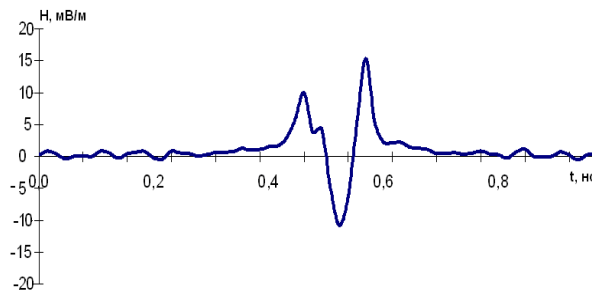


Рис. 3. Форма НШС сигналу в напрямку  $\Theta = 70^\circ$

Відзначимо, що при наступному збільшенні кута місця, аж до  $\Theta = 90^\circ$ , зміна форми випромінюваного сигналу практично не відбувається.

Описані ефекти можна пояснити, якщо представити передавальну антенну у вигляді просторово-часового фільтра з відповідною комплексної ПЧХ:

$$\dot{V} \omega, \Theta, \phi = \frac{1}{r\sqrt{\pi}} \sqrt{D_{\text{max}}} \dot{f} \omega, \Theta, \phi \exp -jkr, \quad (6)$$

де  $D_{\max} \omega, \Theta=0, \phi=0$  – коефіцієнт спрямованої дії (КСД) антени на частоті  $\omega$  в напрямку головного максимуму;  $\hat{f} \omega, \Theta, \phi$  – комплексна ДС по полю на частоті  $\omega$ .

Антену можна розглядати як лінійну систему, у якої входною величиною є  $\delta$ -імпульс струму, а вихідний – електричне поле в обраній точці простору. Тоді розрахункові співвідношення для визначення просторової амплітудної частотної характеристики (ПАЧХ) дзеркальної антени, будуть мати вигляд:

$$|\dot{V} \omega, \Theta, \phi| = \frac{1}{R\sqrt{\pi}} \sqrt{D_{\max} \omega} F \omega, \Theta, \phi,$$

де  $F \omega, \Theta, \phi$  – нормована ДС.

На рис. 4 представлено сімейство нормованих ПАЧХ дзеркальної антени, розрахованих для складової  $E_{\Theta}$  поля в далекій зоні при різних кутах  $\Theta$  (1 –  $\Theta=0^{\circ}$ , 2 –  $\Theta=10^{\circ}$ , 3 –  $\Theta=70^{\circ}$ ) і  $\phi=0^{\circ}$ .

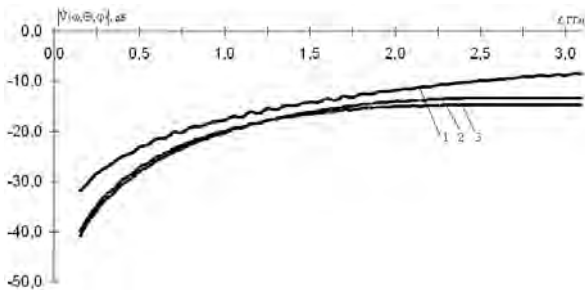


Рис. 4. ПАЧХ дзеркальної антени

При видаленні крапки спостереження від напрямку головного максимуму ДС змінюються лінійні розміри апертури ("світить проекція" на напрямок випромінювання). Це приводить до того, що низькочастотні складові перетерплюють сильне ослаблення ( $L/\lambda \ll 1$ ) і "погано" випромінюються. У цьому випадку зменшуються значення позитивного й негативного піків, що приводить до зменшення енергії випроміненого імпульсу. Основний внесок у формоване поле дають високочастотні складові НШС сигналу, які у свою чергу характеризують поведінку переднього й заднього фронтів часової залежності електромагнітного поля. Крім цього, при збільшенні діаметра апертури й зменшенні тривалості НШС сигналу спостерігалася звуження головної пелюстки пікової ДС по полю (до  $5^{\circ}$  при  $\tau_{\text{ш}} = 0,1 \text{ нс}$ ), збільшення КСД до 140, рівень бічного тла залишався незмінним.

КСД НШС антен відрізняється від класичного визначення КСД - це відношення потоку потужності, що пройшла через одиничну площадку, перпендикулярну напрямку, у якому ДС має глобальний максимум, за час, рівний тривалості сигналу в точці спостереження, до потоку потужності, що пройшла через одиничну площадку при випромінюванні тієї ж енергії рівномірно у всіх напрямках:

$$D_{\max} \Theta=0, \phi=0 = \frac{\epsilon_a \mu_a}{\pi} \frac{\left[ \int_S H_0(x, y) dS \right]^2}{\int_S H_0^2(x, y) dS} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 |S \omega|^2 d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |S \omega|^2 d\omega}, \quad (7)$$

де  $H_0(x, y)$  – функція розподілу амплітуди напруженості магнітного поля на поверхні антени.

З (7) видно, що КСД НШС антени залежить від розподілу поля на поверхні антени, характеру частотного спектра або від форми сигналу і його тривалості. На рис. 5 представлена пікова ДС по полю НШС дзеркальної антени, визначення якої було дано вище.



Рис. 5. Пікова ДС по полю дзеркальної антени (діаметр 1,5 м, фокусна відстань 1 м)

Амплітуда імпульсу, обумовлена далеким бічним випромінюванням короткоімпульсної дзеркальної антени, досить мала в порівнянні з напрямками, що відповідають головній пелюстці пікової ДС.

Однак, як витікає з тактичного обґрунтування застосування НШС РТС блокування РКВП, дані щодо далекого бічного й заднього випромінювання можуть бути використані при розрахунку електромагнітної сумісності НШС РТС й інших радіотехнічних засобів.

На рис. 6 – 10 представлена форма імпульсу для різних кутів місця точки спостереження при нульовому куті місця в задній напівсфері. З урахуванням того, що дзеркальна антена є вісесиметричною конструкцією, треба думати, що ситуація не зміниться, якщо зафіксувати кут місця й змінювати азимут об'єкта спостереження.

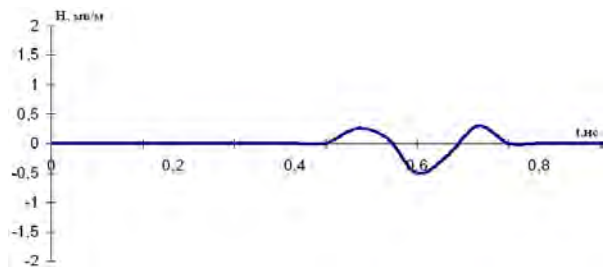


Рис. 6. Форма випроміненого НШС сигналу для  $\Theta = 90^{\circ}$

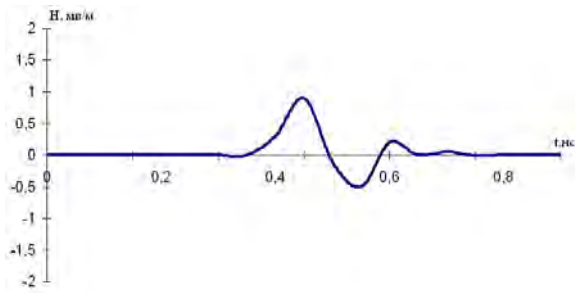


Рис. 7. Форма випромененого НШС сигналу для  $\Theta = 120^{\circ}$

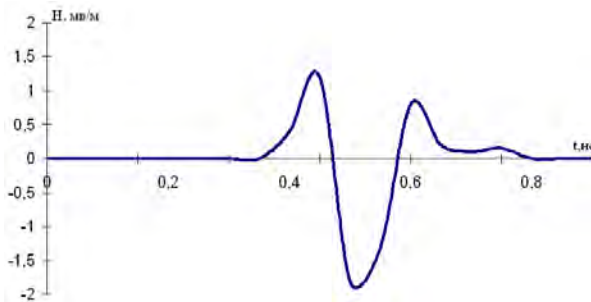


Рис. 8. Форма випромененого НШС сигналу для  $\Theta = 150^{\circ}$

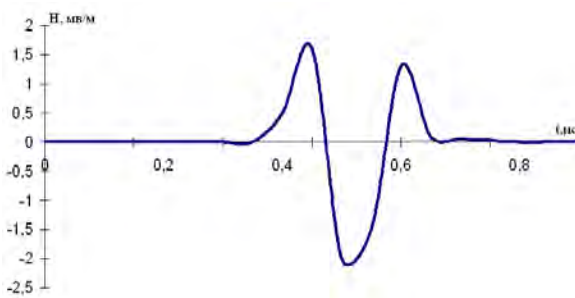


Рис. 9. Форма випромененого НШС сигналу для  $\Theta = 180^{\circ}$

## Висновки

Таким чином, розраховані часові залежності НШС сигналів у передній напівсфері дозволяють оцінити ефективність використання загороджувальних завад для РКВП, а в задній напівсфері – дати оцінку електромагнітної обстановки НШС РТС із іншими радіотехнічними засобами, включаючи засоби зв'язку.

## Список літератури

1. Власик С.Н. Оценка возможностей применения сверхширокополосных сигналов для блокирования радиоуправляемых взрывных устройств / С.Н. Власик // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІНУ, 2009. – Вип. 3(11). – С. 41-44.

2. Ермаков Г.В. Оценка энергетических и пространственных характеристик сверхширокополосной РТС для постановки заградительных помех / Г.В. Ермаков, С.Н. Власик // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2009. – Вип. 6(80). – С. 43-48.

3. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Миттры. – М.: Мир, 1977. – 485 с.

4. Варганов М.Е. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / М.Е. Варганов, Ю.С. Зиновьев, Л.Ю. Астанин и др.; под ред. Л.Т. Тучкова. – М.: Радио и связь, 1985. – 236 с.

5. Ермаков Г.В. Электродинамический метод расчета пространственно-временных характеристик сверхширокополосных антенных решеток с учетом взаимного влияния элементов / Г.В. Ермаков, О.Л. Смирнов, Д.М. Литовченко, М.Г. Иванец // Системи обробки інформації. – 2007. – № 1(59) – С. 36-39.

Надійшла до редколегії 11.11.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.І. Обод, Національний технічний університет "ХПІ", Харків.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ СО СПИРАЛЬНЫМ КОНИЧЕСКИМ ОБЛУЧАТЕЛЕМ В ПРИБЛИЖЕНИИ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

С.Н. Власик, Г.В. Ермаков

Обоснована конструкция и проведен расчет пространственных и временных характеристик сверхширокополосной (СШП) зеркальной антенны с облучателем в виде конической спирали. Определена форма СШП сигнала при различном положении точки наблюдения. Отмечается, что антенна имеет круговую поляризацию и коэффициент перекрытия 30. Рассчитанные временные зависимости СШП сигналов в передней полусфере позволяют оценить эффективность использования заградительных помех для радиолиний управления взрывными устройствами, а в задней полусфере – дать оценку электромагнитной обстановки СШП РТС с другими радиотехническими средствами, включая средства связи.

**Ключевые слова:** плотность поверхностного тока, пиковая диаграмма направленности.

## DETERMINATION OF THE ULTRAWIDEBAND MIRROR ANTENNE WITH SPIRAL CONICAL IRRADIATOR TEMPORAL DESCRIPTIONS IN APPROACHING OF PHYSICAL OPTICS

S.N. Vlasik, G.V. Yermakov

A construction is grounded and the calculation of spatial and temporal characteristics of ultrawideband (UWB) mirror antenna with an irradiator as a conical spiral is conducted. The form of UWB signal is certain at different position of view point. It is marked that antennal has circular polarization and ceiling coefficient 30. The expected temporal dependences of UWB signals in a front semi-sphere allow to estimate efficiency of the barrage handicaps use for radioline of management explosive devices, and in a back semi-sphere – to give the estimation of electromagnetic situation of UWB RTS with other radio engineering facilities, including communication means.

**Keywords:** density of current surface, peak pattern.