

УДК 621.396.96:004.94. 621.3.62-1. 517.958:537.8

Владимир Алексеевич ДОРОШЕНКО,
*доктор физико-математических наук, профессор, декан
факультета прикладной математики и менеджмента
Харьковского национального университета радиоэлектроники*

Николай Иванович ЛЫСЫЙ,
*доктор технических наук, доцент, начальник отдела –
старший научный сотрудник отдела исследования проблем
инженерно-технического развития и логистики
Научно-исследовательского института Государственной
пограничной службы Украины, г. Хмельницкий*

Александр Евгеньевич СТРЕЛЬНИЦКИЙ,
*кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры основ
радиотехники Харьковского национального
университета радиоэлектроники*

Александр Александрович СТРЕЛЬНИЦКИЙ,
аспирант Харьковского национального университета радиоэлектроники

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОНИЧЕСКОЙ ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ ДОППЛЕРОВСКОГО СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДАТЧИКА ОХРАНЫ ЛОКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

В статье представлены результаты экспериментальных исследований и математического моделирования конической антенны с про-

© Дорошенко В. О., Лысый Н. И., Стрельницкий А. Е., Стрельницкий А. А.

дольной щелью, позволяющей формировать диаграмму направленности, которая имеет форму кардиоиды, что может быть использовано для построения доплеровского СВЧ датчика охраны блок-постов, позиций наблюдения и других локальных объектов.

Ключевые слова: конусная антенна, СВЧ датчик, кардиоидная диаграмма направленности.

Постановка проблемы в общем виде. Создание средства охраны локальных объектов, эксплуатация которого не требует установки на местности распределенного чувствительного элемента (сигнализационных средств обрывного типа), размещения нескольких отдельных датчиков (сейсмолокатора, радиолучевой системы), позволяющих определить направление на движущуюся цель, актуально, особенно для таких объектов, как блокпост, пост наблюдения. Доплеровская радиолокационная станция вполне справится с указанными общими требованиями, но массогабаритные свойства вряд ли удовлетворят персонал, несущий службу по охране объекта. Упрощение конструкции радиолокационной станции и, в первую очередь применение щелевой конической антенны с кардиоидной диаграммой направленности позволит создать небольшой доплеровский СВЧ датчик охраны локальных объектов.

Целью публикации есть исследование щелевой конической антенны с кардиоидной диаграммой направленности, а также обобщение требований к СВЧ датчику охраны объектов, обеспечивающему определение направления на нарушителя охраняемой зоны.

Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опираются авторы. Обнаружение нарушителя с использованием радиолокационного способа и формирования кардиоидной диаграммы направленности рассмотрено в [1]. При этом обеспечивается определение направления движения объекта-нарушителя охраняемой зоны. Недостатком технического решения является невозможность определения курса или азимута на нарушителя.

Прототипом перспективного СВЧ датчика можно считать радар-датчики американской компании Perimeter Products, Inc., предназначен-

ные для быстроразворачиваемых систем охраны объектов в полевых условиях. В качестве однопозиционных или двухпозиционных датчиков используются различные модификации приборов серии ТМПС-21 (рис. 1).



Рис. 1. Однопозиционный радар-датчик типа ТМПС-21200

Датчики изготавливаются в унифицированных корпусах, питаются от встроенных аккумуляторных батарей, работающих без перезарядки в течение примерно 30 часов. Однопозиционный датчик типа ТМПС-21200 представляет собой радар-сенсор, который располагают в центре охраняемой зоны. Антенна датчика формирует чувствительную зону в виде цилиндра радиусом до 48 м. В варианте ТМПС-21300 однопозиционный датчик имеет полусферическую диаграмму чувствительности. Радиус чувствительной полусферы регулируется в пределах от 22 до 78 м. Датчик генерирует сигнал тревоги по заданному алгоритму, реагируя только на вход в охраняемую зону, только на выход из нее или на оба действия нарушителя. В описанных конструкциях датчиков используется обычная коническая антенна, которая не позволяет определить направление на цель [2].

Проектирование и создание широкополосных (ШП) и сверхширокополосных (СШП) антенн с управляемой диаграммой направленности являются одними из актуальных задач современной техники антенн. Антенны и радиолокационные отражатели с характерными угловыми параметрами обладают широкополосными и сверхширокополосными свойствами [3, 4]. К последним относятся кониче-

ские антенны и уголкового отражатели, которые получили широкое применение в технике связи, космических исследованиях, радиолокации и телеметрии.

Сплошные изотропные конические антенны относятся к классу ненаправленных антенн и имеют, как правило, круговую диаграмму направленности (ДН). Наличие зон максимальной направленности и провала в ДН ШП или СШП антенны значительно повышает уровень ее практического применения. Например, ШП и СШП антенны с ДН в виде кардиоиды могут использоваться как для передачи, так и для обнаружения скрытых источников излучения, а также мониторинга эфира. Поэтому актуальным является изучение свойств ШП и СШП антенн с управляемой ДН, частными случаями которой есть кардиоиды [4].

Изложение основного материала исследования. Требуется исследовать свойства конической антенны с прорезанной от вершины и вдоль образующей продольной щелью, ДН которой и является кардиообразной. Ширина щели d является угловой величиной, равной величине двугранного угла, который образован плоскостями, проведенными через ось конуса и кромки щели.

Круговая в сечении коническая антенна (рис. 2) с длиной образующей, равной 100 мм, изготовлена из меди с углом раскрытия 2γ . Источник возбуждения рассматриваемой конической антенны представляет собой плоский кольцевой магнитный ток. Следует произвести измерение пространственного распределения поля в азимутальной плоскости и построить диаграмму направленности антенны.



Рис. 2. Конусная антенна с продольной щелью

Теоретическое изучение свойств конической антенны базируется на исследовании модельной задачи возбуждения монохроматическим магнитным радиальным диполем (модель рамки с током) идеально проводящего полубесконечного кругового конуса с продольной щелью (рис. 3).

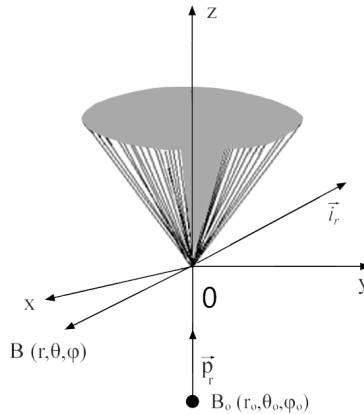


Рис. 3. Конус с продольной щелью для математической модели

Поскольку медь, из которой изготовлен экспериментальный образец, является достаточно хорошим проводником, в математической модели использованы краевые условия, которые описывают поверхностные свойства проводника с высокой степенью проводимости [5]. Источник электромагнитного поля находится вне и на оси конуса. Известно, что при таком способе возбуждения и длине образующей конечного конуса, превышающей три длины волны падающего поля (поля диполя), результаты, полученные при исследовании модельной электродинамической задачи для полубесконечного конуса, могут быть использованы для анализа пространственного распределения поля в случае возбуждения конечного конуса [6]. Модельная краевая электродинамическая задача для полубесконечного кругового идеально проводящего конуса заключается в нахождении поля \vec{E} и \vec{H} , которое вне конуса и источника удовлетворяет:

уравнения Максвелла вне конуса и источника;
 краевые условия на поверхности идеально проводящего конуса

$$\vec{n} \times \vec{E}^+ = \vec{n} \times \vec{E}^- = 0,$$

где $\vec{E}^\pm = \vec{E}|_{\theta=\gamma_s \pm 0}$;

условия на бесконечности;

условия ограниченности энергии.

В качестве источника возбуждения конусной антенны (рис. 2) используется плоский кольцевой магнитный ток, который охватывает металлический штырь длиной более 3λ . В соответствии с теоремой взаимности поле такого кольцевого магнитного тока эквивалентно полю подобного штыря, расположенного над экранирующей поверхностью (рис. 4) [7].

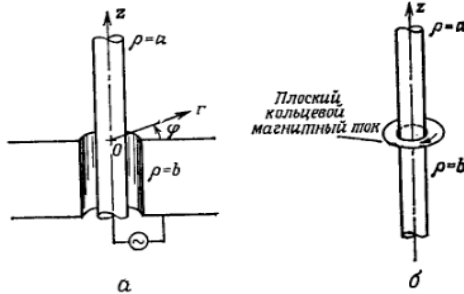


Рис. 4. Возбуждение штыря:

a – на заземленной плоскости коаксиальной линией; *б* – кольцевым магнитным током

Для определения влияния продольной щели на ДН сначала была получена диаграмма пространственного распределения поля для сплошного конуса (рис. 5, а), который возбуждается вышеописанным источником.

Экспериментальная установка по исследованию конусной антенны (рис. 4б) представляет собой металлический экран с установленным на нем коаксиальным приборным разъемом, через который производится запитка антенны. Конусная антенна устанавливается над

экраном с помощью двух дополнительных деталей. Экспериментальные исследования по измерению ДН конусной антенны проводились в безэховой камере (рис. 6).

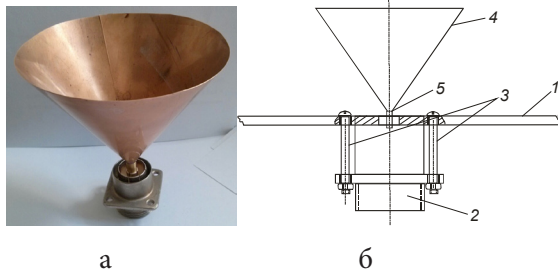


Рис. 5. Конусная антенна на коаксиальном разъеме (а), (б) – эскиз экспериментального макета по измерению параметров конусной антенны: 1 – металлический экран, 2 – коаксиальный разъем, 3 – винты крепления разъема к экрану, 4 – конусная антенна, 5 – латунный штырь, соединяющий конусную антенну с коаксиальным разъемом

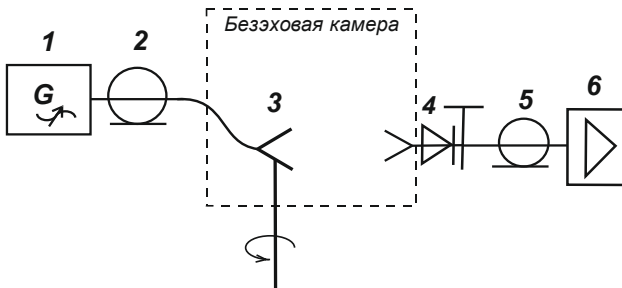


Рис. 6. Структурная схема измерения ДН конусной антенны:

- 1 – генератор СВЧ; 2 – соединительный коаксиальный кабель; 3 – конусная антенна на поворотном столе; 4 – приемный рупор с детекторной секцией;
- 5 – коаксиально-волноводный переход; 6 – селективный усилитель

Также производились измерения коэффициента стоячей волны (КСВ), характеризующий степень согласованности питающего фидера (рис. 4, а, б) с конусной антенной. Схема измерения КСВ антенны приведена на рис. 7.

Для идеально проводящего сплошного конуса ДН является круговой. Деформация ДН (рис. 8, а) обусловлена наличием паянного шва для азимутального угла в 180° (антенна изготавливалась методом пайки из развертки конуса). Это факт может быть использован для диагностики наличия продольных трещин на поверхности конусной антенны. По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что в рабочем диапазоне антенн 8,7-10 ГГц значение КСВ находится в пределах 2 ± 0.5 .

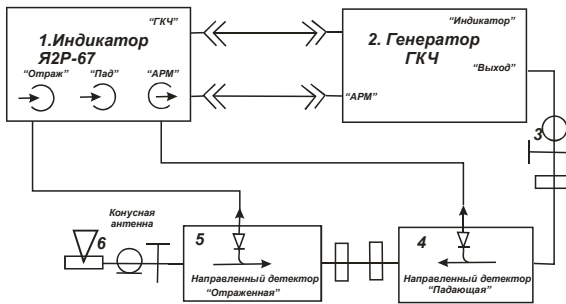


Рис. 7. Структурная схема измерения КСВ конусной антенны

На рис. 8 приведены результаты экспериментальных измерений ДН сплошной конусной антенны (рис. 8, а) и КСВ (рис. 8, б).

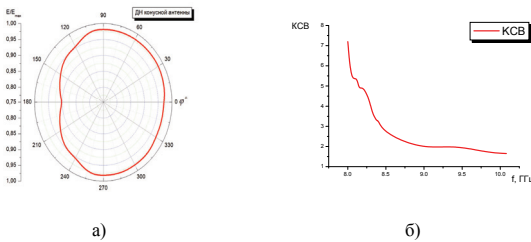


Рис. 8. ДН сплошной конусной антенны (а); КСВ сплошной конусной антенны (б)

С целью изучения влияния щели на ДН в вышеописанную схему эксперимента вместо сплошного конуса установлен конус с продольной щелью с тем же самым углом раскрытия и длиной образующей. На

рис. 9 приведена имеющая форму кардиоиды ДН для конуса с продольной щелью ($d = 10^\circ$).

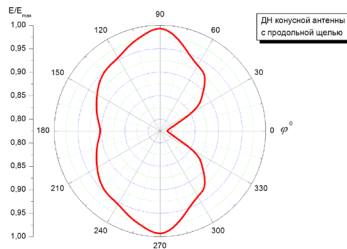


Рис. 9. Диаграмма направленности конусной антенны с продольной щелью

Азимут середины щели соответствует минимум ДН (рис. 9). Факт наличия “мёртвой зоны” (провала) в диаграмме тактически может быть использован, в частности, для определения направления движения объекта через пограничный рубеж, при обнаружении скрытых объектов, выборе безопасной зоны оператора, для измерения угловых отклонений и угловых координат с помощью метода равносигнальной зоны [8, 9].

Математическое моделирование. Для решения краевой электродинамической задачи используется строгий подход, сочетающий в себе метод интегральных преобразований Конторовича–Лебедева и метод задачи Римана–Гильберта [10].

В области пространства уходящих и отраженных от вершины конуса волн ($\theta > 2\gamma$) пространственное распределение составляющих магнитного рассеянного конусом поля рассчитывается по таким формулам:

$$H_\theta^* = \frac{e^{-qr}}{r} F_\theta(\theta, \varphi, \gamma, d), \quad (1)$$

$$F_\theta(\theta, \varphi, \gamma, d) = B \int_0^{+\infty} \tau \theta \pi \tau K_{it}(qr_0) \frac{d}{d\gamma} P_{-1/2+it}(\cos \gamma) \times \\ \times \left(2 \sum_{n=1}^{+\infty} x_n(\tau) \frac{d}{d\theta} \frac{P_{-1/2+it}^{-n}(-\cos \theta)}{d\gamma} \cos n\varphi + x_0(\tau) \frac{P_{-1/2+it}^{-1}(-\cos \theta)}{P_{-1/2+it}^{-1}(-\cos \gamma)} \right) d\tau,$$

$$H_{\varphi}^* = \frac{e^{-qr}}{r} F_{\varphi}(\theta, \varphi, \gamma, d), \tag{2}$$

$$F_{\varphi}(\theta, \varphi, \gamma, d) = D \frac{1}{\sin \theta} \int_0^{+\infty} \tau \theta \pi \tau K_{it}(qr_0) \times \\ \times \frac{d}{d\gamma} P_{-1/2+it}(\cos \gamma) \sum_{n=1}^{+\infty} x_n(\tau) \frac{P_{-1/2+it}^{-n}(-\cos \theta)}{\frac{d}{d\gamma} P_{-1/2+it}^{-n}(-\cos \gamma)} n \sin n\varphi d\tau,$$

где $K_{it}(qr_0)$ – функция Макдональда, $P_{-1/2+it}(\cos \alpha)$ – функция Лежандра, B, D – известные, а x_n неизвестные коэффициенты, которые удовлетворяют бесконечную систему линейных алгебраических уравнений.

$$x_0 \left\{ -A_{it} + \ln \frac{1-u}{2} \right\} + \sum_{p=1}^{+\infty} x_p \frac{\varepsilon_p}{p} [P_p(u) + P_{p-1}(u)] = \ln \frac{1-u}{2}, \\ x_0 [P_n(u) + P_{n-1}(u)] + 2 \sum_{p=1}^{+\infty} x_p \varepsilon_p [V_{n-1}^{p-1}(u) + V_{-n-1}^{p-1}(u)] - 2x_n = \\ = P_n(u) + P_{n-1}(u), n \uparrow 0.$$

где $A_{it}, \varepsilon_p, V_{n-1}^{p-1}(u)$ – известные, $P_v^m(\cos \alpha)$ – присоединенные функции Лежандра 1-го рода.

По формулам (1), (2) были рассчитаны пространственные распределения магнитного поля. На рис. 9 приведена нормированная диаграмма распределения магнитного поля в азимутальной (поперечной) плоскости для ширины щели $d = 10^\circ$. Сравнение расчетных диаграмм распределения поля (рис. 10) с измеренными ДН (рис. 9) показывает соответствие этих диаграмм по форме и значениям.

Тенденцию деформации диаграммы распределения поля при изменении ширины щели можно отследить по рис 11. С расширением щели “провал” постепенно исчезает, а сама диаграмма приобретает форму эллипса.

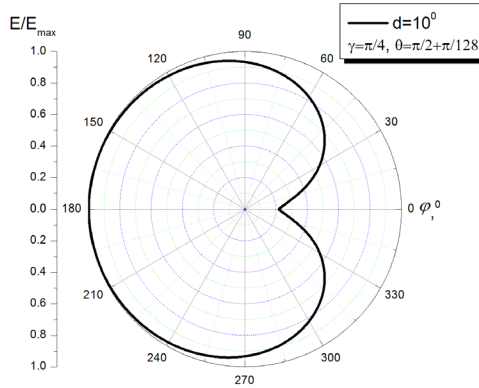


Рис. 10. Расчётная диаграмма распределения поля при $d = 10^\circ$, $\gamma = 45^\circ$, $\theta \approx 92^\circ$

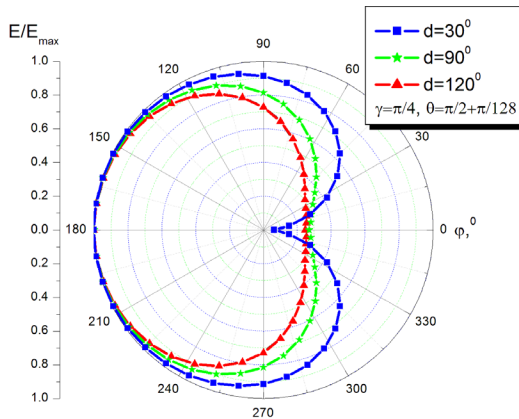


Рис 11. Нормированные диаграммы пространственного распределения поля при разной ширине щели ($d = 30^\circ$, 90° , 120° , $\gamma = 45^\circ$, $\theta \approx 92^\circ$)

Зависимость формы диаграммы пространственного распределения поля от геометрических параметров конической структуры (рис. 10) вызывает интерес при решении задач мониторинга пространства при использовании в СВЧ датчиках [8].

Перспективами дальнейших научных исследований есть разработка доплеровского СВЧ датчика охраны локальных объектов, предназначенного для обнаружения и определения направления на движущийся объект. В качестве объекта обнаружения может быть человек, группа людей. Структурная схема датчика представлена на рис. 12.

Особенностью управления датчиком должна быть возможность применения радиоканала для связи между аппаратурой пользователя и внешнего размещения. Также блок управления и индикации должен быть упрощенной конструкции, с минимумом органов управления, каждый из которых предназначен для выполнения одной функции, а индикация направления может быть светодиодной или цифровой. Перспективным направлением применения датчика может быть охрана позиций, постов наблюдения, блокпостов (рис. 13).

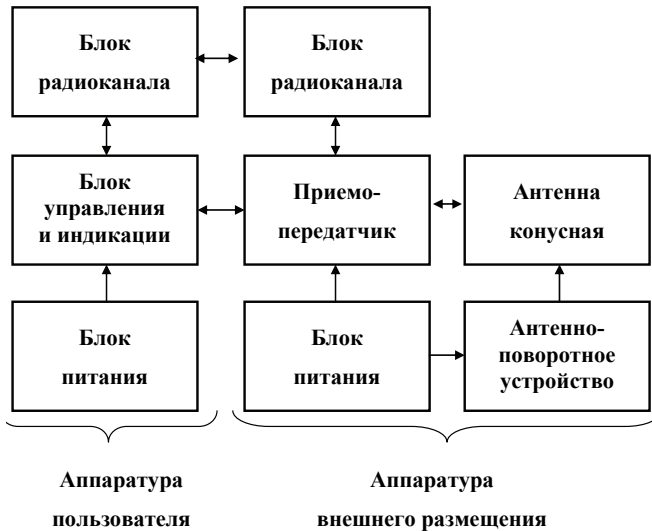


Рис. 12. Структурная схема доплеровского СВЧ датчика охраны локальных объектов

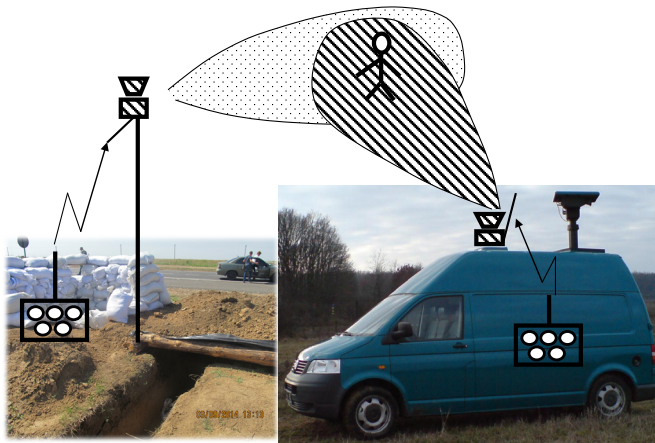


Рис. 13. Способы применения датчика

В общем тактико-технические требования к датчику можно выдвинуть следующие:

- дальность обнаружения до 100 м;
- выявление и определение направления объектов, которые движутся со скоростью 0,5–10 км/ч;
- расстояние передачи данных по радиоканалу до 10 м;
- время непрерывной работы 10 ч;
- масса аппаратуры пользователя до 1 кг;
- масса аппаратуры наружного размещения до 5 кг;
- диапазон рабочих – температур от -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$;
- герметичность – обеспечение всепогодного применения на местности;

источник электропитания – АКБ с зарядом как от сети 220 В, так и от 12 В, 24 В электросети автомобиля.

Выводы. В работе проведены экспериментальные исследования и математическое моделирование задачи возбуждения конической антенны с продольной щелью. На основе результатов экспериментальных измерений построена диаграмма направленности, которая имеет

форму кардиоиды. Показано, что коэффициент стоячей волны конической антенны с продольной щелью находится в пределах 2 ± 0.5 в рабочем диапазоне антенны 8.7–10 ГГц.

Математическая модель процесса возбуждения щелевой конической антенны точечным монохроматическим источником свелась к краевой электродинамической задаче в строгой постановке, решение которой находится с помощью аппарата интегральных преобразований и метода задачи Римана–Гильберта. По результатам решения краевой задачи приведены расчетные диаграммы пространственного распределения в зависимости от ширины щели. Сравнение измеренных и расчетных нормированных диаграмм показало удовлетворительное соответствие по форме и значениям.

Перспективой дальнейших исследований является использование полученных экспериментальных и теоретических результатов, например, для проектирования современных широкополосных и сверхширокополосных антенных систем обнаружения скрытых объектов и определения направления движения целей.

Список использованной литературы

1. Пат. 2455692. Российская Федерация, МПК G08B 13/00, G01S 13/36. Способ обнаружения нарушителей в контролируемой зоне [Текст]. Первушинских В. А, Токарев Н. Н., Афанасенков Ф. Н. и др.; патентообладатель – Федеральное государственное унитарное предприятие Федеральный научно-производственный центр “Производственное объединение “Старт” им. М. В. Проценко”; заявка – № 2010151591/08, 15.12.2010; опубликовано 10.07.12, Бюл. № 19.
2. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.tzmagazine.ru/jpage.php>
3. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели / В. О. Кобак. – М. : Сов. Радио, 1975. – 248 с.
4. Modern antenna handbook/ edited by C.A. Balanis. – USA : Wiley public., 2008. – 1663 p.
5. Ваганов Р. Б. Основы теории дифракции / Р. Б. Ваганов, Б. З. Каценельбаум. – М.: Наука, 1982. – 272 с.

6. Куріляк Д. Б. Аналітико-числові методи в теорії дифракції хвиль на конічних та клиноподібних поверхнях / Д. Б. Куріляк, З. Т. Назарчук. – Київ: Наукова думка, 2006.-280 с.
7. Пименов Ю. В. Техническая электродинамика / Ю. В. Пименов, В. И. Вольман, А. Д. Муравцов. – М.; Радио и связь, 2002. – 536 с.
8. Рембовский А. М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2015. – 640 с.
9. Балюк Н.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты / Н. В. Балюк, Л. Н. Кечиев, П. В. Степанов. – М.: ООО “Группа ИДТ”, 2009. – 478 с.
10. Semenova E. K., Doroshenko V. A. Electromagnetic excitation of PEC slotted cones by elementary radial dipoles – a semi-inversion analysis / E. K. Semenova, V. A. Doroshenko // Transactions on antennas and propagation. 2008 – Vol. 56, No. 7. – P. 1976-1983.

Стаття надійшла до редакції 13.11.2015.

Дорошенко В. О., Лисий М. І, Стрельницький О. Є., Стрельницький О. О. Дослідження властивостей конічної щелевої антени доплерівського СВЧ датчика охорони локальних об'єктів

У статті представлені результати експериментальних досліджень і математичного моделювання конічної антени з поздовжньою щілиною, що дозволяє формувати діаграму спрямованості, яка має форму кардіоїди, що може бути використано для побудови доплерівського надвисокочастотного датчика охорони блокпостів, позицій спостереження та інших локальних об'єктів. На основі результатів експериментальних вимірювань побудована діаграма спрямованості, яка має форму кардіоїди. Математична модель процесу збудження щілинної конічної антени точковим монохроматичним джерелом звелася до крайової електродинамічної задачі, вирішення якої знаходиться за допомогою апарату інтегральних перетворень і методу задачі Рімана-Гільберта. За результатами рішення крайової задачі наведені розрахункові діаграми просторового розподілу залежно від ширини щілини.

Ключові слова: конусна антена, НВЧ датчик, кардіоїдна діаграма спрямованості
Ключевые слова: конусная антенна, СВЧ датчик, карди-оидная диаграмма направленности

Doroshenko V. O., Lysyi M. I., Strelnytskyi O. E., Strelnytskyi O. O.
Investigation of the slotted conical antenna of the doppler microwave sensor for the local objects protection

The results of experimental research and mathematical modeling of a slotted conical antenna that permits to form cardioid radiation pattern are presented. Such antenna for creation of doppler microwave sensor guard for roadblocks, position surveillance and other local objects could be used.

Based on the results of experimental measurements of the radiation pattern of cardioid form is built. The standing wave ratio of the antenna with the longitudinal conical slot within the operating range of the antenna 8.7-10 GHz is.

A mathematical model of the process of excitation slotted conical antenna by pointed monochromatic source to the edge of the electrodynamic problem in a rigorous formulation is reduced. The solution of which is using the apparatus and method of integral transformations of the Riemann-Hilbert. As a result of the boundary problem solution diagram the calculated spatial distribution depending on the width of the gap is shown. The comparison of measured and calculated normalized charts satisfactory agreement in form and meaning are shown. The experimental and theoretical results for the design of advanced broadband and ultra-wideband antenna systems detect hidden objects and determine the direction of movement goals could be used.

The prospects for further research is development of the Doppler sensor protection of local objects, intended to detect and determine the direction of a moving object. As the object detection a person, group of people could be. A block diagram of the sensor, as well as the generalized tactical and technical requirements for the prospective development of the sensor are proposed.

Keywords: *Conical antenna, microwave sensor, cardioid radiation pattern.*