

Д. т. н. И. Н. ПРУДИУС, к. т. н. Р. В. ПРОЦЬ,  
к. т. н. В. Г. СТОРОЖ

Украина, НУ «Львовская политехника»  
E-mail: iprudys@polynet.lviv.ua, vstorozh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию  
09.11 2009 г.

Оппонент К. В. КОЛЕСНИК  
(НИПИ «Союз», г. Харьков)

## РАДИОВОЛНОВОЕ ОХРАННОЕ УСТРОЙСТВО НА ИЗЛУЧАЮЩЕМ КАБЕЛЕ

*Предложена математическая модель, позволяющая проводить качественный анализ распределения чувствительности охранного устройства по длине излучающего кабеля.*

Основу современной системы охраны объектов составляют технические средства обнаружения нарушителя для помещений и открытых территорий, работа которых, хотя и базируется на различных физических принципах, сводится к одному — превратить любое действие человека, направленное на несанкционированное проникновение на объект, в электрический сигнал и после обработки этого сигнала сформировать соответствующее сообщение службе охраны.

При создании рубежей охраны на открытых территориях эти задачи могут быть успешно решены с помощью радиоволновых охранных устройств на излучающих кабелях [1, 2]. Такие устройства формируют рубеж охраны, который нечувствителен к мелким животным, птицам и метеорологическим условиям и полностью повторяет рельеф местности и конфигурацию ограждения. Поэтому они могут быть успешно использованы для обеспечения охраны всего периметра объекта, его отдельного участка, а также отдельного локального объекта.

### Принцип построения охранного устройства

Рассмотрим принцип работы охранных устройств на излучающих кабелях. Два кабеля — передающий и приемный — прокладывают параллельно друг другу при расстоянии 1—3 м между ними [1, с. 180; 2,

3]. Вследствие излучения от передающего кабеля в приемном кабеле устанавливается сигнал определенного уровня. Появление нарушителя в зоне расположения кабелей меняет распределение поля между ними, в результате чего амплитуда и фаза сигнала в приемном кабеле также меняется. Если величина и скорость изменения этих параметров соответствует заранее установленным критериям, охранный прибор формирует сигнал тревоги. Эту конфигурацию устройства целесообразно применять для обеспечения охраны периметра всего объекта.

Для решения других задач оптимальным, на наш взгляд, будет устройство, которое состоит из одного излучающего кабеля — передающего и сосредоточенной приемной антенны. Конфигурация взаимного расположения кабеля и антенны определяется взаимным расположением необходимого рубежа и объекта охраны. Рассмотрим конфигурации охранного устройства для отдельного участка периметра и для отдельного локального объекта, окруженного излучающим кабелем с антенной в центре окружности (рис. 1).

В обоих случаях охранный прибор состоит из передатчика Пд, который подсоединен к излучающему кабелю ИК, и приемника Пм с приемной антенной А. Схема обработки полезного сигнала и формирования тревожного сообщения конструктивно размещены в корпусе приемника. Поскольку излучающий кабель можно располагать непосредственно на поверхности почвы, без предварительной инженерной подготовки территории, такая конфигурация позволяет легко менять территориальное расположение отдельных рубежей охраны, что обеспечивает высокую мобильность устройства.

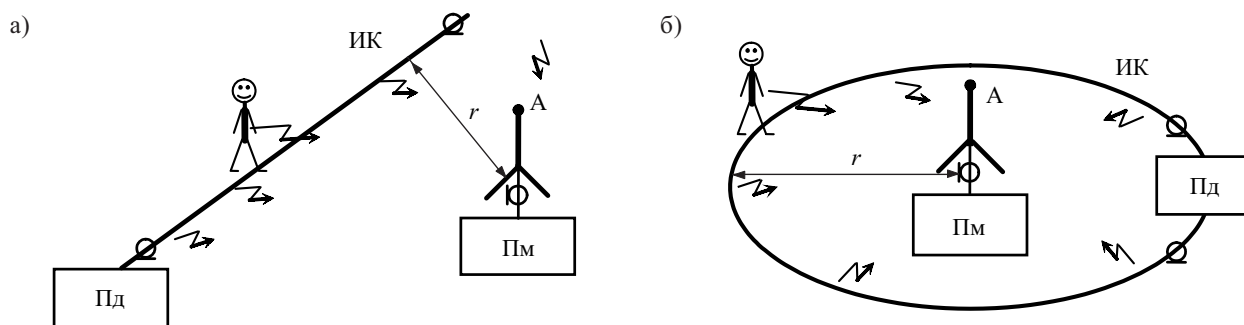


Рис. 1. Обеспечение охраны участка периметра (а) и локального объекта (б)

**Моделирование сигналов, вызванных движением нарушителя**

Анализ структуры поля излучающего кабеля [4, с. 48] и проведенные исследования [5] позволили сделать следующий вывод. Внешняя поверхность экрана кабеля возбуждается магнитным полем, которое охватывает поперечное сечение кабеля и через отверстия в экране излучается наружу, что аналогично возбуждению проводящего цилиндра совокупностью поперечных магнитных диполей. В итоге на поверхности экрана кабеля наводится продольный электрический ток, который и является причиной возбуждения в окружающей среде электромагнитного поля. Несмотря на то, что в самом кабеле существует режим бегущих волн, распределение тока на поверхности экрана кабеля и поля вдоль него неравномерное. Оно определяется взаимодействием двух волн с различными постоянными распространения. При этом излучающий кабель удобно представить линейной излучающей структурой, распределение тока вдоль которой может быть определено как аналитически, так и экспериментально [5, 6].

Охранные устройства на излучающих кабелях работают, как правило, в метровом и в нижней части дециметрового диапазона волн, где длина волны значительно больше поперечных размеров кабеля. В метровом диапазоне радиус излучающего кабеля, например, RX4-3R соответствует приблизительно  $0,002\lambda$ , а в дециметровом —  $0,012\lambda$ . Для кабеля РИ-75-4-12 эти величины еще меньше. Поэтому при анализе поля на основании [7, с. 33; 8, с. 158] излучающий кабель можно рассматривать как нить с током, разбитую на дискретные элементарные электрические излучатели длиной  $\Delta l \ll \lambda$  с током  $I_n$ , где  $n$  — порядковый номер элемента. Тогда все последующие вычисления можно осуществить по известным для таких излучателей выражениям [9, с. 72].

Геометрическая модель расчета сигнала, наведенного в приемной антенне за счет отражения от нарушителя, представлена на рис. 2. Координаты и ориентация каждого элементарного излучателя с током

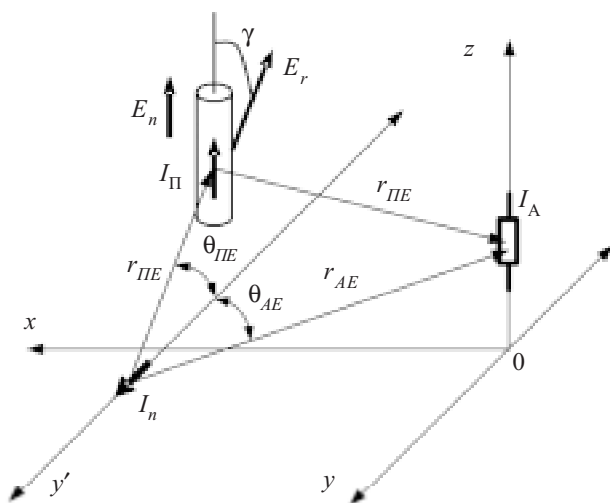


Рис. 2. Модель расчета сигнала от нарушителя

определяются в зависимости от способа укладки излучающего кабеля.

В качестве модели нарушителя примем цилиндрический элемент, в котором в результате действия поля излучающего кабеля наводится эквивалентный ток  $I_{\Pi}$ . Поскольку элемент ориентирован, в основном, перпендикулярно кабелю, этот ток будет пропорционален радиальной составляющей электрического поля элементарных излучателей, на которые условно разбит кабель. С учетом обозначений на рис. 2, вектор напряженности электрического поля, параллельный оси цилиндра, можно вычислить с помощью выражения [9, с. 72]

$$E_n = -j \frac{I_n \Delta l}{2\pi\omega\epsilon_a} e^{-j\beta r_{\Pi E}} \left( \frac{1}{r_{\Pi E}^3} + \frac{1}{r_{\Pi E}^2} \right) \cos \theta_{\Pi E} \cos \gamma, \quad (1)$$

где  $\omega$  — рабочая частота;

$\epsilon_a$  — диэлектрическая проницаемость среды;

$\beta$  — постоянная распространения;

$r_{\Pi E}$  — расстояние от элементарного излучателя до модели нарушителя;

$\theta_{\Pi E}$  — угол между осью элементарного излучателя и направлением на модель нарушителя;

$\gamma$  — угол между радиальной составляющей поля элементарного излучателя и осью модели нарушителя.

При условии, что ток вдоль модели нарушителя распределяется равномерно, его величина определяется согласно выражению

$$I_{\Pi} = \frac{1}{Z_e} \sum_n \int_h E_n dh, \quad (2)$$

где  $Z_e$  — константа, учитывающая параметры тела;

$h$  — высота тела.

Под действием поля, возбужденного током  $I_{\Pi}$ , в приемной антенне наводится ток  $I_A$ , амплитуда и фаза которого зависят от положения модели нарушителя. Поскольку эти токи имеют общую плоскость поляризации, силу тока  $I_A$ , а значит и величину полезного сигнала, которым является изменение напряжения на выходе детектора  $U_{\text{вых}}$ , можно рассчитать согласно [10, с. 71]. Изменяя координаты модели нарушителя, можно моделировать изменение уровня сигнала при перемещении нарушителя в системе «излучающий кабель — антенна» и таким образом определить распределение чувствительности вдоль рубежа охраны.

На рис. 3 показано изменение величины сигналов при перемещении модели нарушителя с внешней стороны рубежа охраны вдоль отдельного прямолинейного участка кабеля на расстоянии 1 м от него (см. рис. 1, а). Антенна в виде вертикального вибратора, расположенного на высоте 3 м, находилась на расстоянии  $r=25$  м. Моделирование осуществлено на частоте 60 МГц для участка кабеля длиной 125 м.

Результаты моделирования нормированы к максимальному значению сигнала, который представлен кривой  $I$ .

Моделирование показало, что сигнал, вызванный перемещением нарушителя вдоль кабеля, зависит от взаимного расположения излучающего кабеля и ан-

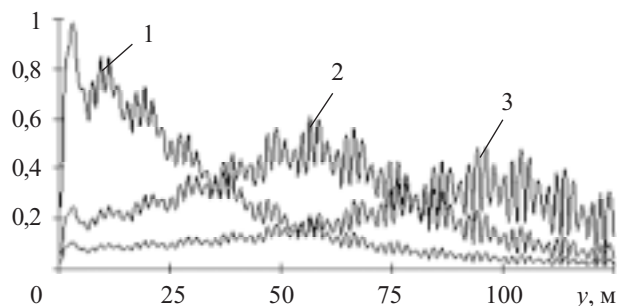


Рис. 3. Изменение сигналов при перемещении модели нарушителя вдоль излучающего кабеля на отдельном участке периметра для случаев размещения антенны на разном расстоянии от начала кабеля, м:  
1 — 10; 2 — 60; 3 — 120

тенны. При установке антенны близко к началу кабеля наблюдается значительная неравномерность сигнала. Это осложняет выбор оптимальной величины порога срабатывания в схеме обработки сигнала. Несколько меньшая неравномерность сигнала будет при размещении антенны в конце кабеля.

Если расположение излучающего кабеля и антенны соответствует рис. 1, б, модель нарушителя перемещается вдоль внешней стороны охранного рубежа по окружности. При этом изменение амплитуды сигнала при движении вдоль кабеля носит более равномерный характер (рис. 4), который определяется, в основном, распределением тока вдоль кабеля и потерями в нем.

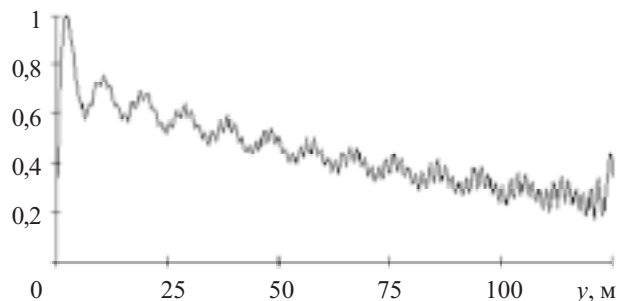


Рис. 4. Изменение сигнала при перемещении модели нарушителя вдоль излучающего кабеля, уложенного вокруг объекта

В реальных условиях на величину сигнала, вызванного перемещением нарушителя, влияет много факторов: границы раздела сред, неоднородность почвы, рельеф местности, индивидуальные особенности перемещения нарушителя. Поэтому предложенная модель позволяет сделать лишь качественный сравнительный анализ распределения чувствительности охранного устройства при разной конфигурации размещения излучающего кабеля, приемной антенны и траектории движения нарушителя.

### Структурная схема охранного устройства и результаты исследований

Структурная схема экспериментального образца охранного устройства на излучающем кабеле (ОУИК) показана на рис. 5. Устройство состоит из передатчика и приемника с блоком корреляционной обработки.

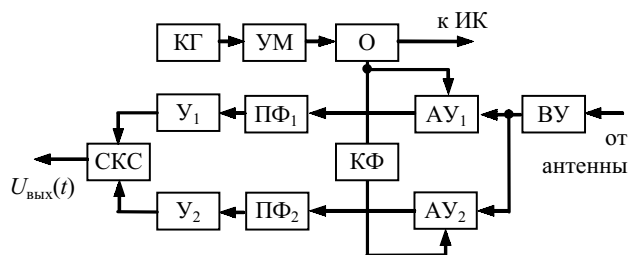


Рис. 5. Структурная схема охранного устройства на излучающем кабеле

Излучающий кабель подключается к передатчику, а антенна — к приемнику.

В состав передатчика входят стабилизированный кварцевым резонатором задающий генератор КГ с возможностью перестраивания в диапазоне частот 55—73,5 МГц, высокочастотный усилитель мощности УМ, который на нагрузке 50 Ом развивает мощность 100 мВт, и ответвитель О опорного сигнала для блока обработки. С учетом экранирующего действия кабеля, мощность излучаемого сигнала не превышает единиц милливатт.

Принятый антенной сигнал усиливается входным усилителем ВУ до уровня около 50 мВ и подается на блок обработки. Корреляционная обработка принятого сигнала осуществляется двумя аналоговыми умножителями АУ<sub>1</sub> и АУ<sub>2</sub> и полосными фильтрами ПФ<sub>1</sub> и ПФ<sub>2</sub>. На другие входы АУ<sub>1</sub> и АУ<sub>2</sub> подаются опорные сигналы от ответвителя О, причем на АУ<sub>2</sub> через квадратурный фазовращатель КФ.

Напряжения на выходах АУ<sub>1</sub> и АУ<sub>2</sub> можно представить следующими выражениями:

$$U_{AV1}(\omega t) = \{U_C \sin(\omega t + \varphi_C) + U_{II}(t) \sin[\omega t + \varphi_{II}(t)]\} U_O \cos \omega t; \quad (3)$$

$$U_{AV2}(\omega t) = \{U_C \sin(\omega t + \varphi_C) + U_{II}(t) \sin[\omega t + \varphi_{II}(t)]\} U_O \sin \omega t, \quad (4)$$

где  $U_C$  и  $U_{II}(t)$  — соответственно усиленные входным усилителем напряжения сигнала, наведенного в антенне от излучающего кабеля, и напряжения от изменения поля нарушителем;

$\varphi_C$  и  $\varphi_{II}(t)$  — фазовые сдвиги этих напряжений;  
 $U_O$  — амплитуда опорного напряжения.

Значения  $U_{II}(t)$  и  $\varphi_{II}(t)$  являются функциями времени, которые определяются местом и скоростью перехода нарушителя через кабель линии охраны. Их спектр лежит в пределах от 0,05 до 5 Гц. С выходов АУ<sub>1</sub> и АУ<sub>2</sub> сигналы поступают на полосовые фильтры ПФ<sub>1</sub> и ПФ<sub>2</sub> и на усилители У<sub>1</sub> и У<sub>2</sub>.

Если учесть, что фильтры ПФ<sub>1</sub> и ПФ<sub>2</sub> пропускают сигналы только указанного спектра частот, то на выходе схемы среднеквадратического суммирования СКС без учета коэффициента передачи усилителей получим напряжение

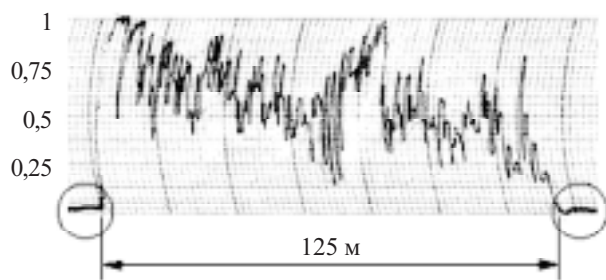


Рис. 6. Изменение сигнала при перемещении нарушителя вдоль кабеля, уложенного вокруг объекта

$$U_{\text{вых}}(t) = |U_0 U_{\text{П}}(t)|, \quad (5)$$

то есть при пересечении кабеля нарушителем величина выходного напряжения пропорциональна только приращению наведенного в антенне напряжения и не зависит от частоты сигнала и его фазы. Это напряжение может быть подано на пороговое устройство для формирования сигнала тревоги.

Экспериментальные исследования устройства проводились в полевых условиях с отрезками кабеля длиной 125 м и с вибраторной антенной, установленной на высоте 3 м, выполненной в виде вертикального несимметричного вибратора длиной 1,2 м с противовесами. Излучающий кабель был уложен непосредственно на почву с травяным покровом. Ширина чувствительной зоны по уровню сигнала, который по меньшей мере в десять раз превышал уровень наводок и флуктуаций, при этом составила 2—4 м вокруг кабеля.

Особенностью исследуемого охранного устройства является то, что независимо от выбранной конфигурации рубежа охраны перемещение людей под антенной и вблизи нее не приводит к изменению сигнала в антенне. Фиксируются только перемещения через кабель или непосредственно вблизи него. Это можно объяснить, во-первых, тем, что возбуждение тока в нарушителе осуществляется, в основном, за счет радиальной составляющей поля излучающего кабеля, во-вторых, тем, что вертикальный несимметричный вибратор практически не принимает сигналов, направленных вдоль его оси.

На рис. 6 показана диаграмма сигнала на выходе СКС от нарушителя, который перемещался с внешней стороны рубежа охраны на расстоянии 0,5—0,7 м от кабеля. Кабель длиной 125 м был уложен в виде окружности, в центре которой расположена антенна.

По краям диаграммы видно, что уровень флуктуаций и помех (они обведены) в десятки раз меньше уровня сигнала от нарушителя. Общий характер изменения амплитуды этого сигнала соответствует результатам моделирования (рис. 4). Локальные неравномерности сигнала обусловлены неоднородностью

участка, где проводились исследования, неровностями поверхности до 0,5 м и наличием насаждений, а также неравномерностью перемещения. Тем не менее, по всей длине кабеля сигнал от нарушителя более чем на порядок превышает фон помех и флуктуаций, что практически исключает вероятность ложного срабатывания устройства.

В ходе экспериментальных исследований различных вариантов построения охранного устройства также было установлено, что подключение передатчика к антенне, а приемника к кабелю не приводит к изменению чувствительности устройства и характера ее распределения вдоль охраняемой зоны. При этом, однако, значительная часть мощности бесполезно излучается в окружающее пространство и может создавать помехи другим радиоэлектронным средствам. В представленном варианте устройства эта часть энергии поглощается, в основном, в согласованной нагрузке кабеля.

### Выводы

В результате проведенных исследований предложена простая математическая модель, которая дает возможность проводить качественный анализ распределения чувствительности охранного устройства вдоль излучающего кабеля.

По сравнению с устройством, в котором используются два излучающих кабеля, предложенное устройство с несколькими разнесенными антеннами с приемниками и одним передающим кабелем дает принципиальную возможность определить место пересечения рубежа охраны нарушителем.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Петраков А. В. Защита и охрана личности, собственности, информации: Справ. пособие.— М.: Радио и связь, 1997.
2. Системы периметральной сигнализации фирмы Geoquip // Охранные системы.— 2001.— № 3 (21).— С. 22—24.
3. Прудис І. Н., Проць Р. В., Сторож В. Г. Засіб охорони периметру на випромінюючих кабелях // Захист інформації.— 2006.— № 2.— С. 67—74.
4. Вэнс Э. Ф. Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели.— М.: Радио и связь, 1982.
5. Сторож В. Г., Проць А. Р. Моделювання розподілу електричного струму вздовж випромінюючого кабелю // Вісник НУ «ЛП». Серія «Радіелектроніка та телекомунікації».— 2001.— № 428.— С. 190—192.
6. Чаплин А. Ф., Пакош З. М., Ящишин Е. М., Тебенько Я. В. Спектр волн коаксиального кабеля с прореженной внешней оплеткой // Электросвязь.— 1991.— № 6.— С. 17—19.
7. Уолтер К. Антенны бегущей волны.— М.: Энергия, 1970.
8. Марков Г. Т., Чаплин А. Ф. Возбуждение электромагнитных волн.— М.—Л.: Энергия, 1967.
9. Марков Г. Т., Петров Б. М., Грудинская Г. П. Электродинамика и распространение радиоволн.— М.: Советское радио, 1979.
10. Кочержевский Г. Н. Антенно-фидерные устройства. Учебник для ВУЗов.— М.: Радио и связь, 1981.