

УДК 537.531

## ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ ГЛОБАЛЬНЫХ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТАМАТЕРИАЛЬНЫХ ЭКРАНОВ

А.С. АБУКРАА, М.А. ВИЛЬКОЦКИЙ, Л.М. ЛЫНЬКОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 4 ноября 2015

Приводятся результаты численного и экспериментального анализов эффективности применения метаматериальных экранов для совместного использования с антеннами приемников сигналов глобальной системы спутниковой навигации. Из множества возможных конструкций экранов были выбраны конструкции регулярной геометрии, не обладающие кривизной. Численно, методом перебора, исследованы строго периодические экраны, затем экраны конечных размеров. Теоретически достигнуты значения подавления помеховых сигналов 8...10 дБ. Экспериментальные исследования, проведенные в реальной обстановке, в основном, это подтвердили.

*Ключевые слова:* защита информации, помехозащищенность спутниковых систем, метаматериалы, экраны электромагнитного излучения.

### Введение

Проблема обеспечения помехозащищенности систем спутниковой навигации в последнее время существенно обострилась. В ряде опубликованных результатов исследований показано, что искусственные помехи в виде когерентного, шумоподобного или псевдонавигационного сигналов могут парализовать абонентскую навигационную систему при относительно небольшой мощности источника помехового сигнала. Увеличение помехоустойчивости может быть достигнуто путем применения специальных методов частотной и пространственной фильтрации на входе приемников сигналов глобальной системы спутниковой навигации (ГНСС). Под пространственной фильтрацией понимается антенная система, которая подавляет сигналы, поступающие от направления на источник помех.

Создание частотного фильтра не составляет проблемы, поскольку при этом используются средства микроэлектроники с приемлемым уровнем потерь полезного сигнала. Антенна не может быть создана на основе технологий микроэлектроники. Поскольку для обеспечения ее эффективности габариты должны быть сравнимы с длиной волны, то применение технологий микроэлектроники при создании таких антенн представляет проблему в смысле обеспечения приемлемых массогабаритных показателей. Общепринятым в практике является использование микрополосковых антенн, расположенных на подложке из диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью, в абонентских приемниках бытового назначения. Такие антенны компактны, обладают малым весом, но имеют широкую диаграмму направленности и низкий коэффициент усиления в направлении передатчиков ГНСС. Последнее приводит к тому, что сигналы помехи искусственного либо многолучевого типа не фильтруются на входе абонентского приемника и, попадая в приемный тракт, нарушают точность работы приемника либо блокируют его работу. Существует два способа борьбы с помехами в данной ситуации. Первый заключается в использовании адаптивных антенных решеток, второй – в создании антенных систем, имеющих низкий коэффициент усиления в направлениях возможного прихода сигналов помех. Как правило, сектор излучения прихода многолучевых и искусственных помеховых сигналов лежит вблизи горизонта в направлениях

выше касательной к горизонту до  $0,1 \dots 0,2$  рад. Для уменьшения коэффициента усиления в таком секторе необходимы антенны с большой апертурой. Известно, что провал в излучении широконаправленного источника электромагнитного излучения вдоль поверхности может быть получен путем расположения отражающего экрана.

Поле излучения источника в присутствии безграничного однородного экрана может быть представлено в виде суммы полей двух источников – действительного и мнимого, обусловленного отражением поля действительного источника от экрана. Глубина и ширина провала обусловлена фазовыми и амплитудными соотношениями полей мнимого и действительного источников. В случае металлического экрана, расположенного на высоте  $h$ , поле излучения описывается следующими выражениями.

Для вертикальной поляризации:

$$E = AF(\theta) \cdot \sqrt{1 + |R|^2 + 2|R| \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} 2h \cos\theta + \Phi\right)}; \quad (1)$$

для горизонтальной поляризации:

$$E = AF(\theta) \cdot \sqrt{1 + |R|^2 - 2|R| \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} 2h \cos\theta + \Phi\right)}. \quad (2)$$

Для металлического экрана  $R = 1$ . В случае экрана с комплексной проводимостью в соответствии с моделью Зоммерфельда, для обеих поляризаций коэффициент отражения имеет следующий вид:

$$R = \frac{\cos\varphi - \sqrt{1 + (\sin^2\theta / \alpha^2)}}{\cos\varphi + \sqrt{1 + (\sin^2\theta / \alpha^2)}}, \quad (3)$$

где  $R$  – коэффициент отражения экрана;  $\alpha$  – комплексная постоянная экрана;  $\theta$  – угол отражения.

Таким образом, при  $\alpha \gg 1$ ;  $R \rightarrow -\text{tg}^2 \frac{\theta}{2}$  вне зависимости от поляризации.

Из приведенных выражений следует, что сплошной металлический экран не обладает помехозащитными свойствами, поскольку в направлениях, касательных к поверхности экрана, увеличивает поле излучения-приема для вертикальной поляризации на 3 дБ и настолько же уменьшает поле горизонтально поляризованной составляющей. Это сводит к нулю выигрыш в помехозащищенности в касательном направлении за счет свойств металлического экрана в случае кругополяризованного поля.

Увеличение помехозащищенности может быть достигнуто при применении диэлектрического экрана, но при этом экран должен иметь значительную толщину. Вместе с тем известно, что существуют искусственные диэлектрики, т.н. метаматериалы, поверхности которых могут иметь свойства, которые соответствуют свойствам экранов металлического, диэлектрического и поглощающего типов [1, 2].

Конструкции таких экранов могут быть весьма разнообразны, но в обобщенном виде они представляют собой периодические структуры, образованные металлическими элементами, расположенными в среде с малыми потерями. Теория их синтеза не разработана. На практике это приводит к тому, что для определения их геометрии и параметров материала, разработчикам приходится действовать методами перебора конструкций и свойств материалов, из которых они изготовлены, опираясь на приближенные модели. При этом параметры модели экрана зачастую определяются технологическими соображениями, доступностью средств их изготовления и стоимостью материалов, из которых они изготовлены.

### Методики расчета и эксперимента

В качестве объекта теоретического и экспериментального исследований были выбраны экраны, расположенные вблизи приемника электромагнитного излучения, образованные взаимоперпендикулярными элементами рамочного типа. Период расположения элементов соответствовал условию отсутствия многолучевости для регулярной структуры в исследуемом диапазоне длин волн.

Метод исследования заключался в том, что на первом этапе проводились численные исследования бесконечного экрана, образованного регулярно повторяющимися элементами. Использовался метод перебора коэффициента  $K$ , основанный на предположении о том, что экран представляет собой систему связанных резонаторов с нижней критической длиной волны

$$\lambda_{кр} = \Pi \cdot K(\epsilon), \quad (4)$$

где  $\Pi$  – периметр замкнутого элемента,  $K$  – коэффициент, учитывающий влияние межэлементных электродинамических связей конструкции и диэлектрических элементов, обеспечивающих механическую связность конструкции.

Все параметры периода экрана удовлетворяли условию отсутствия многолучевости в предположении регулярности элементов и периода. Объект исследования был выбран исходя из соответствия резонансных частот экрана несущим частотам информационных сигналов ГНСС GPS и ГЛОНАС. Расчеты параметров регулярных экранов и экранов ограниченных размеров проводились численными методами. Эксперимент проводился с использованием экрана, который был изготовлен в соответствии с анализом результатов численных расчетов. При этом использовался источник помех в диапазоне  $L_1$  и  $L_2$  и навигационный приемник с выносной антенной, которая располагалась вблизи поверхности экрана. Параметры источника помех излучения были определены по результатам измерений в калиброванной ГТЕ-камере. Источник помех построен на основе генератора управляемого напряжением с полосами свипирования, соответствующими полосам занимаемыми сигналами ГНСС. Одиночный элемент регулярного экрана имел форму, представленную на рис. 1.

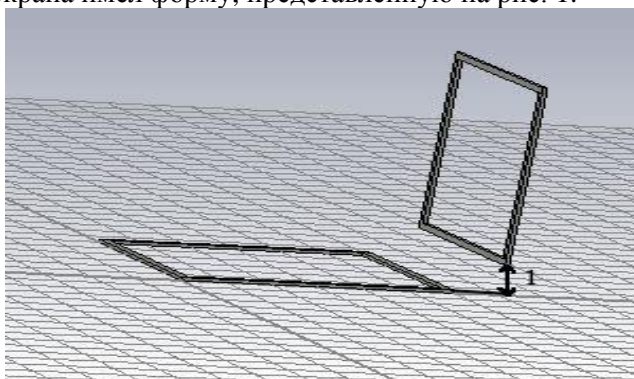


Рис. 1. Элементарная ячейка экрана:

1 – расстояние между вертикальными и горизонтальными элементами

При определении базовой модели экрана было постулировано, что период решетки удовлетворяет условию отсутствия многолучевости, а ее конструкция не содержит одиночных элементов, обладающих кривизной. Последнее условие принято с целью обеспечения технологичности и механической конформности конструкции экрана, который в неэксплуатируемом положении должен иметь минимальные объем и вес. Условие отсутствия многолучевости для регулярной и безграничной структуры обусловлено только периодом, но служит только ориентировочным параметром для нерегулярной решетки, так как реальная конструкция имеет ограниченные размеры и ошибки в изготовлении. Один из способов учета параметров ограниченности размеров экрана на поле излучения и рассеяния радиоволн был предложен П.Я. Уфимцевым [2]. Суть метода состоит в том, что влияние ограниченности размеров экрана на его поле рассеяния представляется в виде краевых волн, источником которых являются края экрана. В случае прямолинейной формы экрана для определения параметров краевой волны используется строгое решение для клина, впервые полученное Зоммерфельдом [3]. Очевидно, что в случае импедансного экрана, который рассматривается в данном случае, такое представление также может быть полезным. В упрощенном рассмотрении экран ограниченных размеров может быть представлен в виде совокупности источников, образованных зеркальными изображениями приемного элемента в экране и на краях. В силу принципа взаимности удобнее рассматривать ДН приемной антенны навигатора как ДН передающей антенны, т.е. источника излучения, который имеет распределения поля такое же, как и у абонентского приемника навигатора (АП) с учетом его зеркальных

изображений. При таком рассмотрении следует вывод о том, что для образования провала в направлениях наземных источников помех как искусственного, так и естественного происхождения необходимо, чтобы независимо от импедансных свойств экрана его размеры удовлетворяли условию  $(2n+1)\frac{\lambda}{2}$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$  в плоскости размещения экрана, что необходимо для взаимной компенсации полей излучения краевых волн в касательном направлении.

### Результаты и их обсуждение

Расчеты коэффициентов рассеяния проводились путем перебора параметра  $K$  при неизменном периоде, составляющим 0,35 средней длины волны диапазона ГНСС. Последний был принят равным 1,4 ГГц. Типичный вид частотной зависимости коэффициентов прохождения и отражения приведен на рис. 2.

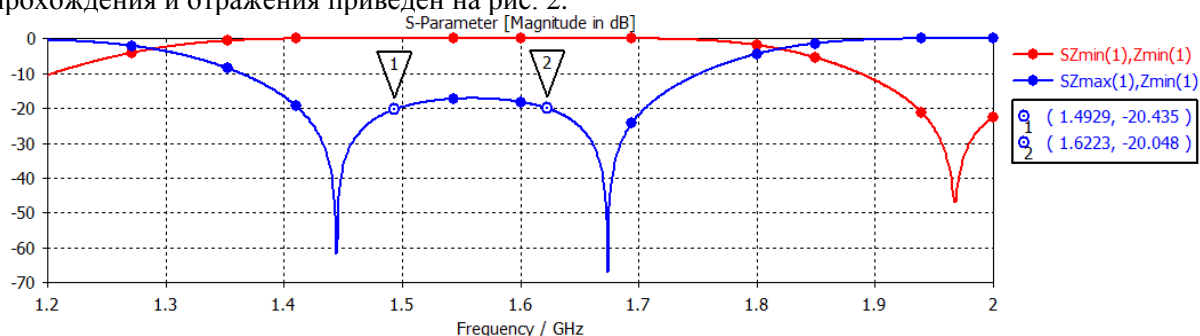


Рис. 2. Частотные характеристики регулярного экрана, образованного рамочными элементами

Видно, что экран имеет два резонанса, частотный разнос между которыми близок к разному частот диапазонов  $L_1$  и  $L_2$ . Численные исследования с экранами размером  $4 \times 4 + 4 \times 4$  и  $n = 2$  элемента показали, что экраны подавляют излучение в плоскости расположения экрана в среднем на 8...10 дБ. При ширине провала по уровню 0,5 порядка 0,2 рад. Типичная пространственная диаграмма направленности излучателя с экраном приведена на рис. 3. Анализ посредством расчета в сечениях показал, что поле в направлении касательной к экрану ослаблено на 8...10 дБ относительно максимального значения.

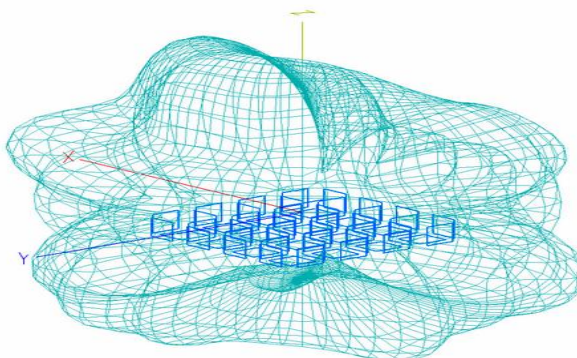


Рис. 3. Пространственная диаграмма направленности источника поля круговой поляризации, расположенного вблизи экрана ограниченных размеров

Из приведенных пространственных распределений поля очевидно, что теоретический анализ эффективности применения экрана крайне затруднителен. В связи с этим для оценки практической эффективности экрана были проведены натурные испытания. Макет экрана был изготовлен на основе пенополистирольных панелей плотностью  $40 \text{ кг/м}^3$  и рамочных медных элементов диаметром 2 мм. Источник помех имел спектр излучения, приведенный на рис. 4.

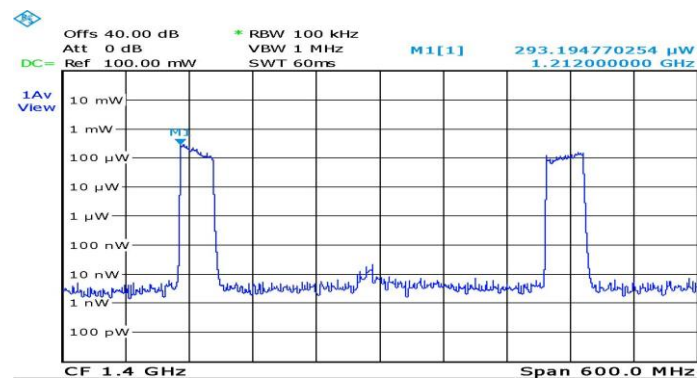


Рис. 4. Спектральные характеристики источника помех

Внешний вид экрана в развернутом состоянии приведен на рис. 5.



Рис. 5. Внешний вид экрана

В процессе эксперимента источник помех перемещался в одном направлении от приемника ГНСС на расстоянии от 5 до 20 метров. Место проведения эксперимента – площадь Независимости г. Минска.

Анализ числа спутников и соотношения сигнал/шум (с/ш) показал, что в отсутствие помехового сигнала число наблюдаемых спутников составляло 12...15 для группировок GPS и ГЛОНАСС. Почти все они использовались в решении навигационной задачи при среднем соотношении с/ш 30...40 дБ/Гц. В присутствии источника помех соотношение с/ш уменьшалось в среднем на 20 дБ, т.е. до уровня 15 дБ/Гц. Когда расстояние между антенной ГНСС и источником помех составляло 5 м, приемник приводился в неработоспособное состояние относительно сигналов данных спутниковых группировок. При увеличении расстояния до 15 м приемник восстанавливался, в решении навигационной задачи участвовали все спутники ГЛОНАСС (8 и 8 в данном случае) и 3 из 5-ти спутников GPS. Такое соотношение, по-видимому, объясняется более высокой помехоустойчивостью сигналов ГЛОНАСС. Применение экрана существенно сказалось на работоспособности приемника, которая начиная с расстояния 5 м не реагировала на сигналы от источника помех.

### Заключение

Проведены теоретические и экспериментальные исследования возможности применения метаматериальных экранов для улучшения защищенности систем ГНСС от искусственных помех и многолучевых спутниковых сигналов.

Теоретически и экспериментально исследованы экраны, образованные элементами рамочного типа, в результате которых определена геометрия экрана.

Результаты натурных испытаний экрана совместно с выносной антенной приемника сигналов ГНСС группировок GPS и ГЛОНАСС показали следующее. На расстоянии 5 метров от антенны приемника источник помех при отсутствии экрана приводил приемник ГНСС в состояние неработоспособности. На расстояниях 15...20 и более метров наличие источника помех не сказывалось на работоспособности приемника. При размещении приемной антенны ГНСС на поверхности экрана работоспособность приемника сохранялась относительно этих

группировок при расстоянии от источника помех 5 м вне зависимости от угловой ориентации экрана в плоскости Земли. Вследствие этого может быть сделан вывод, что применение экранов рассмотренного типа может улучшить помехозащищенность искусственного и естественного происхождения на 8...10 дБ, источники которых расположены на малых углах возвышения.

## **EMISSIONS SECURE OF GLOBAL SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS WITH USE OF METAMATERIAL SHIELDS**

A.S. ABUKRAA, M.A. VILKOTSKY, L.M. LYNKOU

### **Abstract**

The results of numerical and experimental analysis of the metamaterial shields effectiveness for use with the receiver antenna signals of global satellite navigation systems are given. From the many possible designs the screens with regular geometry design without curvature were chosen. Numerically, brute force, strictly periodic shields and shields of finite size were investigated. The suppressing interfering signals values of 8...10 dB were theoretically achieved. Experimental studies in the real situation, basically, confirmed it.

*Keywords:* information security, emissions secure of satellite systems, metamaterials, electromagnetic radiation shields.

### **Список литературы**

1. *Слюсар В.* // Электроника: НТБ. 2009. № 7.
2. *Hwang R.B., Peng S.T.* // IEEE Trans. AP. 2003. Vol. 51. № 6.
3. *Зоммерфельд А.* Оптика. М., 1963.
4. *Уфимцев П.Я.* Метод краевых волн в физической теории дифракции. М., 1962.