

УДК 621.372

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ ПРИ ПОДАВЛЕНИИ НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ПРИЕМА АБОНЕНТСКИХ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАТОРОВ

А.С. АБУКРАА¹, М.А. ВИЛЬКОЦКИЙ²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

²Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15 марта 2017

Аннотация. Рассмотрены общие вопросы влияния экранов на параметры антенн абонентских навигаторов. Рассмотрено влияние на их параметры импедансных экранов, а также экранов резонансного типа. Полученные результаты положены в качестве исходных для анализа параметров систем, образованных экранами и слабонаправленными абонентскими навигационными приемниками. Исследованы характеристики приемных антенн полосковой и вибраторной конструкций с экранами поглощающего и импедансного типа, а также их модификаций в виде компактных в сложенном состоянии конструкций. Обсуждаются возможности применения конформных конструкций экранов. Сделана попытка оценить их оптимальность.

Ключевые слова: защита информации, помехозащищенность, спутниковая система навигации, экран электромагнитного излучения.

Abstract. General questions of the effect of screens on the parameters of antennas of subscriber navigators are considered. The effect on their parameters of impedance screens, as well as resonance type screens, is considered. The obtained results are used as initial data for the analysis of the parameters of the systems formed by screens and weakly directional user navigation receivers. The characteristics of receiving antennas of strip and vibrator structures with screens of absorbing and impedance type, as well as their modifications in the form of compact in the folded state of structures, are studied. The possibilities of using conformal screen designs are discussed. An attempt to evaluate their optimality is done.

Keywords: information security, noise immunity, satellite navigation system, electromagnetic radiation shield.

Doklady BGUIR. 2017, Vol. 104, No. 2, pp. 84–91

Shielding application with the reduction of undesirable reception channels of subscriber satellite navigators

A.S. Abukraa, M.A. Vilkotsky

Введение

Основная проблема, которая возникает при создании оптимальных антенн для приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), обусловлена требованиями в обеспечении эффективности приема в широкой области углов наблюдения и подавления приема также в широкой области пространства при резкой границе между этими областями для круговой поляризации поля. Из-за его векторных свойств электромагнитного поля (ЭМП) следует невозможность удовлетворения всем указанным выше условиям. Наилучшим решением для достижения оптимальной конструкции приемной системы может быть нахождение совокупности реализуемых технических параметров, обеспечивающих оптимальность приемной системы. При таком подходе необходимо определение некоторого критерия оптимальности. Конечным фактором оптимальности может служить ошибка в передаче навигационной информации, которая может быть представлена в следующем виде [1]

$$\sigma_{\Sigma}^2 = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_t^2) = tr(K_0).$$

Если пренебречь аппаратурными погрешностями, погрешностями эфемерид и времени то ошибка в основном будет определяться уровнем и степенью искаженности сигналов, принятых от спутников. Уровень сигналов и их искаженность определяются такими факторами, как диаграмма направленности (ДН) антенной системы абонентского приемника (АП) и ее уровнями в направлении на конкретный спутник, на многолучевые сигналы и источники искусственных помех. Из этого следует, что при разработке критерия оптимальности ДН антенн АП должны учитываться факторы местоположения спутников и потенциальной электромагнитной обстановки (ЭМО). Потенциальная ЭМО определяется расположением местных предметов и источников помех их свойствами относительно АП.

Спутники постоянно перемещаются относительно приемника, угловые положения не остаются постоянными. Период повторения положений группировки спутников ГЛОНАС составляет 7 сут 23 ч 27 мин 8 с. Для GPS – ровно 12 ч. В дальнейшем эти данные будут использованы авторами при проведении натурных (полевых) экспериментов. Поскольку основу измерений составляют измерения задержки группового сигнала и его фазы, очевидно, что, во-первых, однозначность и точность измерений может быть обеспечена только при отсутствии ложных сигналов, имеющих те же кодовые последовательности, что и полезный, а также помеховыми сигналами случайного либо преднамеренного происхождения. В обоих случаях ложный сигнал может испытывать преломления на пути распространения, направление его прихода неизвестно и, следовательно, неизвестны τ и $\Delta\varphi$.

Однако влияние этих сигналов можно приближенно оценить путем использования метода зеркальных изображений. Для i -го сигнала, образованного зеркальным отображением АП, принятый сигнал будет [1]:

$$A_{\text{изм}} = A \cdot (1 + \chi^2 + 2\chi \cos(\Delta\varphi))^{\frac{1}{2}},$$

где $\Delta\varphi = 2\pi \cdot \frac{dR}{\lambda} + \pi = 4\pi \cdot \frac{H \sin \alpha}{\lambda} + \pi$, где H – высота антенны выше подстилающей поверхности; α – угол возвышения НКА над горизонтом (угол места).

При отражении электромагнитного сигнала НКА от большинства видов поверхностей происходит сдвиг фаз, равный 180° , в связи с этим меняются направление вращения вектора поляризация электромагнитного сигнала.

Геометрическое расположение спутников относительно приемников постоянно меняется во времени. При этом наклонная дальность на спутник относительно навигатора изменяется в 1,3 раза в пределах изменения угла места от 0° до 90° и, с учетом тропосферного затухания сигнала следует, что сигнал от спутников, находящиеся в зените, будет в 1,5–2 раза больше сигнала от спутников, наблюдаемых при углах, близких к горизонту. Также известно, что сигналы, приходящие при углах 5° – 10° , вносят значительные ошибки в работу навигационной системы. Из этого можно заключить, что даже идеальная земная поверхность приводит к искажениям навигационных сигналов. В случае неровной земной поверхности и наличия искусственных сооружений ситуация усугубляется. Алгоритмическое исключение из решения навигационной задачи спутников, наблюдаемых при малых углах возвышения, не полностью решают эту проблему. Исходя из этого, можно прийти к выводу, что идеальная ДН АП должна представлять собой эллипс вращения с малой осью направленной в зенит эксцентриситетом 1,5–2,0 и нулем области углов около 5° – 10° к горизонту. Внешний вид идеальной ДН и ее соответствие задачам навигации может быть оценен на основании рис. 1.

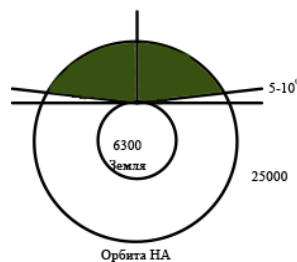


Рис. 1. Внешний вид идеальной ДН АП

С точки зрения рабочего диапазона частот, ДН должна сохраняться в полосах частот систем GPS, ГЛОНАС и Galileo, т.е. L_1 и L_2 , в перспективе L_5 , т.е. в идеале навигатор должен функционировать в полосе частот более 35 МГц, т.е. более 30 % центральной частоты L_1 и L_2 .

Такие антенны относятся к классу широкополосных и при их создании возникают определенные трудности. Один из аспектов этих трудностей заключается в том, что широконаправленная антенна должна иметь малые габариты, для того чтобы обеспечить низкий КНД и высокий коэффициент усиления (КУ), которые связаны с размерами антенны известным соотношением $D = 4\pi \frac{S}{\lambda^2}$, где S – площадь поперечного сечения антенны. В свою очередь, добротность антенны связана с ее размерами следующим соотношением, известным как предел Харрингтона–Чу: $C = QV$, где C – константа, меньшая 1, V – объем, занимаемый антенной; Q – добротность.

Эти соотношения показывают принципиальную невозможность создания широкополосной антенны с изотропной ДН с КУ близкой к единице. Существует способ решения проблемы, основанный на использовании антенной решетки, имеющей возможность некогерентного суммирования сигналов либо применения экранирования для подавления излучения из нежелательных направлений. Использование антенных решеток эффективно, но стоит дорого, имеет низкие эксплуатационные характеристики, а также требует периодического обслуживания, электропитания и обеспечения особых условий эксплуатации. Экраны экономичнее и выгоднее в эксплуатационном отношении. Однако очевидно, что их основной недостаток может заключаться в необходимости придания им больших размеров.

Обоснование выбора объектов и методов исследования

В качестве объекта исследования рассмотрим структуру, состоящую из антенны АП совместно с экраном. Под экраном здесь и далее понимается поверхность, не связанная с линией передачи электрическими контактами.

Во-первых, необходимо выбрать объекты исследования. Целью является оценка ожидаемой эффективности использования приемных антенн АП совместно с различного вида экранами и таким образом ограничить круг объектов исследований. Во-вторых, необходимо определить методики исследования.

Важным обстоятельством при выборе объектов исследования является ограничение на максимальные размеры экранов. Это обстоятельство может быть обойдено, если в качестве экранов использовать экраны, обладающие свойством конформности (трансформенности), которые существенно отличаются размерами в транспортабельном и развернутом (рабочем) состояниях. На основании таких оценок со стороны пользователей сформировано мнение, что используемый экран в развернутом состоянии не должен быть более 0,5–0,8 м, т.е. 2–4 длины волны в зависимости от диапазона частот антенны АП. В принципе, экраны могут быть даже больше таких размеров, но, с точки зрения практических требований, в транспортабельном состоянии должны быть более компактными, т.е. обладать свойствами конформности. Поэтому исследование экранов, обладающих свойством конформности, представляет значительный интерес. К разряду таких экранов могут быть отнесены плоские экраны, но они не обладают свойством поляризационной изотропности. Так, в [2] показано, что применительно к одномерному случаю (отсутствия краев ДН импедансного экрана в случае H -поляризации) относительно плоскости экрана ДН щелевой антенны, выражение может быть записано в виде

$$H = \frac{\omega\varepsilon}{2} \left(\frac{\sin \vartheta}{\sin \vartheta + i\eta} - \frac{2\eta^2}{\eta^2 + \sin^2 \vartheta} \right),$$

где $\eta = -i \frac{Z}{Z_0}$. Из этого выражения следует, что плоская импедансная поверхность H -типа

существенно повышает уровень приема в направлениях касательных к экранам. Последнее обстоятельство может ограничить эффективность применения одномерных тонкопленочных экранов применительно к данному случаю.

Существует другой класс конструкций, обладающих свойством конформности и широко используемый при решении задач доставки в космос крупногабаритных антенн, экранов и солнечных батарей. Простейшие из них представляют собой жесткие тонкие полосы с разрезами, вставленными друг в друга. На полосы, образующие экран, могут быть нанесены печатным способом любые плоские одиночные элементы, образующие метаматериальный экран, как это показано на рис. 2. Это также могут быть уголкового, кольцевые, рамочные или омега элементы [3–5].

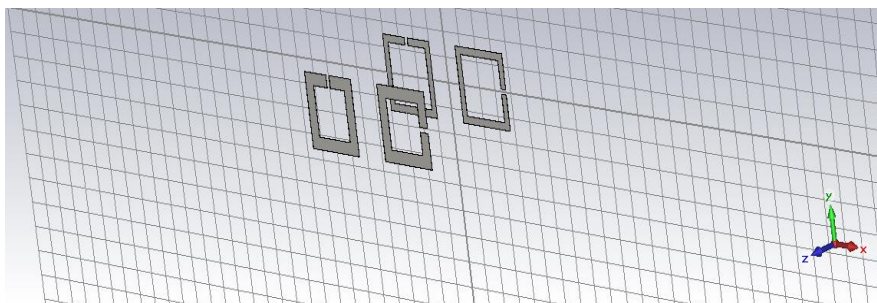


Рис. 2. Внешний вид плоских одиночных элементов, образующих метаматериальный экран

Все известные типы экранов могут быть классифицированы следующим образом: металлические, диэлектрические, поглощающие, метаматериальные. В связи с этим, целесообразно рассмотреть их и провести сравнительный анализ их характеристик.

Основные требования к АП навигатора заключаются в обеспечении оптимальной пространственной ДН антенны навигатора. Задачу значительно усложняет то, что рабочие диапазоны АП разнесены, а также очевидный факт, что достижение идеальной ДН АП невозможно во всей полосе частот ГССН. В связи с этим, поиск возможного диапазона частот нужно ограничить полосой отведенной ГНСС в одном из диапазонов, т.е. L_1, L_2, L_5 .

В данной ситуации требуется определить, какая АС оптимальная, т.е. выработать некий численный критерий оптимальности. Задача оптимизации должна содержать ограничения в виде таких факторов, как конструктивная реализуемость и практичность в использовании потенциальными потребителями.

Вначале определим критерий оптимальности ДН. Мощность, принятая системой экран-антенна из зоны пространства, соответствующей идеальной ДН, может быть определена на основании интегрирования вектора Пойнтинга системы экран-антенна рассматриваемой как излучатель по пространству возможных углов прихода сигналов

$$P_r = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} P_r \sin \theta d\varphi d\theta,$$

где φ, θ – угловые координаты в сферической системе координат.

Отбрасывая постоянные множители, можно написать выражение для мощности излучения в следующем виде

$$P^+ = \int_{10^0}^{90^0} \int_{0^0}^{360^0} F^r(\varphi, \theta) \sin \theta d\varphi d\theta, \quad (1)$$

где $F(\varphi, \theta) > ДН$.

В свою очередь, оценкой неидеальности может служить поток мощности, принятый из других направлений, т.е.

$$P^- = \int_{10^0}^{-90^0} \int_{0^0}^{360^0} F(\varphi, \theta) \sin \theta d\varphi d\theta, \quad (2)$$

а отношение $\frac{P^-}{P^+}$ может служить показателем качества приемной системы и является аналогом защитного отношения (FBR).

Возможно, также представить показатель качества в виде:

$$ПК = (K_1 - K_2 \eta_2 - K_3 \eta_3) / K_\Sigma,$$

где K_1, K_2, K_3 – коэффициенты, определяемые интегрированием ДН системы экран-антенна, в следующих пределах интегрирования ДН,

$$K_1 = \begin{cases} 0^\circ < \varphi < 360^\circ \\ 10^\circ < \theta < 90^\circ \end{cases} \quad K_2 = \begin{cases} 0^\circ < \varphi < 360^\circ \\ 0^\circ < \theta < 10^\circ \end{cases} \quad K_3 = \begin{cases} 0^\circ < \varphi < 360^\circ \\ -90^\circ < \theta < 0^\circ \end{cases}.$$

Весовые множители определяются исходя из местной электромагнитной обстановки. Теоретический анализ целесообразно проводить в два этапа численными методами, поскольку строгое решение такой задачи невозможно. Первый этап будет проводиться на основе решения строго периодической задачи и его численного представления, например, на основе программного продукта GST Studio, а затем, перейдя к изучению экрана ограниченных размеров методом, основанным на решении интегрального уравнения Поплингтона путем представления поверхности антенны и экрана в виде проволочной сетки из перпендикулярных контактирующих проводов. При теоретическом рассмотрении системы экран-антенна целесообразно рассмотреть два типа антенн: полосковую с несимметричным питанием [4] и дипольную из двух взаимноперпендикулярных диполей, запитываемых со сдвигом фазы на 90° . Целесообразно также рассмотреть обе задачи при ортогональном расположении антенн относительно экрана.

При проведении математического моделирования с целью выяснения основных закономерностей и уменьшения числа расчетов можно ограничиться рассмотрением метаматериальных экранов двух видов. На рис. 3 приведена геометрия этих экранов. Один из них образован разомкнутыми рамочными элементами, второй – замкнутыми.

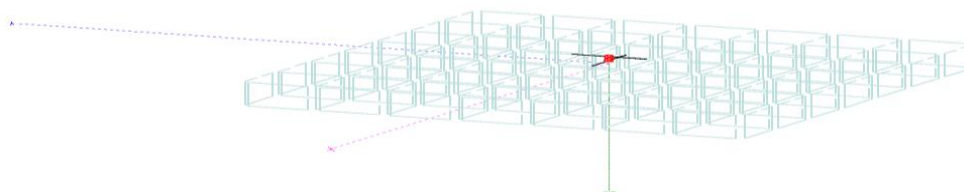


Рис. 3. Конфигурация метаматериальных экранов ограниченных размеров

Эксперименты целесообразно провести со следующими типами экранов: плоским металлическим, вспененным углеродосодержащим, волокнистым влагосодержащим и двумя типами метаматериальных. Первый тип метаматериального экрана был образован замкнутыми рамочными элементами, благодаря которым система экран-антенна приобретает симметрию, второй – незамкнутыми, у которого данное свойство отсутствует. Импедансный одномерный, т.е. тонкопленочный экран нет смысла рассматривать в связи с тем, что он потенциально не обладает поляризационной изотропностью. Представляет интерес исследование поглощающих материалов [5].

В отношении определения размеров экранов, очевидно, что в реальности размеры экрана определяются эксплуатационными факторами и должны быть не слишком большими. Задача нахождения оптимальных размеров экрана неоднозначна и, зачастую, связана с субъективными предпочтениями инженера или разработчика технического решения. Целесообразно выбрать абсолютный размер экрана величиной 0,5–0,7 м, т.е. около 2,5 длины волны рабочего диапазона ГНСС.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2 и 3 приведена геометрия образующих экран элементов и конфигурация экрана ограниченных размеров. Результаты исследования строго периодического экрана позволили определить область частот, в которой можно было ожидать наличия эффектов изотропии характеристик экрана в отношении E - и H -поляризаций.

Здесь следует заметить, что абсолютное значение частот не играет большой роли для использования конструкции при создании реальной АП ГНСС, поскольку корректировка геометрических параметров экрана, размеров и положения антенны может быть проведена на основании принципа электродинамического подобия.

На рис. 4 приведены характеристики регулярного экрана, образованного взаимоперпендикулярными рамками незамкнутого типа при ориентации перпендикулярных элементов с разрезами, направленными в сторону антенны.

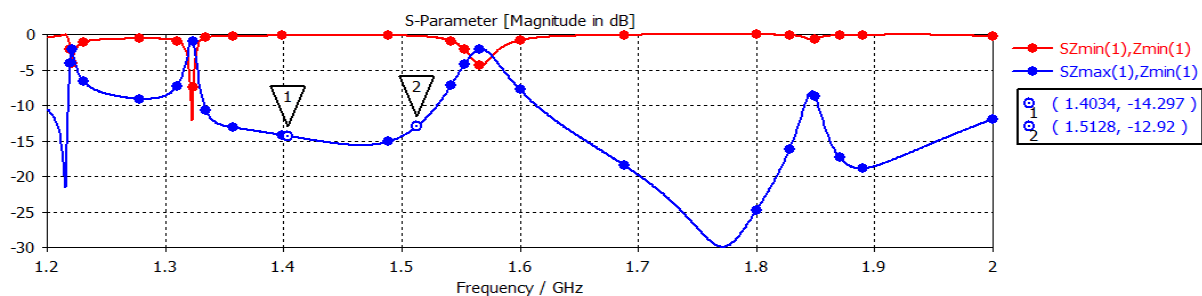


Рис. 4. График зависимости от частоты S -параметров регулярного экрана, образованного взаимоперпендикулярными рамками незамкнутого типа

В результате их анализа было решено численно исследовать характеристики системы экран-антенна с ограниченным размером экрана в диапазоне 1,4–1,72 ГГц и определить эффективность и показатель качества.

При численном моделировании определялись пространственные ДН, на основании которых можно определить их эффективность в соответствии с выражениями (1, 2). Типичный вид пространственной ДН системы экран антенна приведен на рис. 5.

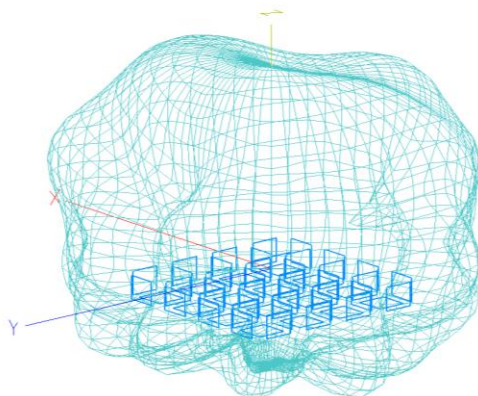


Рис. 5. Внешний вид пространственной ДН системы экран-антенна

На рис. 6 приведена частотная зависимость показателя качества и интегрального коэффициента усиления в положительной области наблюдений.

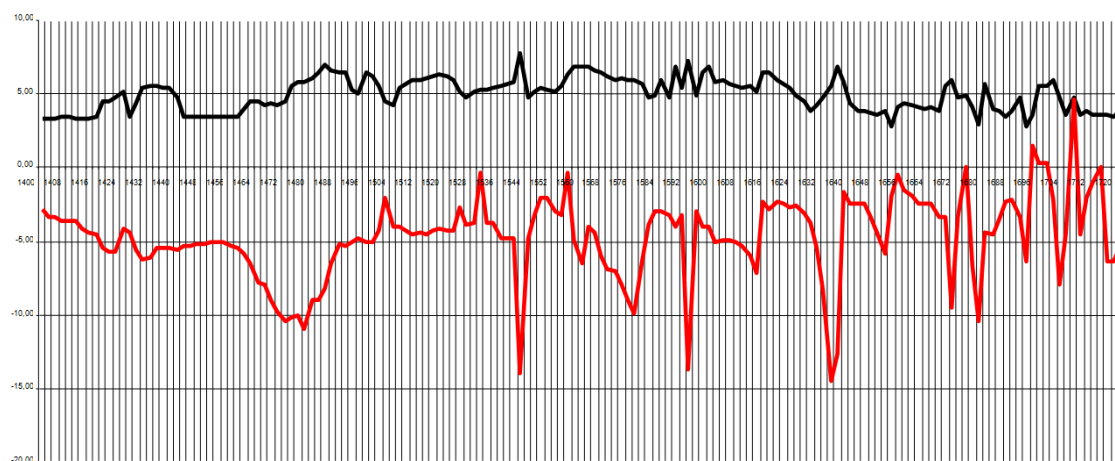


Рис. 6. Частотные зависимости P^+ (верхняя кривая) и P/P^+ (нижняя кривая) для случая антенны, расположенной на экране с разомкнутыми рамками

Из приведенных зависимостей видно, что они, в основном, носят неперриодический характер с большой амплитудой, однако в некоторых участках частотного диапазона

наблюдаются относительно небольшие колебания показателей качества, которые составляют 1–2 дБ, а также им сопутствует приемлемый коэффициент усиления (2–6 дБ) системы экран антенна в положительной области пространства. Расчеты пространственных ДН на этих частотах показали, что ДН далеки от идеальных, что и следовало ожидать. Они иногда содержат провалы в уровнях принимаемого сигнала из положительных областей, однако в целом характеризуются уменьшенным уровнем сигнала в нежелательных областях. Эти провалы, по-видимому, обусловлены продольными резонансами в экране. Однако узкая относительная полоса частот не позволяет надеяться на их эффективное использование в АП ГНСС. Исключение составляет диапазон 1440–1480 мГц, где интегральный коэффициент усиления в области полезных направлений меняется не так резко. Его уровень составляет 4–6 дБ, как и следовало ожидать. В этом же частотном диапазоне наблюдается стабильное улучшение показателя качества, который показывает на ослабление сигнала в нежелательной области пространства до уровня от –5 до –10 дБ. Сравнительный анализ различных типов экранов проводился экспериментальным путем. Антенная система с экраном помещалась на диэлектрическом основании высотой 1,2 м. При этом фиксировалась среднеквадратичная ошибка в определении координат на протяжении 40 мин, это время достаточно для существенного изменения углов наблюдения спутникового «созвездия». При применении всех типов экранов зафиксировано уменьшение ошибки в определении линейных координат на 1–2 м.

Заключение

Теоретическими численными методами и экспериментальным путем исследованы несколько видов экранов с целью определения пригодности их использования в приемных устройствах систем спутниковой навигации. Конструктивными требованиями к типам экранов являлись их габариты, которые в используемом состоянии должны быть намного больше рабочей длины волны. Исходя из этого критерия, перспективными могут быть метаматериальные экраны и поглощающие экраны кассетного типа, которые допускают их складывание в портативную конструкцию в нерабочем состоянии. Результаты исследований показали, что применение поглощающих и метаматериальных экранов позволяет уменьшить уровень излучения, принимаемого из областей пространства, и достичь подавления сигналов на 5–15 дБ. Натурные испытания показали снижение среднеквадратичной ошибки определения координат при использовании абонентских приемников с полосковыми антеннами на 1–1,5 м.

Список литературы

1. Власов И.Б. Глобальные навигационные спутниковые системы. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. 180 с.
2. Захарьев Л.Н., Леманский А.А., Щеглов К.С. Теория излучения поверхностных антенн. М.: Советское радио, 1969. 232 с.
3. Третьяков С.А. Бианизотропные материалы с сильным электромагнитным взаимодействием / Проблемы физики, математики и техники. 2011. № 2 (7). С. 49–51.
4. Банков С.Е. Антенны спутниковых навигаторов. М.: Изд-во «Перо», 2014. 693 с.
5. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы // Электроника: НТБ. 2009. № 7. С. 70–79.

References

1. Vlasov I.B. Global'nye navigacionnye sputnikovyje sistemy. M.: MGTU im. N.Je. Baumana, 2008. 180 s. (in Russ.)
2. Zahar'ev L.N., Lemanskij A.A., Shhegl'ov K.S. Teorija izlucheniya poverhnostnyh antenn. M.: Sovetskoe radio, 1969. 232 s. (in Russ.)
3. Tret'jakov S.A. Bianizotropnye materialy s sil'nym jelektromagnitnym vzaimodejstviem / Problemy fiziki, matematiki i tehniki. 2011. № 2 (7). S. 49–51. (in Russ.)
4. Bankov S.E. Antenny sputnikovyh navigatorov. M.: Izd-vo «Pero», 2014. 693 s. (in Russ.)
5. Sljusar V. Metamaterialy v antennoj tehnike: istorija i osnovnye principy // Jelektronika: NTB. 2009. № 7. S. 70–79. (in Russ.)

Сведения об авторах

Абукраа А.С., аспирант кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Вилькоцкий М.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры информатики и основ электроники Белорусского государственного педагогического университета им. М. Танка.

Адрес для корреспонденции

220050, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Советская, д. 18,
Белорусский государственный педагогический
университет им. М. Танка
тел. +375-29-651-05-01;
e-mail: janmar@mail.ru;
Вилькоцкий Марат Антонович

Information about the authors

Abukraa A.S., PG student of information security department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Vilkotsky M.A., D. Sci., professor, professor of informatics and electronics basics department of Belarusian state pedagogical university named after M. Tank.

Address for correspondence

220050, Republic of Belarus,
Minsk, Sovetskaya st., 34,
Belarusian state pedagogical
university named after M. Tank
tel. +375-29-651-05-01;
e-mail: janmar@mail.ru;
Vilkotsky Marat Antonovich