



ВОЕННЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВОЕННО-ВОЗДУШНЫХ СИЛ
«ВОЕННО-ВОЗДУШНАЯ АКАДЕМИЯ имени профессора
Н.Е. ЖУКОВСКОГО И Ю.А. ГАГАРИНА» (г. Воронеж)

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПРИЕМНЫХ СТРУКТУР МОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ СКРЫТНОГО РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Авторы:

д.ф.-м.н., доцент Разиньков С.Н., к.т.н. Разинькова О.Э.,
Евсеев А.В., Сторожук Ю.В.

Воронеж – 2023 год

Актуальность темы исследования. Для скрытного мониторинга радиоэлектронной обстановки находят применение радиотехнические комплексы на мобильных носителях, характеризующиеся низкими уровнями фоновой контрастности. Перечень ключевых вопросов создания мобильных комплексов с возможностями скрытного применения включает поиск технических решений по разработке их приемных структур. Облик структур определяется на основе компромиссных технических решений при совместном выполнении противоречивых требований к эффективности приема информационных сигналов и степени проявления комплексов в информационных полях систем дистанционного контроля (СДК).

Цель работы – обоснование выбора методов анализа и синтеза приемных структур мобильных комплексов радиотехнического мониторинга с требуемыми показателями скрытности от СДК.

Для достижения цели необходимо решить две группы задач:

- задачи электродинамического **анализа** приемных структур для установления взаимосвязей характеристик усиления, пространственно-частотной избирательности приема и вторичного излучения сигналов параметрами конструкций;
- задачи **синтеза**, суть которых состоит в нахождении параметров конструкций приемных структур для реализации требуемых приемных и рассеивающих свойств на основе взаимосвязей, найденных по результатам анализа.

Электродинамический анализ приемных структур мобильных комплексов мониторинга выполняется в интересах решения взаимодополняющих задач:

1. Исследование базовых компонентов конструкций и структур в целом с установлением взаимосвязей их параметров с характеристиками приема и рассеяния сигналов.
2. Оценка эффективности приема и вторичного излучения сигналов приемных структур на несущих поверхностях мобильных носителей.

Для решения указанных задач разрабатываются:

1. Метод исследования характеристик компонентов структур в режиме приема импульсных волновых процессов. В отличие ранее известных методов, разработанных для анализа узкополосных приемных структур и базирующихся на поиске решений векторных краевых задач в виде бесконечных рядов пространственных гармоник стационарных токов, он основан на нахождении пространственно-временного распределения токов в виде пространственных и временных базисных функций, что позволяет исследовать широкополосные структуры.

2. Модели широкополосных приемных структур. В отличие от ранее известных моделей, предназначенных для расчета характеристик узкополосных структур, возбуждаемых монохроматическими волновыми процессами, в моделях широкополосных структур устанавливаются взаимосвязи между пространственно-временными распределениями токов и облучающего поля в условиях нестационарного возбуждения, что позволяет исследовать закономерности приема и рассеяния широкополосных сигналов и излучений с перестраиваемыми частотно-временными параметрами.

Модели приемных структур в виде решеток элементарных щелей

Электродинамическая модель приемной структуры в виде решетки элементарных щелей, расположенной на фюзеляже беспилотного летательного аппарата из металлодиэлектрического материала

$$\dot{F}_\theta(\theta, \varphi) = \frac{2\pi^2\mu_0 I_0 a}{\lambda^2} \left[2 \cos \varphi \cos \theta \exp \left(j \frac{2\pi a}{\lambda} \cos \varphi \sin \theta \right) \sum_{n=1}^N i_n^* \exp \left(j \frac{2\pi a}{\lambda} \cos \varphi \sin \theta \right) - \sum_{n=1}^N i_n^* \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m j^m \cos(m\varphi) \gamma_{nm}^\theta \right], \quad (1)$$

$$\dot{F}_\varphi(\theta, \varphi) = -\frac{2\pi^2\mu_0 I_0 a}{\lambda^2} \left[2 \sin \varphi \exp \left(j \frac{2\pi a}{\lambda} \cos \varphi \sin \theta \right) \sum_{n=1}^N i_n^* \exp \left(j \frac{2\pi a}{\lambda} \cos \varphi \sin \theta \right) - \sum_{n=1}^N i_n^* \sum_{m=1}^{\infty} \varepsilon_m j^m \sin(m\varphi) \gamma_{nm}^\varphi \right], \quad (2)$$

где i_n – комплексная амплитуда тока элементарного вибратора, γ_{nm}^θ и γ_{nm}^φ – коэффициенты меридиональных (θ) и азимутальных (φ) составляющих токов, эквивалентных распределению электрического поля несущей поверхности: $n, m = 1, \dots, N$

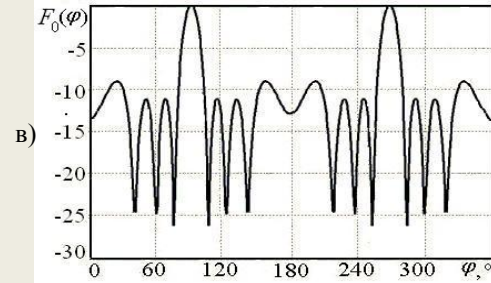
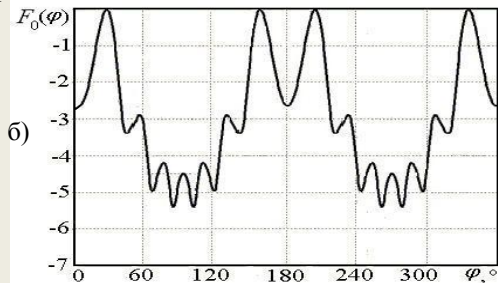
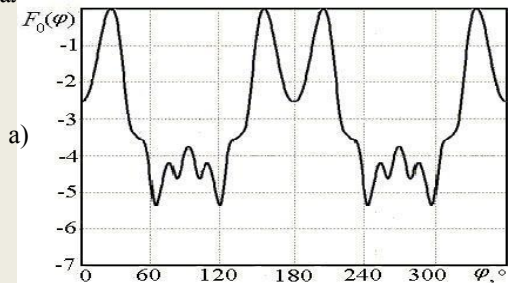


Рисунок 1 – Функции пространственно-частотной избирательности приемной структуры из $N=3$ (а, б) и $N=5$ (в) щелей, расположенных с шагом $d/\lambda=0,25$ (а, в) и $d/\lambda=0,5$ (б), фюзеляже беспилотного летательного аппарата длиной $h/\lambda=6,3$ с радиусом поперечного сечения $a/\lambda=0,35$ удалении от края $d_n/\lambda=0,1$

Электродинамическая модель приемной структуры в виде решетки элементарных щелей, расположенной на проводящем фюзеляже беспилотного летательного аппарата

$$D_{n\theta}(\theta, \varphi) = \frac{2\pi^2\mu_0 I_0 a}{\lambda^2} \left[2 \cos \theta \cos \varphi \exp \left(j \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta \cos \varphi \right) - \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m j^m \cos(m\varphi) \gamma_{nm}^\theta \right], \quad (3)$$

$$D_{n\varphi}(\theta, \varphi) = -\frac{2\pi^2\mu_0 I_0 a}{\lambda^2} \left[2 \sin \varphi \exp \left(j \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta \cos \varphi \right) - \sum_{m=1}^{\infty} j^m \sin(m\varphi) \gamma_{nm}^\varphi \right], \quad (4)$$

где I_0 – длина элементарного вибратора

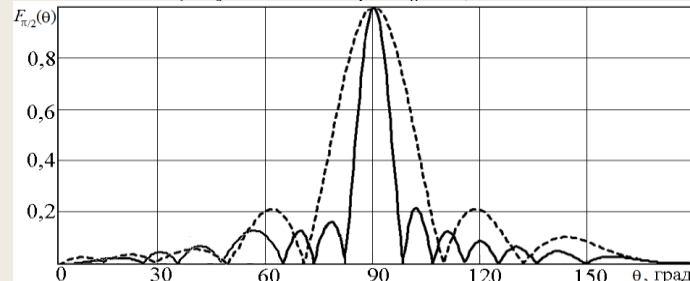


Рисунок 2 – Функции пространственно-частотной избирательности приемной структуры из 6 (пунктирная линия) и 14 (сплошная линия) щелей

При синтезе решеток применяются следующие критерии:

1. Критерий минимума среднеквадратического отклонения (СКО) функции пространственно-частотной избирательности приема сигналов от заданной формы.
2. Критерий минимума СКО квадрата функции пространственно-частотной избирательности приема сигналов от требуемой формы.

Общий недостаток критериев :

- нахождение токов антенных решеток сводится к решению математически некорректных задач методами нелинейного программирования с применением неформализованных процедур регуляризации;

- при малых электрических размерах, характерных для приемных структур целевых нагрузок комплексов на малогабаритных носителях, формирование нулей в направлениях локальных экстремумов в секторах ближних боковых лепестков сопровождается повышением уровня дальних боковых лепестков, что способствует ухудшению помехозащищенности приемника.

Подавление среднего уровня боковых лепестков функции пространственно-частотной избирательности приема за счет увеличения числа нулей функций пространственно-частотной избирательности сопровождается потерями усиления сигналов, приводящими к уменьшению чувствительности аппаратуры.

Разработан метод синтеза приемных структур с максимальным усилением и минимальным уровнем вторичного излучения сигналов, достижимыми при установленных формах функций пространственно-частотной избирательности приема на множестве направлений без минимизации среднего уровня боковых лепестков.

Расчет токов элементов приемных структур проводится в рамках оптимизации показателей направленности использованием метода неопределенных множителей Лагранжа.

Фиксация показателей избирательности для определенных угловых положений при отсутствии требований к форме боковых лепестков приводит к снижению потерь усиления сигналов в приемной структуре.

Расчет распределения токов с параметрами в виде неопределенных множителей Лагранжа критерий основан на решении системы линейных уравнений с частичным обращением матрицы, элементами которой являются парциальные диаграммы антенных элементов. Показано, что токи, удовлетворяющие используемому критерию, обеспечивают совпадение функции пространственно-частотной в области главного луча с формами, достижимыми при применении критериев с минимизацией СКО функции и ее квадрата от заданной формы.

Основные этапы метода синтеза приемных структур мобильных комплексов скрытного радиотехнического мониторинга

Критерий синтеза приемной структуры

$$\hat{i}_n = \arg \max_{i_n} G(\theta_0, \varphi_0) \left| \begin{array}{l} \dot{F}(\theta_q, \varphi_q) = \alpha_q, \\ q = 1, \dots, Q, \quad Q \leq N - 1; \end{array} \right. \quad (5)$$

Функционал с экстремальным значением при неизвестных множителях Лагранжа

$$\Phi = \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^N i_n^* \dot{\gamma}_{np} i_p + \sum_{q=0}^Q \lambda_q \sum_{n=1}^N \dot{f}_n(\theta_q, \varphi_q) i_n^*; \quad (6)$$

где λ_q – неизвестные множители Лагранжа, $q = 1, \dots, Q, Q \leq N - 1$;

Параметрическое распределение токов элементов приемных структур

$$i_n = - \sum_{q=0}^Q \lambda_q^* \sum_{p=1}^N \dot{\gamma}_{np}^{-1} f_p(\theta_q, \varphi_q), \quad n = 1, \dots, N; \quad (7)$$

где $\dot{\gamma}_{np}^{-1}$ – элементы матрицы, обратной $\dot{\gamma}_{np}$, ($n, p=1, \dots, N$)

Система линейных алгебраических уравнений для неопределенных множителей Лагранжа

$$\sum_{s=0}^Q \lambda_s^* \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^N \dot{f}_n(\theta_q, \varphi_q) \dot{\gamma}_{np}^{-1} \dot{f}_p(\theta_s, \varphi_s) = -\alpha_q, \quad q = 1, \dots, Q \quad (8)$$

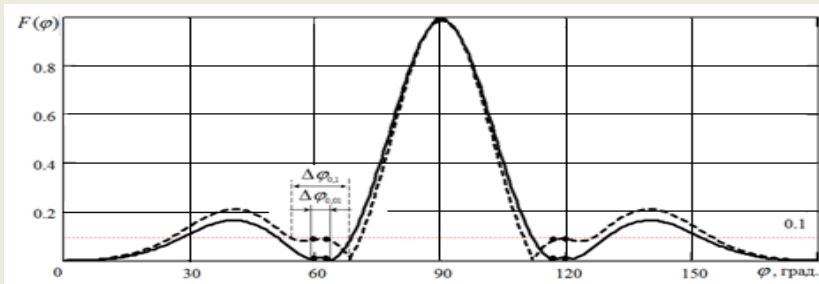


Рисунок 3 – Функции пространственно-частотной избирательности приемных структур из 6 элементов с шагом $0,3\lambda$ с 4 нулями глубиной 0,01 (пунктирная линия) и 0,1 (сплошная линия), расположенной на плоском экране шириной $0,6\lambda$

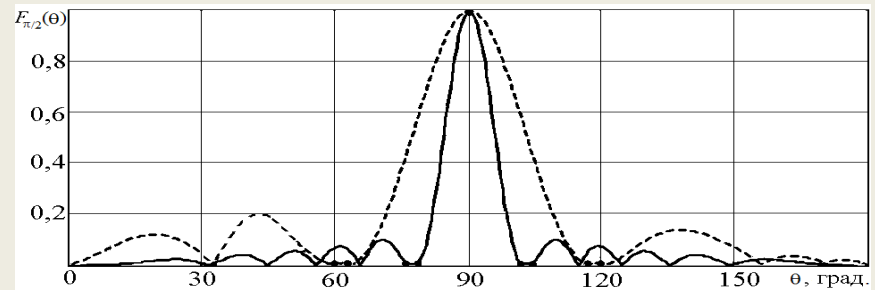


Рисунок 4 – Функции пространственно-частотной избирательности приемных структур из 6 (пунктирная линия) и 14 (сплошная линия) элементов с шагом $d\lambda = 0,2$, расположенных на боковой поверхности цилиндра длиной $9,2\lambda$, при фиксированных на уровне 0,01 значениях в $Q=5$ направлениях

1. Разработаны электродинамические модели и метод анализа приемных структур, позволяющие установить взаимосвязи параметров их конструкций с характеристиками приема и рассеяния сигналов.
2. Предложены критерии и метод синтеза структуры с максимальным усилением и минимальным уровнем вторичного излучения сигналов при установлении ограничений на функции пространственно-частотной избирательности с использованием аппарата неопределенных множителей Лагранжа.
3. Показано что, предпочтительным для получения заданной функции пространственно-частотной избирательности с минимизацией потерь усиления сигналов в приемной структуре является критерий, базирующийся на контроле соответствия формируемой и требуемой функций на множестве фиксированных направлений и частот.
4. Оценены возможности применения методов анализа и синтеза приемных структур для обоснования технических путей построения мобильных комплексов радиотехнического мониторинга с высокими показателями эффективности выполнения задач и защищенности от СДК.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!