



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.1>

УДК: 621.396.663

ПАРЕТО-ОПТИМИЗАЦИЯ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ ШИРОКОПОЛОСНОГО РАДИОПЕЛЕНГАТОРА ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ МОБИЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ

Е.А. Макарецкий, А.В. Овчинников, А.С. Гублин

Тульский государственный университет
300012 г. Тула, пр. Ленина 92

Статья поступила в редакцию 20 июня 2024 г.

Аннотация. Проведены сравнительный анализ и оптимизация антенных систем широкополосного радиопеленгатора для малогабаритных мобильных платформ. Оптимизация проводилась по шести показателям антенной системы (КСВ, габариты, коэффициент усиления, отношение Front/Back, поляризация, изменение формы диаграммы направленности в диапазоне частот). Полученные результаты показали не перспективность использования комбинированных антенных систем (включающих несколько антенн для поддиапазонов).

Ключевые слова: антенная система, радиопеленгатор, парето-оптимизация.

Финансирование: Работы проводились при финансовой поддержке гранта Правительства Тульской области №ДС/120/РЭ/23/ТО

Автор для переписки: Макарецкий Евгений Александрович,
makaretsky@mail.ru

Введение

Решение современных задач контроля над излучениями радиоэлектронных средств и радиоразведки ставит задачу совершенствования средств мониторинга радиоэфира [1]. Широкое распространение малогабаритных мобильных платформ (ММП) воздушного, морского и наземного базирования дает возможность существенного расширения охвата контролируемых территорий и повышения точности определения координат источников радиоизлучения (ИРИ).

Для реализации данных возможностей необходима разработка малогабаритных широкодиапазонных пеленгаторов, которые могут быть расположены на ММП. Одним из основных элементов пеленгатора является антенна, измеряющая направления на ИРИ, по совокупности которых могут быть рассчитаны их координаты [2].

Целью данной работы является обоснование оптимального типа антенной системы для пеленгаторов, размещенных на ММП.

1. Анализ требований к антеннам малогабаритных пеленгаторов

Расположение пеленгаторных антенн на ММП предъявляет комплекс требований к их характеристикам, которые можно разделить на электрические и конструктивные.

Основными электрическими характеристиками являются:

1) Полоса рабочих частот, обычно ограничивающаяся рассогласованием антенны и фидерного тракта, что приводит к потерям мощности принимаемого сигнала, или недопустимыми изменениями параметров диаграммы направленности.

Современные задачи пеленгации ИРИ в гражданской и оборонной сферах требуют обеспечения мониторинга в диапазоне частот порядка 0,1...13 ГГц. В этом диапазоне могут работать несанкционированные радиостанции связи и управления, каналы подавления систем GPS и ГЛОНАСС (1,2...1,6 ГГц), Wi-Fi (2,4...7,2 ГГц), WiMax (2,4...13,6 ГГц). Для ММП по соображениям

габаритов антенн и дальности связи наибольший интерес представляет диапазон 0,4...8 ГГц, в котором располагается наибольшее число каналов различного назначения.

2) Коэффициент стоячей волны (КСВ), определяющий режим работы линии передачи сигнала антенна-приемник и коэффициент полезного действия (КПД) η этой линии:

$$\eta = \frac{(1 + KCB)^2}{4KCB} .$$

Требования по согласованию антенной системы обычно задаются порядка $KCB \leq 2$, при которых КПД фидерного тракта не менее 0,9.

3) Коэффициент усиления антенны G , показывающий энергетический выигрыш направленной антенны по сравнению с изотропной (ненаправленной); эта характеристика непосредственно зависит от ширины диаграммы направленности (ДН) антенны $\Delta\theta_{0,5}$, определяющей погрешность пеленгации углового направления. Для получения малой погрешности пеленгации желательно иметь максимально возможный коэффициент усиления, но при этом увеличиваются размеры антенны, что существенно для ММП.

4) Поляризационные свойства. В зависимости от них может изменяться уровень принимаемого сигнала (при ортогональных поляризациях электромагнитной волны и приемной антенны прием отсутствует). Учитывая возможные изменения положения в пространстве ММП (особенно авиационных и морского типов), целесообразно использовать антенны с круговой поляризацией.

Основными конструктивными характеристиками пеленгационной антенны являются габариты, масса и аэродинамическое сопротивление (для авиационных ММП). Габариты (размеры) авиационных ММП в зависимости от назначения могут составлять от единиц до десятков сантиметров, что существенно ограничивает возможность создания антенн

с высоким коэффициентом усиления и малой погрешностью пеленгации направления на ИРИ.

2. Выбор метода пеленгации источника излучения

Учитывая жесткие ограничения по габаритам и практическую невозможность применения антенн с узкой диаграммой направленности, целесообразно формировать двухэлементную антенную систему для измерения угла азимута по фазовой суммарно-разностной схеме. Поскольку фазовая суммарно-разностная схема имеет узкий угловой диапазон измерений, то измерение пеленга должно проводиться в два этапа: на первом используется суммарный канал и производится грубое измерение пеленга (погрешность при этом определяется шириной диаграммы направленности суммарного канала), а на втором – точное измерение $S(\theta)$ по разностным сигналам:

$$S(\theta) = S_0 \operatorname{tg} \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right),$$

где λ – длина волны. Погрешность измерений в этом случае зависит от базы d (расстояния между фазовыми центрами антенн) и точности фазового детектора.



Рис.1. Структурная схема пеленгатора.

Структурная схема подобного пеленгатора (рис.1) включает две идентичные антенны, суммарно-разностную схему, панорамный радиоприемник и блок обработки, в котором производится вычисление азимута ИРИ.

3. Методика оптимизации типа антенны пеленгатора

Антенна пеленгатора должна удовлетворять перечисленным требованиям. Как любое инженерное решение, выбор наилучшего типа устройства представляет собой процесс многокритериальной оптимизации, который с одной стороны, отличается существенной сложностью, а с другой – не дает однозначного решения.

Один из распространенных методов теории многокритериальной оптимизации – это построение множества Парето. Множество Парето представляет собой набор всех компромиссных решений, которые удовлетворяют принципу Парето – нет такого решения, которое бы улучшило хотя бы одну из целей, не ухудшив при этом другие. Построение множества Парето позволяет получить полную картину компромиссов между различными критериями и найти наиболее эффективные решения из множества Парето.

Используем сравнительно простой метод негативных взвешиваний (Weighted Sum Method). В этом подходе каждому критерию присваивается весовой коэффициент, отражающий его относительную важность. Затем оптимизируется линейная комбинация критериев с учетом весов, что позволяет найти оптимальные компромиссные решения [3].

Для проведения Парето-оптимизации требуется сформировать критерии оптимизации, достаточно полно описывающие характеристики антенны и допускающие количественное определение. Наиболее эффективной системе должен соответствовать минимальный показатель эффективности.

Предварительно конкретизируем требования к антенне. Будем осуществлять поиск наиболее эффективных антенн для ММП в диапазоне частот 0,4...8 ГГц. Поскольку используется суммарно-разностная схема, базовый излучатель может не иметь высокого коэффициента усиления и в его качестве может использоваться слабонаправленная антенна. Даже в случае использования излучателей с двумя противоположно направленными главными лепестками возможно устранение неоднозначности местоопределения в процессе обработки информации от нескольких пеленгаторов. Однако направленная антенна

позволяет снизить уровень помех, проходящих в приемник и за счет этого имеет преимущества.

Поскольку требуемый диапазон частот принципиально может быть обеспечен одной частотно-независимой антенной или несколькими диапазонными антеннами, необходимо рассмотреть подобные варианты. При проведении оптимизации максимальный размер ММП (и соответственно максимальный размер антенны) был выбран равным 0,5 м.

Основными критериями при оптимизации выбраны:

- коэффициент стоячей волны ($P1 = KCB$);
- габариты антенны; в качестве габаритов оценивается объем антенны в дм^3 (литрах) $P2 = V$;
- коэффициент усиления антенны (в относительных единицах), $P3 = 1/G$;
- поляризационные свойства антенны оцениваются потерями мощности при приеме сигнала круговой поляризации (для линейной поляризации антенны 3 дБ, т.е. $P4 = 2$ раза; для круговой поляризации $P4 = 1$);
- отношение уровня сигналов с главного $\theta = 0$ ($F - \text{Front}$) и заднего $\theta = 180^\circ$ ($B - \text{Back}$) направлений $P5 = V/F$;
- изменение формы главного лепестка в диапазоне рабочих частот (появление провала в главном направлении) $P6 = F_{\max} / F_0$, где F_{\max} – максимальное значение главного лепестка ДН; F_0 – значение ДН для главного направления $\theta = 0$.

Существует большое количество различных типов и разновидностей антенн, отличающихся по своим характеристикам и конструкции. При проведении оптимизации использовались следующие варианты:

- V1) печатная логопериодическая антенна для диапазона частот 0,4...8 ГГц;
- V2) планарная спиральная антенна для диапазона частот 0,4...8 ГГц;
- V3) антенна Вивальди для диапазона частот 0,4...8 ГГц;
- V4) планарные вибраторные антенны типа Bowtie для диапазона частот 0,4...1 ГГц и планарная спиральная антенна для диапазона частот 1...8 ГГц;

В5) штыревые антенны (монополи) для диапазона частот 0,4...1 ГГц и печатная логопериодическая антенна для диапазона частот 1...8 ГГц;

В6) диско-конусная антенна для диапазона частот 0,4...1 ГГц и планарная спиральная антенна для диапазона частот 1...8 ГГц;

В7) коническая спиральная антенна для диапазона частот 0,4...1 ГГц и печатная логопериодическая антенна для диапазона частот 1...8 ГГц;

В8) коническая спиральная антенна для диапазона частот 0,4...1 ГГц и антенна Вивальди для диапазона частот 1...8 ГГц;

В9) антенна Вивальди с круговой поляризацией для диапазона частот 0,4...8 ГГц;

В10) планарная спиральная антенна для диапазона частот 0,4...8 ГГц с отражателем для создания одного главного максимума;

В11) извилистая коническая спиральная антенна (Sinuous spiral antenna) для диапазона частот 0,4...8 ГГц.

Обычно весовые коэффициенты рассматриваются как общие показатели относительной важности для каждой целевой функции. Однако выбор набора весовых коэффициентов, отражающих предпочтение той или иной цели, может быть затруднен, поскольку предпочтения, как правило, нечеткие. При Парето-оптимизации коэффициенты определяет ЛПР – лицо, принимающее решение, в данном случае – авторы.

Весовые коэффициенты оптимизации для частных показателей эффективности были выбраны следующими:

$$V_1 = 0,2; V_2 = 0,3; V_3 = 0,15; V_4 = 0,1; V_5 = 0,15; V_6 = 0,1$$

Результирующий показатель эффективности PE рассчитывался по соотношению:

$$PE_n = \sum_{i=1}^I \left[V_i \sum_{n=1}^{N_n} P_n \right],$$

где I – количество критериев эффективности; V_i – весовые коэффициенты оптимизации; N_n – количество излучателей в антенной системе; P_n – частные критерии эффективности n – го варианта излучателя антенной системы.

Для определения частных критериев эффективности всех перечисленных антенн были разработаны их конструкции и проведено электромагнитное моделирование в программе ANSYS HFSS.

4. Результаты Парето-оптимизации типа антенны

На рис.2 приведены результаты Парето-оптимизации типа антенны для ММП.



Рис. 2. Результирующие показатели эффективности различных типов антенн для ММП (номера вариантов соответствуют приведенным выше)

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

1) Целесообразно применение одной частотно-независимой антенны, а не комбинации нескольких антенн различных типов (комбинированные варианты B4-B8).

2) При принятых допущениях наилучшим вариантом является плоская спиральная антенна, перекрывающая весь заданный диапазон частот с $K_{СВ} \leq 1,5$; ориентировочный объем антенны $0,05 \text{ дм}^3$ при коэффициенте усиления $5 \dots 7 \text{ дБ}$.

3) Близкие характеристики имеет планарная спиральная антенна с отражателем для создания одного главного максимума; она отличается увеличенным объемом, поскольку при использовании отражателя перекрытие по

частоте спиральной антенны не превышает четырех [4] и необходимо использовать несколько излучателей, что приводит к значительному увеличению объема (приблизительно до $0,5 \text{ дм}^3$).

4) Близкие результаты имеют частотно-независимые планарная логопериодическая антенна и антенна Вивальди. Логопериодическая антенна имеет $KCB \leq 2$; ориентировочный объем антенны $0,285 \text{ дм}^3$ при коэффициенте усиления $7...10 \text{ дБ}$. Антенна Вивальди имеет $KCB \leq 2,7$; ориентировочный объем антенны $0,12 \text{ дм}^3$ при коэффициенте усиления $4...6 \text{ дБ}$. Практически не отличается по эффективности Антенна Вивальди с круговой поляризацией (при этом используются две совмещенные антенны, повернутые на 90°). Объем при этом увеличивается приблизительно до $0,3 \text{ дм}^3$.

5) Потенциально перспективная извилистая коническая спиральная антенна (В11) существенно отстает по результирующей эффективности из-за большого объема (3 дм^3) несмотря на хорошее согласование ($KCB \leq 2$) и усиление $5...7 \text{ дБ}$.

Заключение

Проведенный анализ на основе Парето-оптимизации по шести показателям (KCB , габариты, коэффициент усиления, отношение Front/Back, поляризация, изменение формы диаграммы направленности в диапазоне частот) показал, что для реализации антенной системы радиопеленгатора в широком диапазоне частот ($0,4...8 \text{ ГГц}$) целесообразно применение частотно-независимых антенн. Комбинированные антенные системы (из нескольких типов антенн для нескольких поддиапазонов) отличаются значительно меньшей эффективностью.

Наиболее эффективными решениями по результатам оптимизации являются (по мере снижения эффективности) плоская спиральная антенна, логопериодическая антенна и антенна Вивальди.

Финансирование: Работы проводились при финансовой поддержке гранта Правительства Тульской области №ДС/120/РЭ/23/ТО

Литература

1. Концепция развития системы контроля за излучениями радиоэлектронных средств и (или) высокочастотных устройств гражданского назначения в Российской Федерации на период до 2025 года Утверждена решением ГКРЧ от 4 июля 2017 г. № 17-42-06.
2. Сайбель А.Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. Государственное издательство оборонной промышленности. М.: 1958. 56 с.
3. R. Timothy Marler, Jasbir Singh Arora. The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights// Structural and Multidisciplinary Optimization 41(6) June 2010. PP. 853-862.
4. Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. Спиральные антенны. М.: Сов. радио. 1974, 224 с.

Для цитирования:

Макарецкий Е.А., Овчинников А.В., Гублин А.С. Парето-оптимизация антенной системы широкополосного радиопеленгатора для малогабаритных мобильных платформ. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.1>