

МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПО КРИТЕРИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ НА ОСНОВЕ МАРКЕТИНГОВЫХ ДАННЫХ

А.А. Трублин

Харьковский институт Военно-Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба

Приведена методика решения задачи оптимального синтеза избирательных устройств радиоприемных средств по критерию электромагнитной совместимости на основе маркетинговых данных.

* * *

Наведено методику рішення задачі оптимального синтезу вибіркового пристроїв радіоприймальних засобів за критерієм електромагнітної сумісності на основі маркетингових даних.

* * *

The method of solution of task of optimum (according to electromagnetic compatibility criterion) synthesis of radioelectronic means selective devices based on the marketing data has cited.

Введение

В общем случае под оптимизацией радиоэлектронных средств понимают процесс их рационального в определенном смысле построения. Сложность радиоэлектронной аппаратуры является причиной сложности нахождения связей и зависимостей, необходимых для математической формализации и четкой постановки задач оптимизации [1].

Тем не менее, оптимизация актуальна для всех радиоэлектронных средств и дает значительный эффект, как при массовом производстве аппаратуры, так и создании уникальных РЭС.

Анализ проблемы оптимального синтеза

Основными из многочисленных требований к радиоэлектронным средствам являются: точность воспроизведения сообщения, помехозащищенность, пропускная способность, электромагнитная совместимость, надежность, малые масса и габаритные размеры, возможно меньшая стоимость.

Все эти требования характеризуются соответствующими показателями k_1, k_2, \dots, k_n , называемыми показателями качества. Упорядоченная совокупность $\vec{K} = (k_1, \dots, k_n)$ образует вектор качества \vec{K} радиоэлектронного средства.

Выбор вектора качества в основном определяется тактико-техническими требованиями к системе.

Основным критерием, которым следует руководствоваться при определении глобального качества, является отыскание компромисса между параметрами, полнотой и точностью описания, с одной стороны, и простотой использования, с другой.

Из всех допустимых систем оптимальной считается та, которая обладает наилучшим в определенном смысле значением вектора \vec{K} выбранных показателей качества. Для выбора оптимальной системы должен быть установлен и обоснован критерий предпочтения, то есть, выбрано правило, на основании которого один вектор \vec{K}_i можно было бы считать лучшим (худшим), чем вектор \vec{K}_j . Синтез системы, проводимый с использованием вектора качества \vec{K} , называют векторным.

Выбор критерия оптимизации

Существуют безусловный и условный критерии предпочтения.

Безусловный критерий предпочтения [1] рассчитан на выбор варианта системы, для которого все показатели не хуже, чем у конкурирующих вариантов, а один или несколько показателей лучше. Таким критерием часто не удается воспользоваться, поскольку различные варианты имеют преимущества по разным показателям.

Условный критерий предпочтения (УКП) осно-

ван на введении результирующего показателя качества – критерия. Если возможно получить такой критерий, то можно определить его оптимальное значение и соответствующий ему вектор оптимальных (по этому критерию) параметров \vec{X}_{opt} . Под оптимальным значением критерия оптимальности понимается одно из трех правил, или требований к общему показателю качества [2]:

- требование экстремального значения (extr),
- требование лучшего, наименьшего значения (infimum),
- требование выбора значения, основанного на принципе достаточности.

Идеальным функционалом цели является вероятность достижения цели $p_{ц} = p_{ц}(\vec{K}(\vec{X}))$, которая зависела бы от всех $\vec{K}(\vec{X})$. Для нее, задавшись допустимым значением вероятности достижения цели $p_{ц доп}$, можно было бы определить оптимальность по третьему типу. Однако, чаще всего функционал $f[\vec{K}(\vec{X})]$ определить не удается [2].

Поэтому чаще используются следующие три используемых критерия оптимальности:

1) взвешенный критерий

$$f = \min_{\{\vec{X}\}} \sum_{i=1}^n \xi_i k_i(\vec{X});$$

2) относительный критерий

$$f = \min_{\{\vec{X}\}} \frac{\sum_{j=1}^m \xi_j k_j(\vec{X})}{\sum_{k=1}^n \xi_k k_k(\vec{X})},$$

где k_j – показатели эффектов функционирования, таких, что чем они больше, тем лучше, k_k – затратные показатели.

Достоинствами этих двух критериев оптимальности является их простота. Однако они обладают существенным недостатком: эвристика и произвол в выборе коэффициентов ξ .

3) условный экстремум

$$f = \min_{\{\vec{X}\}} k_1(\vec{X})$$

при $k_2(\vec{X}) \leq k_{2 доп},$
 $\dots\dots\dots,$
 $k_n(\vec{X}) \leq k_{n доп},$

где $k_{i доп}$ – допустимое значение $k_i(\vec{X})$.

Его достоинства в том, что в нем нет эвристических коэффициентов ξ_i и неограничен диапазон затратных показателей. Его недостатками являются сложность решения задачи большой размерности и с большим числом показателей качества и возможно различное решение задачи при выборе других целевых функций.

Анализ маркетинговых данных

Практически все основные показатели качества, в том числе стоимость, являются значимыми и равноправными. Несмотря на свою нестабильность, стоимость имеет следующие положительные свойства:

- стоимость является мерой качества и количества вложенного труда, и потому, считая организацию труда оптимальной, стоимость однозначно связана с эффективностью радиосредств,
- стоимость радиоэлектронного средства является монотонной функцией от любого прямо определенного его показателя,
- универсальность стоимостного критерия, заключающаяся в объективной оценке устройств и систем различного назначения,
- аддитивность стоимости.

Принимая во внимание первые два свойства, можно сказать, что стоимость может служить, или входить, показателем эффективности радиосредств, поскольку между качеством и стоимостью существует высокая корреляция. Реализовать все эти свойства стоимости можно на основе статистических методов, поскольку всегда имеет место разброс стоимости аппаратуры при одних и тех же качественных показателях и существует разброс показателей качества РЭС при одном значении стоимости.

Таким образом, под монотонной зависимостью следует понимать зависимость некоторой усредненной величины стоимости от качественных показателей и параметров радиоэлектронных средств.

Формулирование задачи оптимизации

Примерный алгоритм постановки задачи оптимизации:

- 1) Анализ изучаемого объекта, установление внутренних и внешних связей и зависимостей, выяснение физических, экономических и других ограничений.
- 2) Выбор критериев эффективности, характеризующих основные функции объекта, выявление связей этих критериев с параметрами, ограничениями, выявление возможности перераспределения усилий на показатели качества объекта и его составных частей.
- 3) Формулировка возможных целей оптимизации, достигаемые путем перераспределения усилий на отдельные показатели объекта и показатели составных частей.
- 4) Формализация задачи таким образом, чтобы было возможным получение его решения одним из известных математических методов.

В качестве примера далее приводится решение задачи оптимального синтеза частотно-избирательных свойств радиоприемного устройства по критерию качества ЭМС.

В теории ЭМС выделяются две основные и наиболее крупные по своему содержанию задачи оптимизации (синтеза), отличающиеся постановками и конечными целями: задачу оптимизации требований к численным значениям технических характеристик, влияющих на ЭМС РЭС в заданной помеховой ЭМО; задачу выработки организационно-технических рекомендаций (мероприятий) по применению конкретной совокупности РЭС, функционирующих в общем территориальном районе и общих полосах частот.

Первая задача решается на этапе проектирова-

ния РЭС, а также при нормировании численных значений технических характеристик, влияющих на ЭМС РЭС. Особенностью проектирования РЭС и нормирования технических характеристик приема и излучения является то, что разработчики обладают лишь количественными характеристиками РЭС и их элементов, которые длительное время находились в эксплуатации. В то же время отсутствуют характеристики оптимальных перспективных элементов РЭС, поскольку технические решения о параметрах принимаются эвристически. В связи с этим в теории ЭМС особое внимание приобретает решение задач оптимизации (оптимального выбора) численных значений технических характеристик приема и излучения РЭС и их составных частей с учетом развития производственной базы.

Анализ проблемы ЭМС, установление путей влияния непреднамеренных помех на радиоприемное устройство, определение зависимостей затратных показателей от показателей качества РПУ на основе маркетинговых исследований позволило сформулировать в общем виде задачу оптимизации параметров избирательности РПУ РЭС $d_k \forall k \in [1, n]$ по критерию минимума обратного значения параметра ЭМС η_i^{-1} /2/ при ограничениях на суммарную стоимость $C_{\text{доп}}$ соответствующих устройств [3, 4]:

$$\min_{\{d\}} \frac{1}{\eta_i(d)} = \min_{\{d\}} \sum_{k=1}^n d_k^{-2} \quad (1)$$

при $\sum_{k=1}^n C_k(d_k) \leq C_{\text{доп}}$,

где η_i – показатель качества электромагнитной совместимости i -го радиоэлектронного средства;

d_k – избирательность радиоприемного устройства по k -му побочному каналу приема;

$C(d_k)$ – зависимость стоимости обеспечения избирательности радиоприемного устройства по k -му побочному каналу приема от самой избирательности (линия среднеквадратической регрессии стоимости

на параметр);

$C_{\text{доп}}$ – допустимая стоимость частотно-селективной части аппаратуры радиоприемного устройства РЭС.

Целью этой задачи является распределить оптимальным образом по критерию максимума показателя качества ЭМС РЭС усилия избирательных устройств РПУ.

Метод решения задачи оптимизации

Задача (1) является задачей нелинейного программирования. Попытка числового решения этой задачи решить с помощью математических пакетов MathCad 6.0 и MathCad 2001 фирмы MathSoft не привела к успеху. С помощью встроенных функций Minner и Minimize не удалось получить условный экстремум целевой функции. При этом поиск решения проводился тремя встроенными методами (сопряженных градиентов, квази-Ньютоновским, Левенброка).

Поэтому был использован новый метод нелинейного программирования [2]. Сущность его в следующем. Пусть задана задача нелинейного программирования:

$$\min_{\bar{X}} F(\bar{X}) \quad \text{при} \quad \sum_{i=1}^n f_i(x_i) \leq A_{\text{доп}},$$

где $F(\bar{X})$ - целевая (нелинейная) функция.

Аналогично методу Вульфа линейризуется (но только одно) ограничение в окрестности какого-либо ожидаемого решения. Целевая функция путем монотонных преобразований координат приводится к односторонним сепарабельным функциям. Для полученной таким образом (обычно сепарабельной) задачи возможно найти решение в аналитическом виде, что уже важно при анализе точности, устойчивости решения и стабильности критерия при отклонении решения от оптимального. Если ограничение и было линейным или стало близким к нему, то полученное таким образом решение и есть решение общей задачи. Если функции ограничения $f_i(x_i)$ далеки от линейных, то полученное решение упрощенной задачи используется в качестве итеративно-

го соотношения, где на каждом шаге вычисляются частные производные в окрестности предыдущего решения. При итерации происходит "перекачивание" гиперплоскости ограничений по реальному нелинейному ограничению задачи до тех пор, пока решение не установится с заданной точностью. Такое итеративное решение имеет свойства решения градиентным релаксационным методом, методом покоординатного спуска. Задача допускает одновременный спуск по координатам, то есть распараллеливание вычислительного процесса на ЭВМ. Поэтому возможно ускорение решения многомерной задачи. В случае большой кривизны ограничения в задаче ускорение решения возможно за счет учета второй производной функции ограничения $f_i''(x_i)$, как и в градиентных методах второго типа. В этом случае очередной шаг $\Delta x_{i(k)} = x_{i \text{ opt}(k)} - x_{i \text{ тр}(k)}$ в сторону оптимума следует ограничивать следующим образом

$$|\Delta x_{i(k)}| \leq \sqrt{\frac{\alpha \Delta f_i(x_{i \text{ opt}(k)})}{f_i''(x_{i \text{ opt}(k-1)})}}$$

где $|\Delta x_{i(k)}| = |x_{i \text{ opt}(k)} - x_{i \text{ тр}(k)}|$;

$$\Delta f_i(x_{i \text{ opt}(k)}) = f_i(x_{i \text{ opt}(k)}) - f_i(x_{i \text{ тр}(k-1)}) - f_i'(x_{i \text{ тр}(k-1)})(x_{i \text{ opt}(k)} - x_{i \text{ тр}(k-1)});$$

$x_{i \text{ тр}(k)}$ – требуемое значение $x_i(k)$ на k -м шаге;

α – процент точности линейной аппроксимации.

В случае, если $|x_{i \text{ opt}(k)} - x_{i \text{ opt}(k-1)}| \leq |\Delta x_{i(k)}|$ на i -й координате, то в качестве требуемого значения $x_{i \text{ тр}(k)}$ по этой координате на k -м шаге принимается $x_{i \text{ тр}(k)} \equiv x_{i \text{ opt}(k)}$. В противном случае соответственно $x_{i \text{ тр}(k)} \equiv x_{i \text{ opt}(k-1)} \pm \Delta x_{i(k)}$.

Реализация этого метода на ЭВМ позволила успешно решить поставленную задачу. Разработанный пакет программ позволяет решать задачу различной размерности. Итерационный процесс при произвольном выборе начального приближения

сходился за 8 – 12 итераций при точности определения решения 0,2%.

Анализ результатов решения задачи оптимизации

Программа находит оптимальное значение показателя качества ЭМС при различных допустимых значениях затратного показателя, что позволяет ей строить кривую обмена (рис. 1) – зависимость противоречивых показателей качества РЭС (показателя качества ЭМС и стоимости), которая позволяет судить о качестве помехозащищенности РПУ от не-

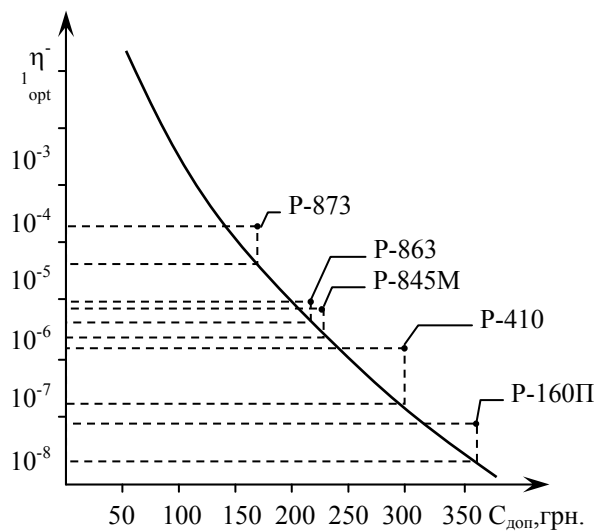


Рис. 1. Зависимость показателя качества ЭМС и стоимости от непреднамеренных электромагнитных помех

преднамеренных электромагнитных помех и эффективности решения задачи оптимизации. Кроме того, программа позволяет построить зависимости оптимальных значений показателей избирательности по побочным каналам приема РПУ от допустимой стоимости (рис. 2).

Для четырех побочных каналов приема (соседнего, зеркального, канала на промежуточной частоте, канала, образованного гармоникой гетеродина) задача оптимизации частотно-избирательных свойств РПУ по критерию ЭМС формулируется следующим образом [5]:

$$\min_{\{d_c, d_3, d_{пч}, d_{г3}\}} \eta^{-1}(d_c, d_3, d_{пч}, d_{г3}) =$$

$$= \min_{\{d_c, d_3, d_{пч}, d_{г3}\}} \left(\frac{1}{d_c^2} + \frac{1}{d_3^2} + \frac{1}{d_{пч}^2} + \frac{1}{d_{г3}^2} \right) \quad (2)$$

при $C(d_c) + C(d_3) + C(d_{пч}) + C(d_{г3}) \leq C_{доп}$.

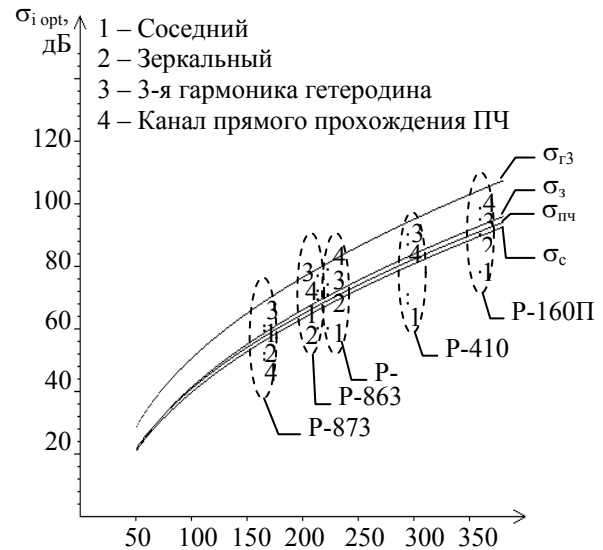


Рис. 2. Зависимость оптимальных значений показателей избирательности по побочным каналам приема РПУ от допустимой стоимости

Решение этой задачи нелинейного программирования представлено на рис. 1 и 2. Точками на рис. 1 обозначены значения показателей качества ЭМС от $C_{доп}$ существующих радиоприемных устройств РЭС (P-863, P-845M, P-160П). Все эти точки не находятся на "кривой обмена". Значения показателя качества ЭМС для каждого из радиоприемных устройств на порядок меньше оптимальных.

Анализируя численные результаты решения задачи (2) и рис. 2, можно сделать вывод о необходимости и размерах перераспределения усилий селективных устройств радиоприемников вышеперечисленных РЭС с целью приведения значения их показателей качества ЭМС к оптимальным.

Большинство из значений показателей избирательности не являются оптимальными, а отклонения

$$\Delta\sigma_{3(i)} = \left| \sigma_{3opt} - \sigma_{3(i)} \right|, \quad \Delta\sigma_{c(i)} = \left| \sigma_{copt} - \sigma_{c(i)} \right|,$$

$$\Delta\sigma_{\text{пч}(i)} = |\sigma_{\text{пчopt}} - \sigma_{\text{пч}(i)}| \quad \text{и} \quad \Delta\sigma_{\text{ГЗ}(i)} = |\sigma_{\text{ГЗopt}} - \sigma_{\text{ГЗ}(i)}|$$

составляют 5 – 10 дБ.

Таким образом, перераспределение усилий селективных устройств перечисленных РПУ позволит приблизить показатели качества электромагнитной совместимости $\eta(i)$ этих РЭС к оптимальным значениям (рис.2).

Выводы

Приведенная методика оптимального синтеза избирательных свойств РПУ позволяет получить, так называемые, кривые обмена, которые являются потенциальными характеристиками системы. Их можно использовать для:

- определения потенциальных возможностей улучшения показателя качества,
- облегчения установления путей совершенствования систем (выявления основных факторов, препятствующих улучшению систем, отыскания структуры и (или) значений параметров нехудших и оптимальных систем),
- сравнения вариантов построения систем по их потенциальным характеристикам.

Литература

1. Апорович А.Ф. Проектирование радиотехнических систем. – Мн.: Выш. шк., 1988. – 221 с.
2. Алёшин Г.В. Основы построения оптимальных информационно-измерительных радиотехнических систем. – Х.: ХВУ, 1994. – 252 с.
3. Трублін О.А. Конструкторсько-технологічні аспекти електромагнітної сумісності при розробці радіоелектронної апаратури та електронних засобів вимірювань. // Зб. наук. праць. – Х.: ХІЛ. 1999. – С.9-13.
4. Алёшин Г.В., Трублин А.А. Об оптимальности частотно-селективных средств авиационной радиосвязи, работающих в равномерно загруженном частотном диапазоне. - Радиотехника. 2000. Вып. 114. – С. 78-85.
5. Алёшин Г.В., Трублин А.А. Синтез селективных свойств радиоприемных устройств по критерию электромагнитной совместимости при ограничении на стоимость. - Радиотехника. 2001. Вып. 118. – С.64-69.

Поступила в редакцию 30.07.03

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Алёшин Г.В., Харьковский институт Военно-Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, г. Харьков