

УДК 621.375.029.64

ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИЙ МОДУЛЬ L-ДИАПАЗОНА СРЕДСТВ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

Иванов А.Г., Иванов М.А.

ООО НПК «Радарсервис», Рязань, e-mail: radservis@mail.ru

Рассмотрены подходы при реализации принципов технологической оптимизации в процессе разработки приемопередающего модуля (ППМ) L-диапазона станции средств воздушного движения. Сформулирована задача технологической оптимизации с учетом специфики разрабатываемого модуля. Приводится структура ППМ, с описанием особенностей функционирования. Моделирование устройств проводилось с использованием современных САПР СВЧ. Проведена оптимизация внутренних параметров устройств ППМ. Выбор элементной базы, режимов управления и работы, а также развязка каналов прием/передача обеспечивают отсутствие петлевого самовозбуждения с участием приемного и передающего трактов. Разброс выходной мощности между изделиями в партии при нормальных климатических условиях составил не более ± 1 дБ. Основные выходные экспериментальные характеристики ППМ полностью удовлетворяют требованиям технического задания, что обусловлено внедрением принципов технологической оптимизации.

Ключевые слова: приемопередающий модуль, моделирование, технологическая оптимизация, усилитель мощности

RECEIVING-TRANSMITTING UNIT L-BAND MEANS OF AIR TRAFFIC

Ivanov A.G., Ivanov M.A.

SIC «Radarservis», Ryazan, e-mail: radservis@mail.ru

The approaches in the implementation of the principles engineering optimization in the process of developing receiving-transmitting module L-band air traffic flows is considered. The problem of technology optimization module is formulated. The structure of the receiving-transmitting module is described. Simulation of the devices using CAD microwave. The optimization of the internal parameters of the devices was performed. The choice of the element base, management regimes and work, as well as isolation channels transmission/receive with transmit and receive paths helped to ensure the absence of self-excitation loop. The spread between power output in a lot of products under normal climatic conditions not more than 1 dB is obtained. The main experimental characteristics of the module fully satisfy the requirements of technical specifications, that following the implementation of certain principles technological optimization.

Keywords: transceiver-transmitting module, simulation, technological optimization, amplifier

Параметрический синтез микроволновых ППМ с вероятностных позиций обычно сводится к конструированию следующих целевых функций: вероятности выхода годных; вероятности нахождения вектора выходных характеристик $\bar{Y}$ в течение заданного интервала времени в области работоспособности; целевых функций, позволяющих оптимизировать допуски на внутренние и внешние параметры. При этом решение оптимизационных задач данного класса опосредованно минимизирует себестоимость модуля.

При технологической оптимизации ГИС и ИС СВЧ предполагается [1, 2], что точность технологического процесса должна быть одинаковой для всех полосковых элементов и узлов платы, что обусловлено применением интегральной технологии, а вероятность выхода годных изделий должна рассматриваться как условная. Тогда можно сформулировать задачу технологической оптимизации следующим образом:

1. Управляемые параметры: $\bar{Y}$, $\bar{k}$, $\Delta\bar{Y}$, $\Delta\bar{k}$ – внешние и внутренние параметры и их допустимые отклонения; $\sigma[\bar{k}]$ – сред-

неквадратическое отклонение внутренних параметров [информация от САПР технологической подготовки производства (ТПП)]; $S_{т.е}$, $S_{т.о}$ – составляющие технологической себестоимости, обусловленные структурой технологического процесса и применением оборудования (заданы дискретно, информация от САПР ТПП).

2. Целевая функция

$$F = \Psi(\bar{Y}, \bar{k}, \Delta\bar{Y}, \Delta\bar{k}, \sigma[\bar{k}], S_{т.е}, S_{т.о}).$$

3. Критерий оптимальности – условный минимум технологической себестоимости годного изделия $\min F$.

4. Ограничения:

а) Преобразование объекта производства: $\bar{Y} \in P\bar{Y}$ ($P\bar{Y}$ – область работоспособности); $\bar{Y} \in D\bar{Y}$ ($D\bar{Y}$ – допустимая область). Целевая функция

$$\delta\bar{Y} = \varphi(\delta\bar{k}),$$

где $\delta\bar{Y}$ и $\delta\bar{k}$ – приращения. Критерий оптимальности $\min \delta\bar{Y}$, $\bar{k} \rightarrow \bar{k}^*$ ($\bar{k}^*$ –

оптимальное значение вектора внутренних параметров). Эффект – увеличение вероятности выхода годных P_r при уменьшении $F: \uparrow P_r, \downarrow F$.

б) Адаптация объекта к процессу производства: $\bar{Y} \in P\bar{Y}; \bar{Y} \in D\bar{Y}; \Delta\bar{k} = \text{const}; \sigma[\bar{k}] = \text{const}; S_{\text{т.е}} = \text{const}; S_{\text{т.о}} = \text{const}$. Целевая функция $P_r = \varphi(\bar{Y}) \rightarrow \max$. Путь достижения условного максимума $\text{var } \bar{Y}$. Эффект $P_r, \downarrow F$.

в) Взаимная адаптация объекта и процесса производства: $\bar{Y} \in P\bar{Y}; \bar{Y} \in D\bar{Y}; \sigma[\bar{k}] = \sigma[\bar{k}_R]$, $(\sigma[\bar{k}_R])$ – область реализуемых значений). Критерий оптимальности $\min F$. Путь достижения условного минимума $\text{var } \bar{Y}; \text{var } \sigma[\bar{k}]; \text{var } S_{\text{т.е}}; \text{var } S_{\text{т.о}}$ при дискретно заданных $S_{\text{т.е}}$ и $S_{\text{т.о}}$. Эффект $\downarrow F$.

При этом общие принципы технологической оптимизации сводятся к следующим:

* дестабилизирующие воздействия подлежат преобразованию в автокомпенсирующие: $\forall (D(\bar{k}) \wedge A(\bar{k}))$;

* точность технологического процесса и конструкция устройства определяют оптимальные номиналов эксплуатационных параметров: $\forall ((\bar{k}_0 \wedge \sigma_k) \Rightarrow (Y_{\text{opt}}))$;

* оптимальные точности технологического процесса и номиналов внутренних параметров взаимообусловлены: $\forall ((\sigma_{k \text{ opt}}) \Leftrightarrow (Y_{\text{opt}}))$.

В работах [3, 4] задача оптимизации допусков для МЭУ СВЧ формируется следующим образом. Считаем, что зависимость стоимости изготовления устройства C от размеров допусков $(\Delta\bar{k}) = (\Delta k_1, \Delta k_2, \dots, \Delta k_n)$ известна, Δk_i – допуск на i -й параметр. Таким образом требуется найти

$$\min_{\bar{k}, \Delta\bar{k}} C(\bar{k}, \Delta\bar{k}). \quad (1)$$

Предполагается, что при изготовлении устройства параметры k_i некоррелированы, т.е. не зависят друг от друга в процессе их конструктивно-технологической реализации. Условие работоспособности устройства $m_{\bar{k}, \Delta\bar{k}} \in R$, где $m_{\bar{k}, \Delta\bar{k}}$ – параллелепипед с осями, параллельными осям координат, длина i -го ребра которого равна $2 \Delta k_i$. В частности считают, что выпуклая область работоспособности задана в виде

$$R = \{\bar{k}, G_i(\bar{k}) \leq 0, i = \overline{1, m}\}, \quad (2)$$

где $G_i(\bar{k})$ – технические показатели качества, которые являются непрерывно дифференцируемыми функциями и выполняется условие Слейтера

$$\inf_{\bar{k} \in E^n} \max_{i=1, m} G_i(\bar{k}) < 0. \quad (3)$$

Геометрический смысл данной формализации состоит в следующем. Необходимо вписать в заданную область R параллелепипед наибольшего объема с осями параллельными осям координат и заданным соотношением ребер.

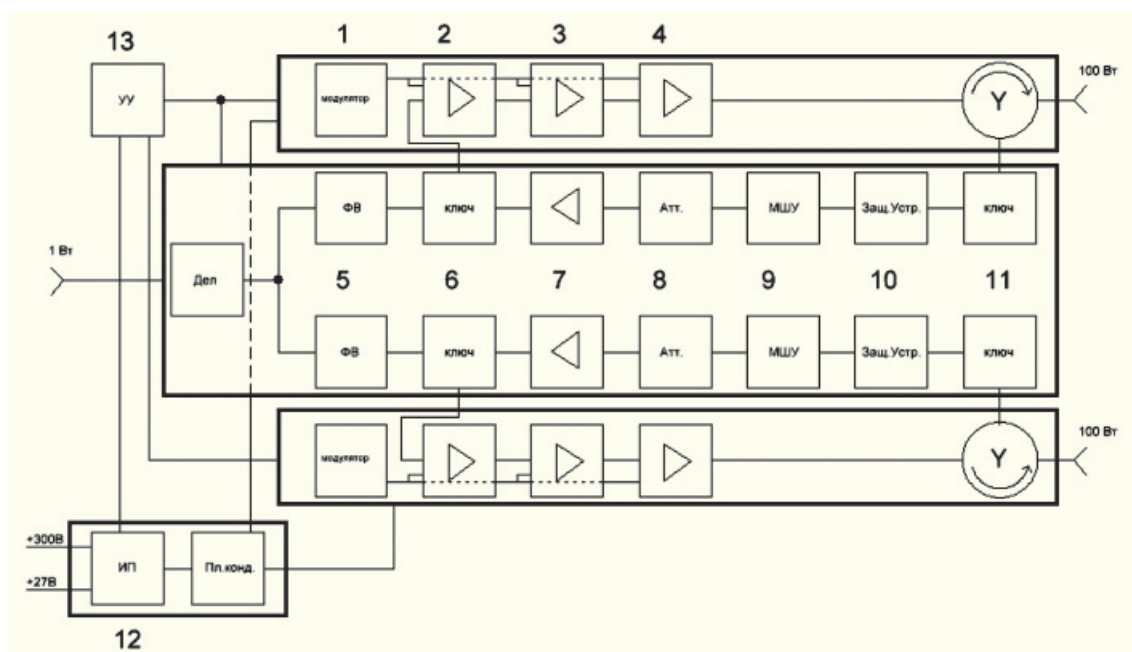
Цель работы – реализация принципов технологической оптимизации в процессе разработки ППМ L-диапазона станции средств воздушного движения.

Структура ППМ L-диапазона

Схема ППМ L-диапазона представлена на рисунке.

В основном используются следующие варианты архитектурной реализации ППМ для АФАР: независимые каналы приема и передачи; наличие общих функциональных устройств для каналов приема и передачи; наличие группы общих функциональных устройств для каналов приема и передачи. При этом первый вариант построения ППМ отличается более высокой себестоимостью и избыточностью устройств. В то же время он обеспечивает лучшую меру нелинейности и дает выигрыш по коэффициенту шума по сравнению со вторым вариантом. Третий вариант построения ППМ проигрывает первому по коэффициенту нелинейности и имеет примерно такой же коэффициент шума.

В отличие от более мощного одноканального ППМ L-диапазона с $P_{\text{вых}} = 500$ Вт [5], с учетом требований технического задания структура представленного изделия с $P_{\text{вых}} = 100$ Вт реализована по третьему варианту. Приемная и передающая часть модуля состоят из двух идентичных каналов, питание осуществляется преобразователем с широтно-импульсной (ШИМ) регуляцией (12), устройство управления (УУ) осуществляет управление и контроль параметров ППМ. Модуль реализован на многослойной плате с разделением питающих, управляющих и сигнальных цепей. Приемный канал состоит из двух усилителей мощности (7, 9), регулятора усиления (аттенюатор) (8), общего для приемника и передатчика фазовращателя (5), а также защитного устройства (10) и переключателей каналов (6, 11). Усилители работают в классе А, избирательность осуществляется высокочастотными контурами. Ограничение просачивания мощности во время передачи обеспечивается защитным устройством.



Структурная схема ППМ L-диапазона станции средств воздушного движения

Передающий канал включает фазовращатель (ФВ), который обеспечивает поворот фазы с шагом 5,6 градуса до 360 градусов. Три усилителя мощности (2, 3, 4) выполнены на полевых транзисторах, при этом смещение определяет класс АВ. Модулятор (1) управляет питанием ПТШ по постоянному току. Согласование активных элементов осуществляется отрезками микрополосковых линий и контурами на сосредоточенных элементах. Циркуляторы (Y) обеспечивают необходимый уровень согласования и развязки каналов приема и передачи. Источник питания (ИП) преобразует постоянное напряжение 300 В в 30 В по постоянному току с ШИМ стабилизацией по напряжению и защитой по току. Контроль в устройстве управления происходит по входной, выходной, отраженной мощности и температуре. Также осуществляется управление фазовращателем, переключателями каналов, регулировкой усиления.

Результаты эксперимента

Практическая реализация ППМ позволила решить следующие основные задачи: попеременная работа в режимах «прием» и «передача» с внешним управлением режимами; прием, усиление и управление амплитудой и фазой сигнала в режиме «прием»; защита входных цепей от сигнала несинхронной помехи в режиме «прием»; усиление и управление фазой сигналов в режиме «передача»; преобразование и выдача контрольных сигналов исправности изделия.

В таблице приведены основные параметры ППМ ($P_{\text{ивых}}$ – импульсная выходная мощность, $K_{\text{шпр}}$ – коэффициент шума приемника, $K_{\text{упр}}$ – коэффициент усиления приемника), полученные по результатам эксперимента, которые полностью удовлетворяют требованиям технического задания.

Основные экспериментальные параметры ППМ

Номер поддиап.	Поддиап. режима прием/передача, МГц	$P_{\text{ивых}}$, Вт	$K_{\text{шпр}}$, дБ	$K_{\text{упр}}$, дБ	Длит.(мкс)/скважн. имп.
1	1090 ± 0,5/1030 ± 0,2	80	5	≥ 21 ± 1	0,8/≥ 10
2	1458-1470/1532	100	5	≥ 21 ± 1	0,5/≥ 10
3	1100-1450/1100-1450	100	5	≥ 21 ± 2	1/≥ 10

Для отдельных устройств ППМ реализованы следующие параметры.

Аттенуатор – глубина регулировки ослабления не менее 29 дБ; номинальная величина установки дискрета величины ос-

лабления (в режиме «прием») 0,5 дБ; время установления дискретов не более 1 мкс.

Фазовращатель – дискрет установки величины набега фазы на частоте 1532 МГц – 5,6°; паразитная амплитудная модуляция

уровня выходной мощности при установке величины набега фазы не более ± 1 дБ; паразитная амплитудная модуляция коэффициента усиления приемного тракта при установке набега фазы не более ± 2 дБ; время установки дискретов не более 1 мкс.

При этом обеспечена работоспособность ППМ после работы на нагрузку с КСВН ≤ 5 . При изменении входного сигнала в режиме «передача» $30 \pm 1,5$ дБм параметры изделия соответствуют требованиям технического задания.

Заключение

В процессе проектирования ППМ L-диапазона станции средств воздушного движения реализованы следующие задачи в рамках технологической оптимизации изделия:

1. Осуществлен обоснованный выбор варианта архитектуры ППМ, подбор современных комплектующих элементов с учетом использования технологии поверхностного монтажа и сокращения этапов ручной подстройки.

2. На этапе компьютерного моделирования проведена оптимизация внутренних параметров устройств ППМ.

3. Выбор элементной базы, режимов управления и работы, а также развязка каналов прием/передача обеспечивают отсутствие петлевого самовозбуждения с участием приемного и передающего трактов.

4. Разброс выходной мощности между изделиями в партии при нормальных климатических условиях составил не более ± 1 дБ, что обусловлено проведением комплексной технологической оптимизации.

Список литературы

1. Васильев Е.П. Архитектура и сравнительные характеристики системы проектирования микроволновых устройств ПОИСК-Д // Информационные технологии. – М.: Новые технологии. – 1998. – № 11. – С. 22–26.

2. Конструкторско-технологические основы проектирования полосковых микросхем / И.П. Бушминский,

А.Г. Гудков, В.Ф. Дергачев и др.; под ред. И.П. Бушминского. – М.: Радио и связь, 1987. – 272 с.

3. Кац Б.М., Мещанов В.П., Фельдштейн А.Л. Оптимальный синтез устройств СВЧ с Т-волнами. – М.: Радио и связь, 1984. – 287 с.

4. Дудов С.И., Мещанов В.П. Параметрическая оптимизация проектируемых устройств по критериям стоимости и качества // Обзор по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. – Вып. 1(1512). – М.: ЦНИИ Электроника, 1990. – 42 с.

5. Иванов А.Г., Иванов М. А., Левашов В.Г. Технология мощных передатчиков L-диапазона информационно-измерительных систем авионики // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2014. – № 3. – С. 131–134.

References

1. Vasil'ev E.P. Arhitektura i sravnitel'nye harakteristiki sistemy proektirovaniya mikrovolnovykh ustrojstv POISK-D // Informacionnye tehnologii. – M.: Novye tehnologii. 1998. no. 11. pp. 22–26.

2. Konstruktorsko-tehnologicheskie osnovy proektirovaniya poloskovykh mikroshem / I.P. Bushminskij, A.G. Gudkov, V.F. Dergachov i dr.; Pod red. I.P. Bushminskogo. M.: Radio i svjaz', 1987. 272 p.

3. Kac B.M., Meshhanov V.P., Fel'dshtejn A.L. Optimal'nyj sintez ustrojstv SVCh s T-volnami. M.: Radio i svjaz', 1984. 287 pp.

4. Dudov S.I., Meshhanov V.P. Parametricheskaja optimizacija proektiruemykh ustrojstv po kriterijam stoimosti i kachestva // Obzor po jelektronnoj tehnikе. Ser. 1. Jelektronika SVCh. Vyp. 1(1512). M.: CNII Jelektronika, 1990. 42 p.

5. Ivanov A.G., Ivanov M. A., Levashov V.G. Tehnologija moshhnykh peredatchikov L-diapazona informacionno-izmeritel'nyh sistem avioniki // Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2014. no. 3. pp. 131–134.

Рецензенты:

Жулев В.И., д.т.н., заведующий кафедрой информационно-измерительной и биомедицинской техники, ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань;

Каширин Д.Е., д.т.н., заведующий кафедрой электроснабжения, ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», г. Рязань.

Работа поступила в редакцию 27.12.2014.