

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСТРОЙСТВА ДИНАМИЧЕСКОГО СОГЛАСОВАНИЯ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО ТРАКТА И АНТЕННЫ РАДИОЛОКАТОРА С НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ И ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Д. Н. ПОНЕДЬКО, А. М. КИЕВСКИЙ, С. В. КОЗЛОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Беларусь)

E-mail: dima333909@gmail.com

Аннотация. Предложена методика расчета устройства и согласующих цепей при динамическом согласовании приемо-передающего тракта и антенны радиолокатора с непрерывным излучением и частотной модуляцией.

Abstract. A methodology for calculating the dynamic matching system of the transceiver path and antenna in a continuous wave and frequency-modulated radar system is proposed.

Введение

В [1] приведен способ динамического согласования приемо-передающего тракта и антенны радиолокатора с непрерывным частотно-модулированным излучением. Способ основан на идее согласования для «текущей» частоты с учетом малого в сравнении с периодом повторения, времени задержки отраженного сигнала для типовых условий использования FMCW-радиолокатора. Технически согласование реализуется с использованием коммутируемых с помощью $p-i-n$ диодов согласующих цепей для отдельных поддиапазонов частот.

Цель статьи – изложить методику расчета динамического согласования приемо-передающего тракта и антенны для FMCW-радиолокатора.

Методика расчета динамического согласования

На первом шаге необходимо выбрать подходящий тип антенны и определить ее габариты. Задаются несущая частота f_0 и девиация частоты Δf_M (ширина спектра зондирующего сигнала). С использованием САПР электродинамического моделирования (FEKO, CST Microwave Studio, Antenna Magnus, Antenna Designer пакета MatLab и др.) рассчитываются параметры антенны: зависимости импеданса $Z_a(f)$ антенны, коэффициент усиления антенны $G(f)$, коэффициента отражения $S_{11}(f)$, КСВ и так далее от частоты f в диапазоне частот $f_0 \pm \frac{\Delta f_M}{2}$. Расчет коэффициента отражения и КСВ ведется для стандартного значения волнового сопротивления 50 Ом. По результатам расчета определяется полоса частот Δf_a антенны по уровню КСВ < 2 , то есть $|S_{11}| < |S_{11}|_{\max}$, где $|S_{11}|_{\max} = -10$ дБ – максимально допустимая величина модуля коэффициента отражения. Эта полоса частот является ориентиром для разделения на поддиапазоны.

На втором шаге общий диапазон разделяется на $N = \left\lceil \frac{\Delta f_M}{\Delta f_a} \right\rceil$ поддиапазонов и определяются границы поддиапазонов и центральные частоты f_n , $n = \overline{1, N}$ поддиапазонов. Первоначальное разделение выбирается равномерным, однако, в соответствии с опытом разработчика, может использоваться и неравномерное разделение. В частности, на участках с быстрым изменением активного и реактивного сопротивления антенны, поддиапазоны могут быть взяты более узкими, чем на участках, где указанные сопротивления изменяются более медленно.

На третьем шаге для каждого поддиапазона анализируются активные сопротивления приемо-передающего тракта и антенны на центральной частоте поддиапазона и выбирается вид Г-образной цепи для поддиапазонов. Выбор цепи зависит от активной части сопротивлений антенны и приемо-передающего тракта, схемы 1а и 1в подходят для случая, когда активное сопротивление антенны меньше сопротивления тракта, схемы 1б и 1г в противоположном случае.

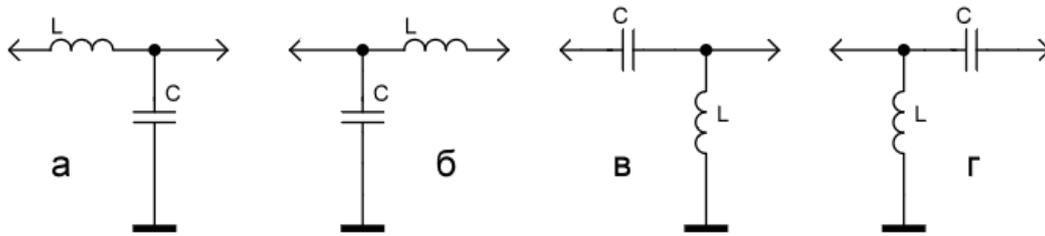


Рис. 1. Типы Г-образных согласующих цепей

Отметим, что схемы 1а и 1б являются более удобными при последовательном включении $p-i-n$ диодов, так как ток управления $p-i-n$ диода будет протекать через индуктивность L согласующей цепи. Базовый вариант параллельного включения согласующих цепей 1а и схемы 1б с использованием $p-i-n$ диодов приведен на рисунке 2, где C_{p1}, C_{p2}, C_{p3} – разделительные конденсаторы; $L_{д1}, L_{д2}, L_{д3}$ – дроссели для подачи управляющего постоянного напряжения на диоды.

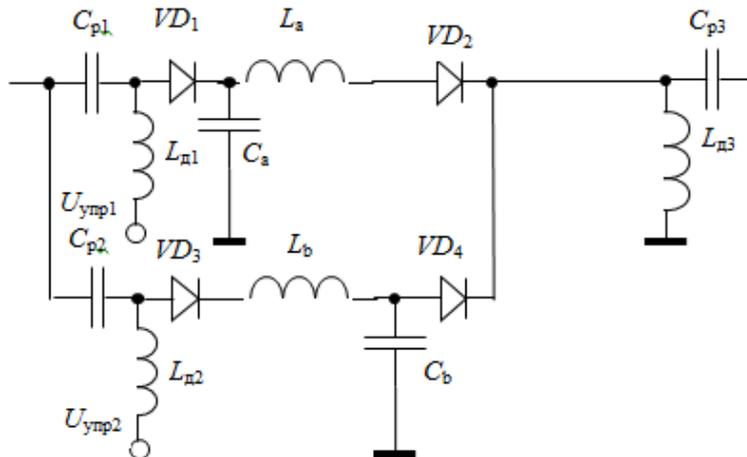


Рис. 2. Базовый вариант параллельного включения согласующих цепей

На четвертом шаге необходимо используя приведенные ниже формулы [3] получить значения элементов цепей согласования для каждого поддиапазона (формулы даны для схем а и б, для остальных схем можно найти в [3]).

Сначала необходимо найти активную проводимость антенны:

$$G_H = \frac{R_H}{R_H^2 + X_H^2},$$

$$B_H = -\frac{X_H}{R_H^2 + X_H^2},$$

где R_H – активное сопротивление антенны, X_H – реактивное сопротивление антенны.

Далее находим коэффициенты:

$$A = \sqrt{\frac{G_H}{R_0} - G_H^2},$$

$$B = \sqrt{R_H(R_0 - R_H)} - X_H,$$

где R_0 – активное сопротивление приемо-передающего тракта.

Имея коэффициенты A и B можно найти индуктивность и емкость согласования:

$$L_a = \frac{A}{2\pi f(G_H^2 + A^2)},$$

$$C_a = \frac{A - B_H}{2\pi f},$$

$$L_b = \frac{B}{2\pi f},$$

$$C_b = \frac{B + X_H}{2\pi f(R_H^2 + (B + X_H)^2)},$$

где f – центральная частота поддиапазона.

Далее рассчитывается зависимость коэффициента отражения для поддиапазона от частоты:

$$|S_{11}(f)| = \left| \frac{Z(f) - Z_{ист}(f)}{Z(f) + Z_{ист}(f)} \right|,$$

где $Z_{ист}(f)$ - импеданс источника; $Z(f)$ - импеданс согласующей цепи вместе с импедансом антенны:

$$Z(f) = j2\pi fL_a + \frac{Z_a(f) \frac{1}{j2\pi fC_a}}{Z_a(f) + \frac{1}{j2\pi fC_a}} - \text{для схемы 1a};$$

$$Z(f) = \frac{1}{j2\pi fC_b} + \frac{Z_a(f) \cdot j2\pi fL_b}{Z_a(f) + j2\pi fL_b} - \text{для схемы 1б}.$$

Результаты расчетов $|S_{11}(f)|$ отображаются на общем для всего диапазона частот графике.

На пятом шаге необходимо проанализировать полученный на четвертом шаге график $|S_{11}(f)|$: если желаемый коэффициент отражения не был достигнут на всем диапазоне $|S_{11}(f)| < |S_{11}|_{\max}, \forall f \in \left[f_0 - \frac{\Delta f_M}{2}, f_0 + \frac{\Delta f_M}{2} \right]$ то нужно: увеличить число поддиапазонов, если

коэффициент отражения велик на большей части диапазона; сделать поддиапазон неравными, меньше там, где хуже коэффициент отражения, если уровень отражений неудовлетворителен, например, только на участке с меньшими частотами. Если необходимы какие-либо изменения в поддиапазоны, то необходимо вернуться к шагу 3.

На шестом, заключительном шаге после получения необходимого коэффициента отражения на всем диапазоне необходимо подобрать элементы, которые будут обеспечивать последовательное переключение схем согласования в нужные моменты времени.

Выбор р-и-п диодов определяется из сопротивлением в открытом и закрытом состоянии и уровнем мощности проходящего СВЧ-сигнала.

Выбор дросселя определяется пренебрежимо малым влиянием на цепи прохождения высокочастотных сигналов и малости постоянной времени цепи, состоящей из дросселя, источника питания и внутреннего сопротивления диода в открытом состоянии в сравнении с временем работы согласующей цепи в пределах одного частотного поддиапазона:

$$2\pi(f_0 - \frac{\Delta f_M}{2})L_d > 2...3 \text{ кОм}; \frac{L_d}{R_{упр} + R_d} \ll \frac{T_r}{N},$$

где $R_{упр}, R_d$ - внутреннее сопротивление источника управляющего напряжения для диодов и внутреннее сопротивление диода, соответственно. При расчете необходимо учитывать наличие двух последовательно включенных диодов и дросселей.

Пример использования методики

Изложенная методика была использована для согласования многослойной микрополосковой антенны (PSB-антенна) в диапазоне частот 5...6 ГГц (рис. 3).

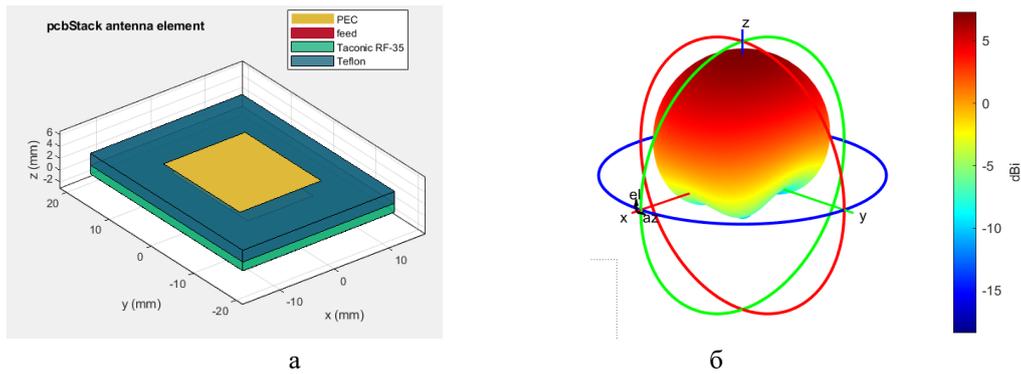


Рис. 3. Конструкция антенны (а) и ее диаграмма направленности (б)

Импеданс этой антенны и результат ее согласования на центральной частоте приведен на рисунке 4, а модуль коэффициента отражения при использовании способа динамического согласования – на рисунке 5.

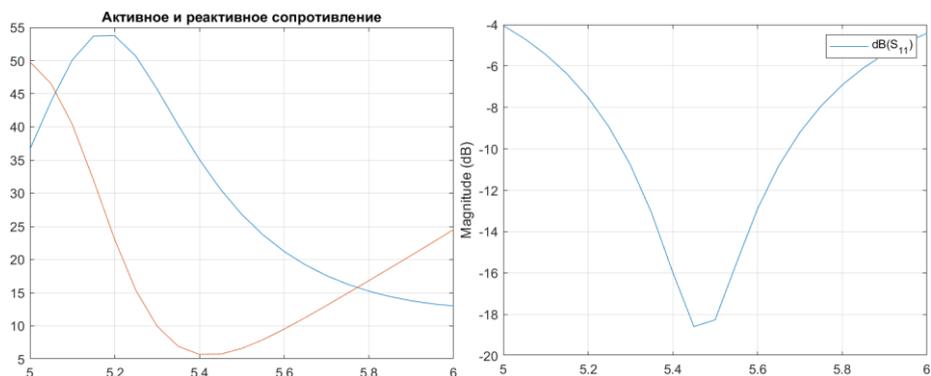


Рис. 4. Импеданс антенны (а) и модуль коэффициента отражения при согласовании на центральной частоте(б)

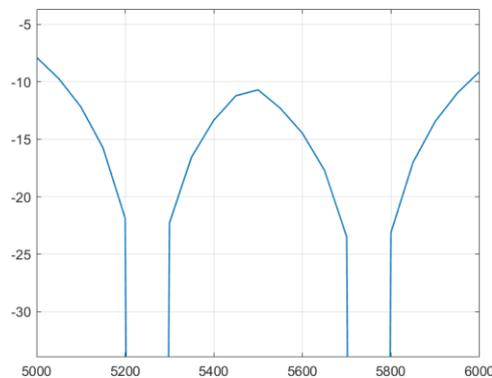


Рис. 5. Зависимость модуля коэффициента отражения от частоты при использовании динамического согласования

Исходная полоса частот антенны при согласовании на частоте 5,5 ГГц составила около 350 МГц. При динамическом согласовании потребовалось две согласующие цепи (2 поддиапазона) с центральными частотами 5,25 ГГц и 5,75 ГГц при полосе рабочих частот 900 МГц.

Список использованных источников

1. Киевский А.М. Способ динамического согласования приемо-передающего тракта и антенны радиолокатора с непрерывным излучением и частотной модуляцией / А.М. Киевский, Д.Н. Понедько, С.В. Козлов // в наст. сборнике.
2. Гусев Б.В., Лагунов Е.В., Шабунин С.Н. Фильтрация сигналов и согласование нагрузок. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2022.
3. Ренди, Риа. Инь и Янь в вопросах согласования каналов передачи, часть 1 // Электронные компоненты, №4, 2008. – С. 116-119.