

## СПОСОБ ДИНАМИЧЕСКОГО СОГЛАСОВАНИЯ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО ТРАКТА И АНТЕННЫ РАДИОЛОКАТОРА С НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ И ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

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

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

E-mail: temkaakievskiy@gmail.com

**Аннотация.** Предложен способ согласования приемно-передающего тракта и антенны в радиолокаторе с непрерывным излучением и частотной модуляцией, основанный на динамическом управлении параметров согласующей цепи (СЦ) в соответствии с текущей частотой передаваемых или принимаемых колебаний и импедансом антенны. Приведена структура согласующего устройства.

**Abstract.** A method for matching the transceiver path and antenna in a continuous wave and frequency-modulated radar system is proposed, based on dynamic control of the matching circuit parameters according to the current frequency of transmitted or received oscillations and the antenna impedance. The structure of the matching device is presented.

### Введение

Радиолокаторы с непрерывным излучением и частотной модуляцией (FMCW) широко используются в качестве РЛС охраны периметра, водных районов, сельскохозяйственных угодий, в качестве корабельных и автомобильных РЛС, при обнаружении заглубленных объектов, низколетящих воздушных объектов, а также в качестве измерителей уровней [1-3]. Известны варианты FMCW-радиолокаторов для беспилотных летательных аппаратов с синтезированием апертуры [4,5]. Важным преимуществом FMCW-радиолокаторов является простота конструкции и невысокие требования к подсистеме обработки сигналов, в том числе при высокой разрешающей способности по дальности. Так, во многих FMCW-радиолокаторах используется частотная модуляция с девиацией частоты (шириной спектра)  $\Delta f_0 = 150 \dots 300$  МГц, что определяет разрешающую способность по дальности 1...0,5 м. В радиолокаторах подповерхностного зондирования ширина спектра сигнала может достигать 600...1000 МГц [1].

При столь большой полосе частот усложняется процесс согласования антенны с приемно-передающим трактом. Традиционные и конструктивно простые виды антенн (полуволновой вибратор, микрополосковые антенны) имеют диапазон рабочих частот, ограниченный согласованием с трактом, порядка 3...10 % от несущей. Это вынуждает использования специальных типов широкополосных антенн (Вивальди, дискоконусная, фрактальная), что не всегда оправданно. Кроме того, такие типы антенн не всегда могут использоваться в относительно низкочастотном диапазоне (менее 2000 МГц), что важно, например, для радиолокационных датчиков подповерхностного зондирования.

Цель статьи – обоснованием способа динамического согласования приемно-передающего тракта и антенны для FMCW-радиолокатора.

### Содержание способа динамического согласования

Типовые FMCW-радиолокаторы имеют период повторения зондирующего сигнала с частотной модуляцией порядка  $T_r = 1 \dots 2$  мс при максимальной дальности  $r_{\max} = 10 \dots 15$  км или, для подповерхностного зондирования, автомобильных РЛС или измерителей уровня, существенно меньше. Время задержки  $t_r$ , принимаемого сигнала для таких РЛС обычно составляет десятки мкс и не превышает 100 мкс. Поэтому излучение зондирующего и прием отраженного сигнала ведется для каждого момента времени на частотах

$$f_{tr}(t) = f_0 + \frac{\Delta f_0}{T_r} \left( t - T_r \left[ \frac{t}{T_r} \right] \right); \quad f_r(t) = f_0 + \frac{\Delta f_0}{T_r} \left( t - t_r - T_r \left[ \frac{t - t_r}{T_r} \right] \right),$$

для диапазона которых и должно быть выполнено согласование в текущем времени  $t \in [0, T_r]$ .

Это можно выполнить с использованием простейших Г-образных согласующих цепей при их параллельном включении по входу и выходу с использованием  $p$ - $i$ - $n$  диодов [6,7].

Разобьем диапазон частот согласования  $\Delta f_0$  на  $N$  поддиапазонов с шириной каждого  $\Delta F = \frac{\Delta f_0}{N}$  и

центральными частотами  $f_n = f_0 + \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{\Delta f_0}{N}$ ,  $n = \overline{1, N}$  и выполним согласование для центральных частот

$f_n$ . Для согласования используем простейшие низкочастотные Г-образные схемы [6,7], которые приведены на рисунке 1.

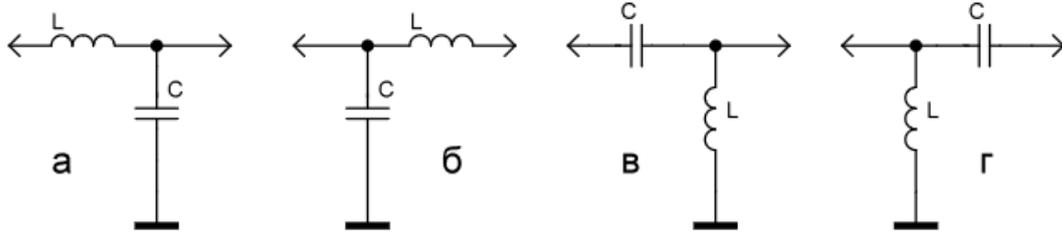


Рис. 1. Типы Г-образных согласующих цепей

С позиций схемной реализации наиболее удобны схемы а) и б) при последовательном включении индуктивности между источником сигнала и нагрузкой, что позволяет минимизировать число дросселей при подаче управляющих напряжений на  $p-i-n$  диоды.

Пусть, например,  $f_0 = 600$  МГц;  $\Delta f_0 = 200$  МГц, в качестве антенны используется симметричный полуволновой вибратор с длиной  $L = 0,238$  м и диаметром 3 мм. Активное и реактивное сопротивление такого вибратора в указанном диапазоне частот приведено на рисунке 2а. На рисунке 2б приведен модуль коэффициента  $S_{11}$  отражения от антенны.

Как следует из рисунка 2б, полоса частот вибратора при типовых требованиях по согласованию, то есть  $S_{11} < -10$  дБ, КСВ  $< 2$  составляет 570...620 МГц.

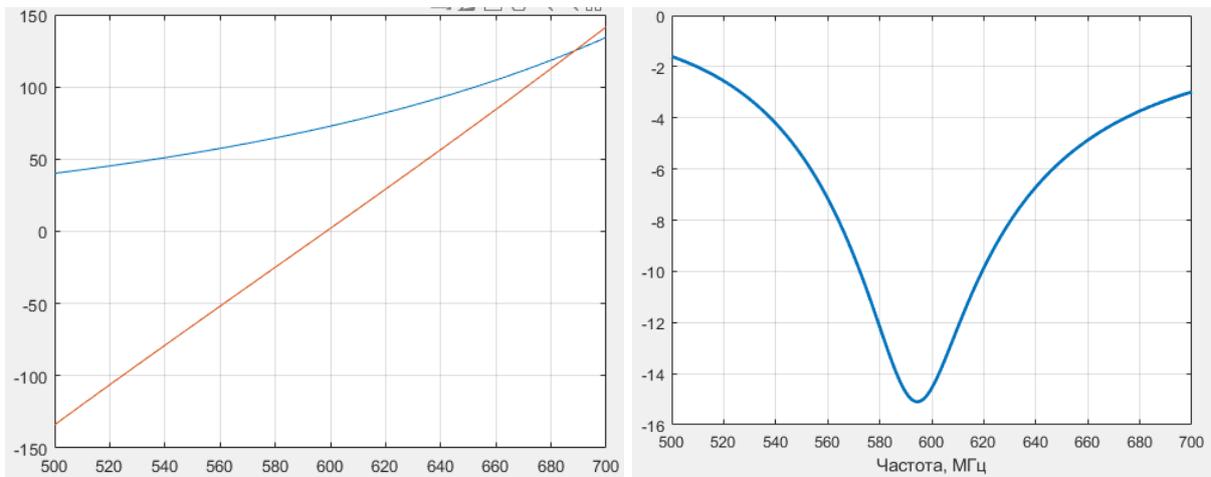


Рис. 2. Активное и реактивное сопротивление вибраторной антенны в полосе частот 500...700 МГц и коэффициент отражения при сопротивлении генератора 50 Ом

Используем разделение на  $N = 4$  поддиапазонов с центральными частотами 525; 575; 625 и 675 МГц. В таблице 1 приведены параметры СЦ на указанные центральные частоты.

Таблица 1. Результаты расчетов цепей согласования для поддиапазонов частот

Частота, МГц	Диапазон частот, МГц	$R_a + jX_a$ , Ом	Тип СЦ	Параметры СЦ
525	[500; 550)	$46,7 - 99,3j$	б	$L_1 = 0,0339$ мкГн; $C_1 = 1,61$ пФ
575	[550; 600)	$66,8 - 31,6j$	а	$L_2 = 0,0110$ мкГн; $C_2 = 1,1$ пФ
625	[600; 650)	$84,7 + 36,0j$	а	$L_3 = 0,0127$ мкГн; $C_3 = 3,63$ пФ
675	[650; 700)	$114,9 + 105,6j$	а	$L_4 = 0,0212$ мкГн; $C_4 = 3,02$ пФ

Как следует из результатов расчетов, необходимо изменять как индуктивность, так и емкость СЦ. Поэтому, наиболее простой и надежный с учетом паразитных емкостей и индуктивностей элементом вариант – это СЦ по вариантам а и б, коммутируемые целиком.

Вариант такой схемотехнической реализации приведен на рисунке 3. Схема содержит 4 параллельно включенные Г-образные СЦ, работающие в своем поддиапазоне частот. Каждая СЦ коммутируется по входу и выходу с использованием двух  $p-i-n$  диодов при их последовательном включении. Подача управляющих напряжений на  $p-i-n$  диоды обеспечивается через дроссели со стороны выходного усилителя мощности и общий дроссель со стороны антенны. В каждый момент времени положительное управляющее напряжение, переводящее  $p-i-n$  диоды в состояние низкого сопротивления, подается только на одну СЦ. Для развязки от управляющего напряжения используются разделительные конденсаторы на входе (по числу СЦ) и, при необходимости, один разделительный конденсатор на выходе.

Выбор  $p-i-n$  диодов определяется мощностью зондирующего сигнала РЛС (как правило, доли-единицы Вт) исходя из минимума сопротивления в открытом состоянии и достаточно большого сопротивления в закрытом состоянии с учетом емкости  $p-i-n$  диода в закрытом состоянии  $0,1 \dots 1$  пФ.

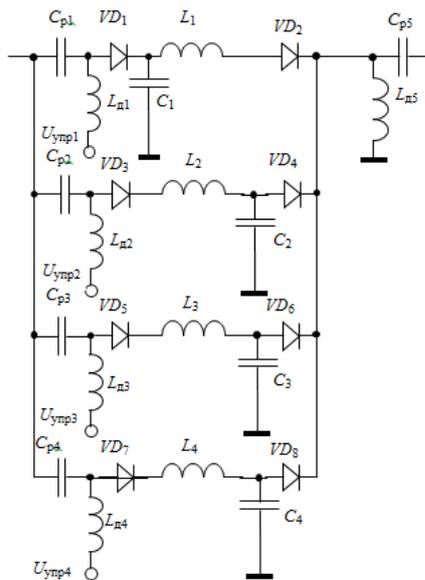


Рис. 3. Схема СЦ на основе динамического согласования

Управление переключением СЦ обеспечивается от синхронизатора (устройства управления) FMCW-радиолокатора по заданной временной диаграмме. При переключении цепей возможны переходные процессы, однако, так как полоса пропускания каждой из СЦ совместно с антенной составляет десятки МГц, то их влияние окажется незначительным.

На рисунке 4 приведены зависимости коэффициента отражения от частоты при рассматриваемом способе динамического согласования и равномерном разделении диапазона 500...700 МГц на 4 поддиапазона. Цель согласования практически достигнута – почти во всем диапазоне частот коэффициент менее минус 10 дБ. Для улучшения согласования можно увеличить число поддиапазонов, то есть, увеличить число параллельно включенных СЦ.

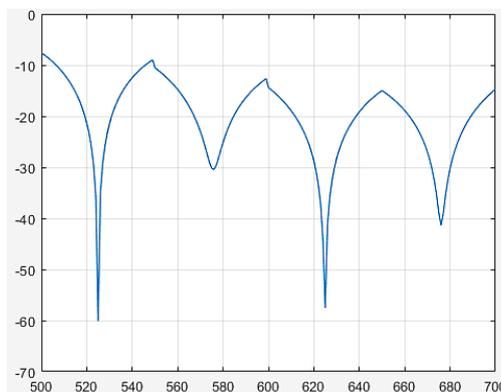
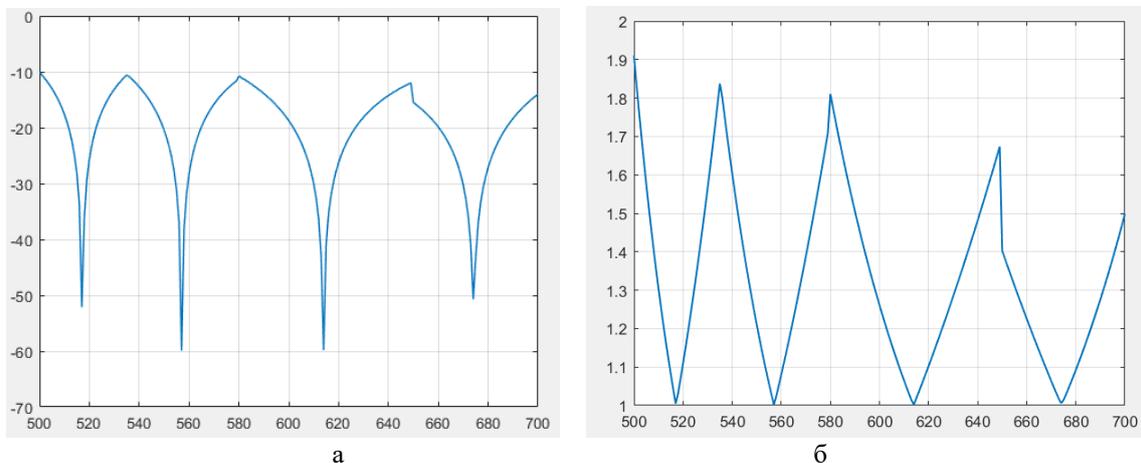


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения от частоты при равномерном распределении поддиапазонов согласования

Однако, как видно из рисунка 4а, для больших частот согласование оказывается лучше. Это дает возможность скорректировать поддиапазоны частот согласования: для более низких частот поддиапазоны должны быть меньше, для более высоких – могут быть больше.

На рисунке 5а приведен результат согласования для следующего разделения на поддиапазоны: 500...536 МГц; 536...580 МГц; 580...650 МГц; 650...700 МГц. На рисунке 5б приведено значение КСВ для указанного случая.



**Рис. 5.** Зависимости коэффициента отражения (а) и КСВ (б) от частоты при неравномерном распределении поддиапазонов согласования

Требуемое значение качества согласования достигнуто во всем диапазоне частот.

### Заключение

Предлагаемый способ динамического согласования обеспечивает возможность использования в широкополосных FMCW-радиолокаторах конструктивно-простых типов антенн с обеспечением согласования антенны с приемо-передающим трактом в существенно более широком диапазоне частот, чем при использовании известных способов.

### Список использованных источников

1. Малевич И.Ю., Лопатченко А.С. Портативный ЛЧМ радар подповерхностного зондирования / Доклады БГУИР, № 1, 2018. – С. 75-81.
2. Горбатов, К. Решение «Альфа-прибор» для измерения скорости железнодорожных составов / К. Горбатов, В. Логинов, Ю. Котенев // СВЧ-электроника №3 2020. – С. 10-16.
3. Richards M.A. Fundamentals of Radar Signal Processing. McGraw-Hill, New York, 2005, 894 p.
4. Кузнецов, В. А., Гончаров С. А. Структурно-параметрический синтез малогабаритной радиолокационной станции с синтезированной апертурой беспилотного летательного аппарата ближнего действия / В.А. Кузнецов, С.А. Гончаров // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3. С. 28-72. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-03/02-Kuznetsov.pdf>.
5. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Малогабаритные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. – М.: Радиотехника, 2020.
6. Гусев Б.В., Лагунов Е.В., Шабунин С.Н. Фильтрация сигналов и согласование нагрузок. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2022.
7. Ренди, Риа. Инь и Янь в вопросах согласования каналов передачи, часть 1 // Электронные компоненты, №4, 2008. – С. 116-119.