

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ МОБИЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ТРЁХМЕРНОГО ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

<sup>1</sup>Шайдуров К. Д., <sup>1</sup>Калмыков А. А.

<sup>1</sup> ФГАОУ ВПО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия (620002 Россия, г.Екатеринбург, ул. Мира, 19), *clawermachine@gmail.com*

**Аннотация:** На основании апробированного подповерхностного радиолокатора СВЧ диапазона строится ОВЧ вариант комплекса при условии пропорционального сохранения точностных характеристик. Приводятся основные принципы построения системы, обеспечивающие конкурентоспособность и выгодно выделяющие комплекс перед другими известными работами. Также разработан ряд аппаратных и программных средств для построения системы. В пакете AWR MO создана модель отрицательного конвертера импеданса (ОКИ), позволяющего реализовать активное широкополосное не перестраиваемое согласование. В программе ANSYS HFSS создана модель ферритовой антенны ОВЧ диапазона, её параметры в формате .sNp импортированы в AWR для реализации согласования. Данные модели позволяют проводить дальнейшие исследования и разрабатывать антенную систему подповерхностного радиолокатора.

Ключевые слова: подповерхностная радиолокация, ЛЧМ-сигнал, синтез апертуры, трёхмерная визуализация, отрицательный конвертер импеданса, широкополосное согласование.

## EVALUATING THE POSSIBILITY OF DESIGNING THREE-DIMENSIONAL GROUND PENETRATING MOBILE TECHNOLOGY

<sup>1</sup>Shaidurov K. D., <sup>1</sup>Kalmykov A. A.

<sup>1</sup> Ural Federal University named after First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia (620002 Russia, Yekaterinburg, street Mira, 19), *clawermachine@gmail.com*

**Abstract:** UHF ground penetrating radar is suggested based on the approved VHF ground penetrating radar implementation. The purpose consists in proportional saving of precision characteristics. The basic principles of creation of system also described. They are providing competitiveness and favourably selecting suggested system before other known decisions. A few hardwares and softwares are also developed for complete designing the system. Model of the Negative impedance converter (NIC) designed in the AWR MO. It allows creating an active wideband not tunable matching circuit. Model of the VHF ferrite antenna designed in the ANSYS HFSS. Its parameters imported to AWR using .sNp format. These models allows to do further investigations and designing the ground penetrating radar antenna system.

Key words: ground penetrating radar, chirp, synthetic aperture radar, three-dimensional visualization, negative impedance converter, wideband antenna matching.

### I. Введение

В работе [1] были изложены принципы построения подповерхностного радиолокатора СВЧ диапазона с непрерывным ЛЧМ сигналом и радиоголографическим синтезом апертуры. Приведённые результаты демонстрируют разрешающую способность

устройства по глубине и дальности. При сохранении принципов построения осуществляется переход к ОВЧ диапазону частот, разработка приборного обеспечения и апробация устройства. За счёт сочетания радиоголографического синтеза апертуры и непрерывного режима излучения требуется достичь выигрыша в энергетике, точности и скорости зондирования.

Целью статьи является оценка существующего алгоритма трёхмерной подповерхностной радиолокации, разработанного научным коллективом автора, с точки зрения реализуемости комплекса низкочастотного зондирования среды в виде базовых модулей на базе группы БПЛА. При этом главным объектом рассмотрения является реализуемость малогабаритной антенной системы ОВЧ диапазона, позволяющей реализовать автоматическое сканирование при создании эквивалентной ММО антенной системы на базе группы БПЛА.

## **II. Основные принципы работы**

Основные принципы построения системы:

- зондирующий сигнал с несимметричной линейной частотной модуляцией;
- непрерывный характер зондирующего сигнала с пропорциональным времени зондирования повышением энергетике;
- внутренняя когерентность;
- радиоголографический синтез трёхмерных изображений;
- дополнительная фокусировка с учётом проницаемости исследуемой среды [2];
- эквивалентная многоканальная антенная система ММО [3], образованная одиночными слабонаправленными антеннами при механическом перемещении;
- сверхмалогабаритная антенная система с активным не перестраиваемым широкополосным согласованием.

Цели их применения состоят в следующем:

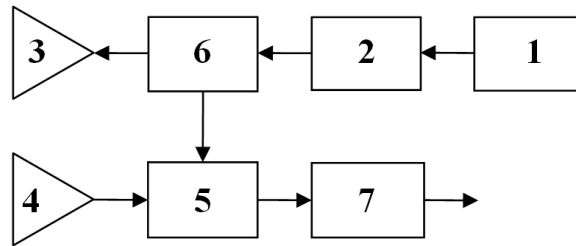
- высокая разрешающая способность по глубине за счёт применения сверхширокополосного зондирующего сигнала;
- высокая разрешающая способность по углу за счёт радиоголографического синтеза апертуры;
- высокая проникающая способность зондирующего сигнала за счёт выбранного рабочего диапазона частот и специальной конструкции электрических малых антенн;
- высокая скорость процесса зондирования.

Упрощённая структурная схема высокочастотной части прибора изображена на рис. 1. Она представляет собой супергетеродинный приём с нулевой промежуточной частотой (сигнал биений) и внутренне когерентна, что необходимо для применения описанных выше принципов радиоголографического синтеза.

Внутренняя когерентность приёмо-передающего тракта позволяет использовать получаемые сигналы биений для построения системы радиочастотной голографии. Известно, что в комплексном спектре сигнала биений содержится вся амплитудная и фазовая информация обо всех отражателях в пределах апертуры одиночного сканирования. Модель сигнала биений, соответствующая точке зондируемого пространства, имеет вид:

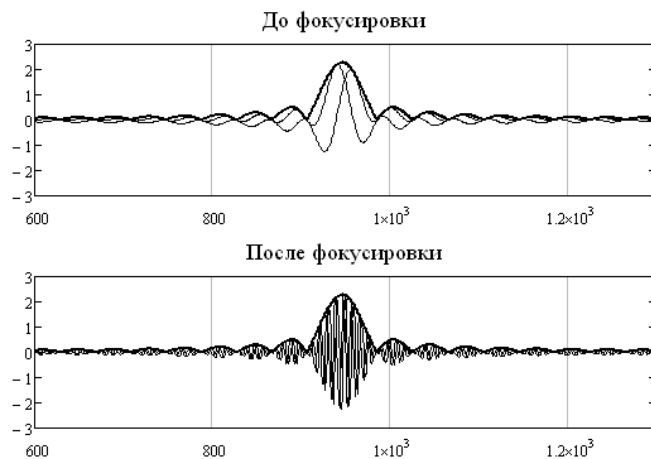
$$s(t) = U \cdot \cos\left(2\pi \frac{\Delta f}{T_m} \tau \cdot t + 2\pi f_0 \tau - \pi \Delta f \tau - \frac{2\pi \Delta f \tau^2}{T_m}\right),$$

где  $\frac{\Delta f}{T_m}$  – крутизна закона модуляции,  $\tau$  – задержка отражённого сигнала,  $U$  – амплитуда.



**Рис. 1. Упрощённая структурная схема высокочастотной части прибора: 1-модулятор; 2-генератор ВЧ; 3-передающая антенна; 4-приёмная антенна; 5-балансный смеситель; 6-делитель мощности; 7-полосовой фильтр**

Осуществляя умножение на поворачивающие множители для каждого сигнала биений, осуществляется фокусировка апертуры (фазирование). При этом действительная и мнимая части спектра сигнала биений для точки изменяются согласно схематичному изображению на рис. 2.



**Рис. 2. Фокусировка при радиолографическом синтезе трёхмерных изображений**

После дополнительной амплитудной нормировки и осуществления процесса когерентного синфазного накопления полезного сигнала по всем точкам пространства сканирования строится трёхмерное радиочастотное изображение зондируемого пространства.

Описанные принципы построения системы были апробированы в макете подповерхностного радиолокатора СВЧ-диапазона [1]. Полученные результаты говорят о работоспособности и эффективности предложенных принципов и позволяют строить на их основе комплекс подповерхностного зондирования ОВЧ-диапазона. Разработано приборное обеспечение комплекса, включающее в себя (рис. 3):

1. Аналоговый приёмо-передающий модуль, состоящий из усилителей мощности, делителей мощности, аттенюаторов, малошумящего усилителя, демодулятора и полосового фильтра, предназначенный для усиления и передачи на передающую антенну зондирующего ЛЧМ-сигнала, приёма и усиления отражённого от сред сигнала, а также его

переноса на нулевую промежуточную частоту (получение сигнала биений) с последующими усилением и фильтрацией.

2. Цифровой приёмо-передающий модуль, включающий в себя микроконтроллер, АЦП, ЦАП, цифровой синтезатор частоты (DDS) и память, предназначенный для формирования ЛЧМ сигнала, приёма и оцифровки сигнала биений при строгом соблюдении синхронности работы АЦП и DDS, а также для формирования пакетов данных и обеспечения интерфейса с ПК.

3. Сверхмалогобаритная антенная система, построенная на электрически малых антеннах с использованием особого характера взаимодействия излучаемого антенной поля с приповерхностным слоем исследуемой среды. Антенны обеспечивают низкий уровень КСВ на входе приёмника благодаря применению активного широкополосного не перестраиваемого согласования на основе отрицательного конвертера импеданса в сочетании с ШПТ.

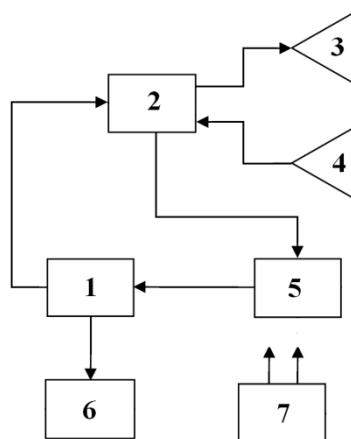


Рис. 3. Функциональная схема базового модуля подповерхностного радиолокатора ОВЧ диапазона: 1-цифровой приёмо-передающий модуль; 2-аналоговый приёмо-передающий модуль; 3-передающая антенна; 4-приёмная антенна; 5-блок усиления-фильтрации по промежуточной частоте; 6-интерфейс связи с ПК; 7-источник питания

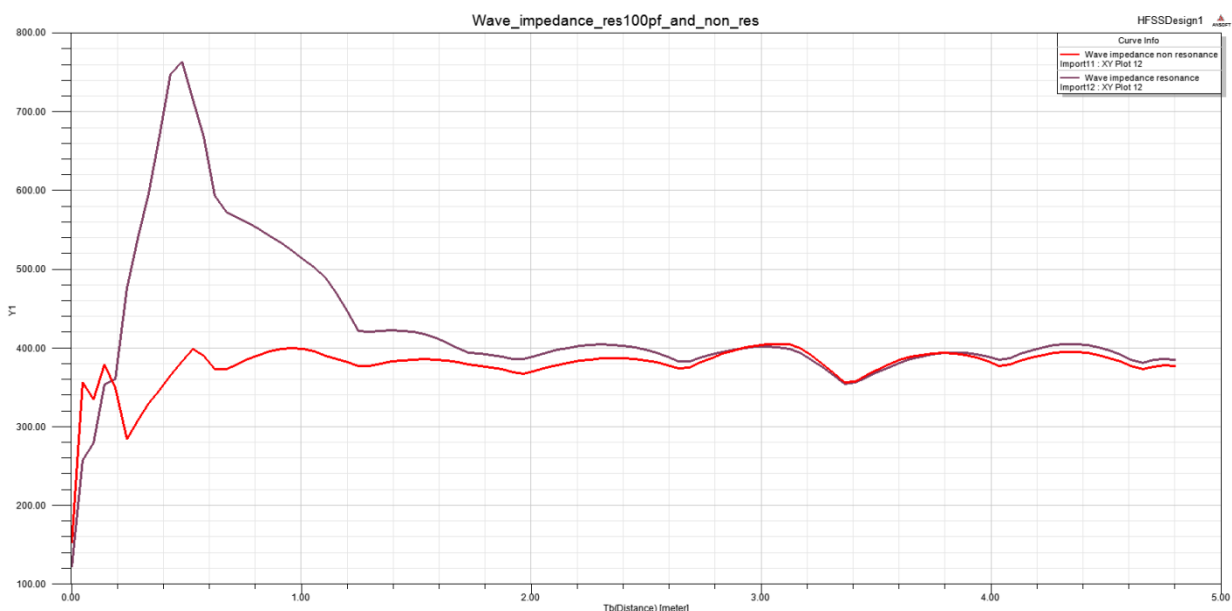
### III. Малогабаритные антенны

В связи с развитием уровня техники и всё возрастающим интересом к миниатюризации электронных устройств вопрос построения эффективных ЭМА набирает всё большую популярность. Высокая добротность антенны влечёт за собой узкую полосу согласования, а также проблемы, связанные с резонансным режимом работы антенны. Поэтому оптимизация структуры и компонентов антенны, а также разработка новых пассивных либо активных согласующих цепей является важным этапом в создании различных радиоэлектронных устройств. Учитывая затронутые ранее вопросы создания ММО апертуры, работающей на достаточно низкой частоте в ОВЧ диапазоне, при этом имеющей малые массогабаритные показатели, коллектив авторов выбрал ферритовые антенны как наиболее подходящие по массогабаритным показателям, позволяющим реализовать упомянутую мобильную технологию подповерхностного зондирования.

Конструкции ферритовых антенн достаточно однотипны и подробно описаны в книгах, например, [4]. Поэтому, задаваясь желаемым максимально допустимым линейным размером антенны, в программе ANSYS HFSS была создана следующая модель: ферритовый стержень диаметром 20 мм и длиной 220 мм с относительными

проницаемостями  $\epsilon_R = 11$ ,  $\mu_r = 10$ , объёмной проводимостью  $\rho = 10^7$  Ом/м и тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\Delta_\epsilon = 0.0008$  (параметры, близкие к параметрам феррита 1СЧ-4) несёт на себе катушку из  $N$  витков провода диаметром  $D$  мм с намоткой шагом  $K$ . При этом величины  $N$ ,  $D$  и  $K$  параметризованы и позволяют выполнять численную оптимизацию. Антенна имеет дискретный элемент ёмкости, позволяющий настраивать её в резонанс.

В первую очередь рассмотрим границу дальней зоны магнитной ферритовой антенны. По определению данную границу можно определить по достижению волнового сопротивления значения в  $120\pi$  Ом. Из графика на рис. 4 видно, что в резонансном режиме граница дальней зоны излучения находится на расстоянии 1.5–2 метра, тогда как в нерезонансном – всего лишь 1 метр. Из этого следует вывод, что при высотах полёта БПЛА больше 3-5 метров поверхность земли не попадает в ближнюю зону излучения антенны.



**Рис. 4. К определению дальней зоны антенны (м) по волновому сопротивлению среды (Ом): резонансный режим (сверху), нерезонансный режим (снизу)**

Рисунки напряжённостей электрического и магнитного полей вблизи антенны изображены на рис. 5. Наглядно демонстрируется структура формируемых электрических и магнитных полей в ближней зоне, доказывающих «магнитную» природу антенны в ближней зоне излучения.

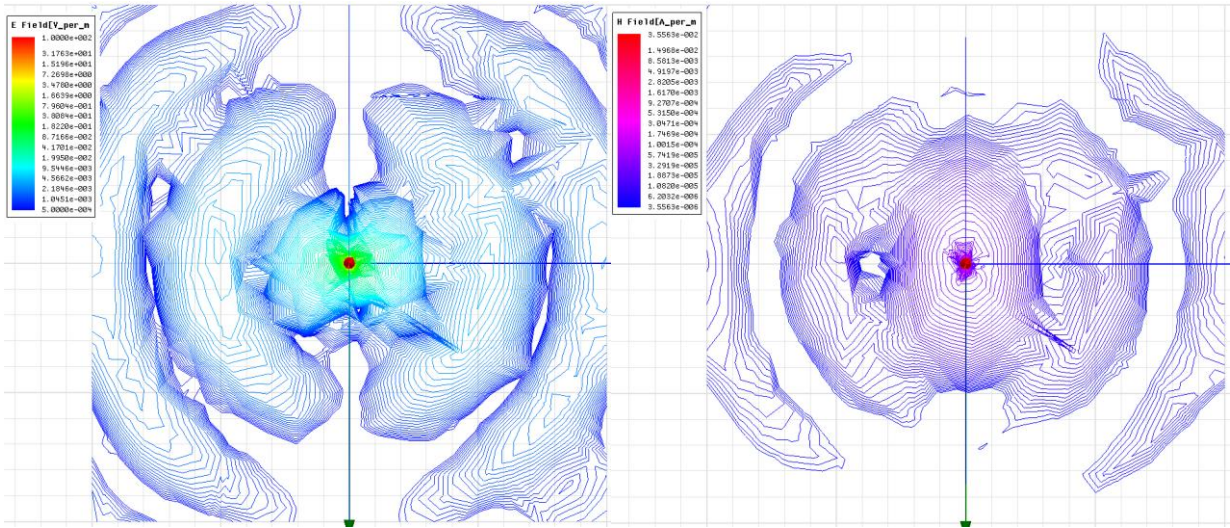


Рис. 5. Рисунки напряжённостей электрического (слева) и магнитного (справа) полей вблизи антенны

Для расчёта энергетического потенциала радиолокатора следует иметь приблизительные оценки эффективности антенной системы. В табл.1 приведены автоматически вычисленные средой HFSS показатели эффективности ферритовой антенны. Здесь *Incident power* – мощность генератора, *Accepted power* – мощность, прошедшая в антенну (с учётом согласования по входу), *Radiated power* – излученная мощность с учётом эффективности антенны согласно следующим формулам:

$$Accepted\ power = Incident\ power \cdot (1 - |S_{1,1}|^2),$$

$$Radiated\ power = Accepted\ power \cdot Radiation\ efficiency.$$

Таблица 1 Показатели эффективности антенны

Число витков	2	5	10
Входная мощность (Incident power), Вт	1	1	1
Прошедшая мощность (Accepted power), Вт	0.02329	0.010451	0.0056767
Излучённая мощность (Radiated power), Вт	0.00015004	0.0001492	0.00012431
Эффективность излучения (Radiation efficiency)	0.0064424	0.014277	0.021899

#### IV. Широкополосное согласование

Одной из главных проблем предлагаемого комплекса является построение малогабаритной антенной системы и согласование импеданса антенны. Это является следствием экстремального уменьшения электрических размеров антенн по сравнению с длиной волны, что вызывает рост добротности антенны согласно формулировке предела Вилера-Чу.

Для широкополосного согласования целесообразно использовать отрицательный конвертер импеданса [5] (ОКИ; не Фостеровская цепь), который построен на основе теоремы Фостера. Пример согласования не Фостеровской цепью показан на рис.6. Его главное преимущество заключается в широкополосности согласования, не ограниченной

теоретически, и зависящей от характера импеданса антенны и реализации схемы ОКИ, а также ограничиваемой элементами схемы и паразитными параметрами активного элемента. Принципы построения ОКИ и множество их реализаций подробно описаны в [6,7]. В рамках решаемой задачи нас интересуют схемы без земли (floating) на биполярных либо полевых транзисторах.

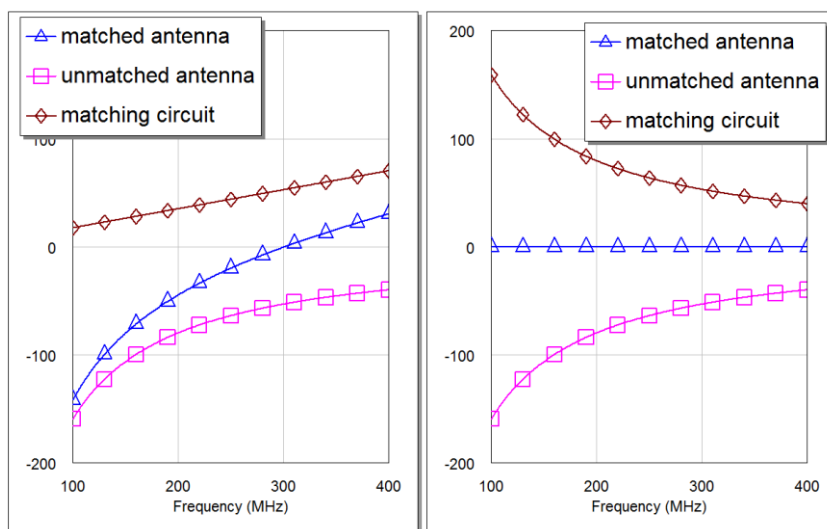


Рис. 6. Сравнение резонансной (слева) и не Фостеровской (справа) схем согласования

Суть работы ОКИ в таком случае наглядно объясняется [6] рис.7. Известно, что реактивное сопротивление представляет собой сдвиг фаз, и для ёмкости и индуктивности соответственно равно:

$$X_C = -\frac{1}{\omega C}, X_L = \omega L$$

Если же повернуть фазу на 180°, то получим отрицательные ёмкость и индуктивность соответственно:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, X_L = -\omega L.$$

Такие элементы ведут себя «зеркально» относительно прототипов, и их импеданс падает с частотой, демонстрируя поведение не Фостеровской цепи. Описанное не Фостеровское согласование исследуется с целью согласования приёмной антенны ППРЛ ОВЧ диапазона с непрерывным излучаемым сигналом. При этом имеются строгие требования по габаритам, а в сочетании со сложностью реализации схемы согласования по принципу антенных тюнеров (коммутируемые ёмкости) и предложением работы в ближней зоне решено применять ферритовую антенну с активным широкополосным не перестраиваемым согласованием ОКИ с дальнейшим исследованием работы в ближнем преимущественно магнитном поле магнитной антенны.

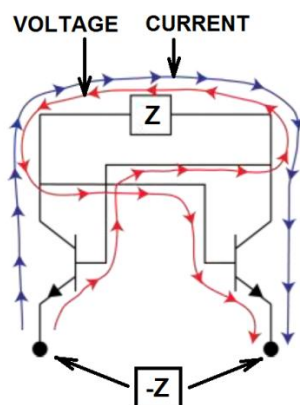
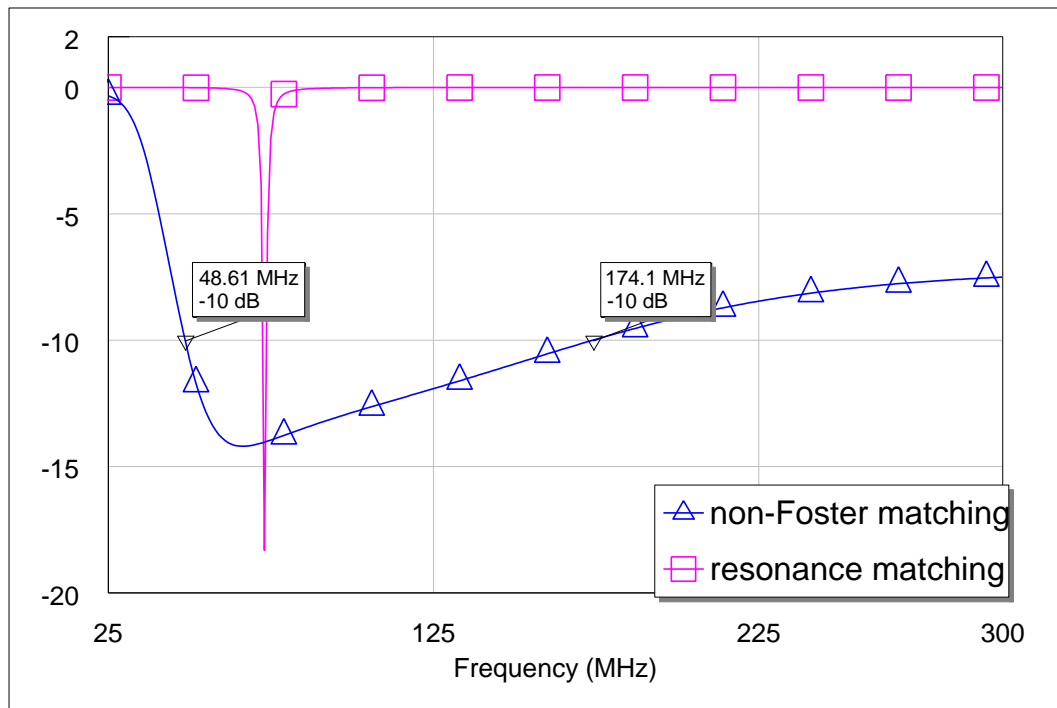


Рис. 7. Пояснение поворота фазы в ОКИ

Основываясь на описанных выше идеях, в программе AWR Microwave Office создана модель ОКИ на двух двухзатворных полевых транзисторах. Объектом согласования является входное сопротивление ферритовой антенны, смоделированной в ANSYS HFSS и описанной в предыдущем параграфе. В результате перебора различных вариантов построения модели для проведения работы выбрана следующая конструкция ферритовой антенны: ферритовый стержень, несущий на себе две симметричные обмотки с питанием в центре, а также подобмоточный экран, замыкающий холодные концы обмоток на сигнальную землю и образующий емкостную часть реактивного входного сопротивления антенны (к тому же, емкостной ОКИ в реализации проще индуктивного).

Результаты расчёта входного сопротивления ферритовой антенны в формате .sNr импортированы в программу AWR Microwave Office и включены в схему согласования в виде эквивалента антенны. Схема согласования представляет собой простейшую цепь из эквивалента антенны и согласующего элемента, в качестве которого выступает импедансно-сопряжённый элемент для резонансного согласования и ОКИ для не Фостеровского согласования. Результаты расчёта коэффициента отражения на входном порту (вход приёмника) с сопротивлением 50 Ом показаны на рис. 8. Видно, что не Фостеровское согласование позволяет достичь намного большей полосы согласования.





**Рис. 8 Коэффициент отражения при резонансном и не Фостеровском согласовании, дБ.**

Стоит отметить, что уровень передачи мощности схемы составляет примерно -3 дБ по диапазону, и проанализированная в AWR двухпортовая устойчивость  $K$  выше единицы, что говорит об устойчивости схемы. Но при этом следует учитывать внутренние потенциальные источники нестабильности, такие как резонанс преобразуемого элемента ( $Z$ ) с паразитной входной ёмкостью транзистора (высокочастотный резонанс), блокировочными дросселями (низкочастотный резонанс) и т.д. Поэтому при разработке схемы стоит уделять особое внимание анализу цепей ОС. Например, минимизировать индуктивность дорожек ОС при конвертировании ёмкости [7].

## V. Выводы

1. На основании апробированного подповерхностного радиолокатора СВЧ диапазона с непрерывным ЛЧМ сигналом предложено построение ОВЧ варианта локатора для размещения на базе группы БПЛА с целью проведения скоростного и высокоточного зондирования сред.
2. Описывается ряд приборных и алгоритмических решений, обеспечивающих функционирование ОВЧ ППРЛ и выделяющих его перед известными СВЧ ППРЛ в силу особенностей построения.
3. Система позиционирования БПЛА является темой отдельной разработки, влекущей за собой экспериментальное исследование комплекса в целом.
4. Проведено компьютерное моделирование отрицательного конвертера импеданса (ОКИ) в программе AWR MO, затронуты вопросы усиления и устойчивости схемы.
5. На основании созданной в программе ANSYS HFSS модели ферритовой антенны показана возможность построения не Фостеровской согласующей цепи, реализующей активное широкополосное не перестраиваемое согласование приёмной антенны.

6. Результаты оптимального согласования, полученного в AWR, отличаются от экспериментально подобранного оптимального согласования в HFSS на 2 пФ.

7. Созданные модели позволяют проводить дальнейшие исследования в области построения подповерхностного радиолокатора ОБЧ диапазона с использованием радиолокационного синтеза апертуры.

## VI. References

1. Dobryak V. A., Kalmykov Al. A., Kalmykov An. A., Kurilenko A. S. Theory and practice of three-dimensional radio frequency visualization of objects. 2013 23th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2013). Sevastopol, 2013, pp. 1169-1170.
2. Dobryak V. A., Kalmykov Al. A., Kalmykov An. A., Kurilenko A. S. Additional focusing in the problem of three-dimensional radio-frequency visualizations of subsurface objects. 2014 24th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2014). Sevastopol, 2014, pp. 1185-1186.
3. Dobryak V. A., Kalmykov Al. A., Kalmykov An. A., Kurilenko A. S. Applications of MIMO-lines in the problem of three-dimensional radio-frequency visualizations of subsurface objects. 2014 24th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2014). Sevastopol, 2014, pp. 1195-1196.
4. Khomich V.I. Ferrite receiving antennas : textbook / V.I. Khomich. – Moscow, Leningrad : Gosehnergoizdat, 1963. – 64 p.
5. Sussman-Fort, S.E. Matching Network Design Using Non-Foster Impedances [Electronic resource] / S.E. Sussman-Fort ; Dept. Electrical and Computer Engineering State University of NY. – Stony Brook. – 43 p. – Mode of access: [http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/matching\\_network\\_design\\_non\\_foster\\_impedances.pdf](http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/matching_network_design_non_foster_impedances.pdf)
6. Dan Sievenpiper, Minu Jacob, Jiang Long. Materials and Components With a Negative Frequency Derivative of Reactance [Electronic resource] / Dan Sievenpiper, Minu Jacob, Jiang Long ; Univ, of California. – San Diego. – 22 p. – Mode of access: [http://www.e3s-center.org/pubs/106/PEB2012\\_7\\_DSievenpiper\\_Webfinal.pdf](http://www.e3s-center.org/pubs/106/PEB2012_7_DSievenpiper_Webfinal.pdf)
7. Oluwabunmi O. Tade. Negative impedance converters for antenna matching [Electronic resource] / diss. ... dr of philosophy (electrical engineering) / Oluwabunmi O. Tade ; College of Engineering and Physical Sciences, University of Birmingham. – Birmingham. – 246 p. – Mode of access: <http://etheses.bham.ac.uk/4920/1/Tade14PhD.pdf>