

Анализ характеристик электромагнитной связи системы передачи Balise на основе цифрового двойника



applied sciences

Qi Geng , Yinghong Wen , Dan Zhang , Jianjun Xiao , Yun Zhu , Linfu Zhu

Analysis of Electromagnetic Coupling Characteristics of Balise Transmission System Based on Digital Twin

Appl. Sci. 2021, 11(13), 6002; <https://doi.org/10.3390/app11136002>

<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/13/6002/htm>

(Эта статья относится к специальному выпуску «Прикладной электромагнетизм в современной технике и медицинских технологиях»)

Сигнальный перевод 2022 г. Куприяновский В.П. v.kupriyanovsky@rut.digital

Абстракт

Балансовая система передачи (BTS) - это система автоматической идентификации для связи между автомобилем и землей, основанная на технологии радиочастотной идентификации (RFID). Характеристики электромагнитной связи BTS имеют очень важное влияние на качество передачи сигналов телеграммы восходящей линии связи. Однако проблемы с передачей сигнала BTS часто возникают из-за необоснованного режима установки или настройки параметров. Чтобы решить эти проблемы, необходимо полностью обсудить характеристики электромагнитной связи BTS. В этой статье процесс передачи энергии и данных между бортовым антенным блоком и балансиrom был проанализирован с использованием технологии цифровых двойников. Высокоточная модель динамической электромагнитной связи BTS была создана на основе четырех аспектов трехмерной структуры, физических свойств, моделей поведения и ограничений правил. Затем точность модели была проверена экспериментально. Наконец, влияние типичных параметров на сигнал восходящей линии связи рассчитывается и анализируется количественно. Результаты показали, что по сравнению с другими факторами, обсуждаемыми в этой статье, вертикальное расстояние и режим установки имели большее влияние на сигнал восходящей линии связи. Эти результаты могут быть использованы для руководства инженерной установкой и соответствующей оптимизации BTS.

Ключевые слова: балансирующая система передачи; цифровой двойник; электромагнитная муфта; количественная оценка

1. Введение

Как ключевая подсистема системы управления поездом, система балансирующей передачи (BTS) завершает передачу информации между наземным балансиrom и бортовым оборудованием посредством электромагнитной индукции, чтобы реализовать позиционирование поезда и идентификацию информации о линии. BTS широко используются в железнодорожных сигнальных системах мира. Европа и Китай выпустили спецификации для BTS,

в которых оговариваются условия, которым должны соответствовать BTS [1,2,3]. Однако с углублением международных железнодорожных обменов и увеличением использования транснациональных поездов качество связи между Balise и бортовым оборудованием сталкивается с новыми проблемами. Эти Balise и бортовой антенный блок (OAU) из разных стран и производителей используют разные концепции дизайна, что может привести к потере характеристик передачи из-за неудовлетворительного согласования после того, как эти устройства будут работать вместе [4]. Эти проблемы еще больше снижают надежность BTS и угрожают безопасности движения поездов [5]. Следовательно, характеристики электромагнитной связи между OAU и балансиrom BTS должны быть полностью проанализированы.

В последние годы некоторые ученые изучали процесс электромагнитной связи BTS. В [6] статическая модель сбалансированной передачи данных по восходящей линии связи была установлена методом конечных элементов, а распределение электромагнитного поля процесса было получено путем электромагнитного моделирования. В [7] динамический процесс передачи данных по восходящей линии связи был смоделирован и проанализирован с использованием теории электромагнитного поля, а соответствующие предложения по оптимизации были выдвинуты с точки зрения высоты установки и режима установки между OAU и балансиrom. В соответствии с методом испытаний, рекомендованным стандартом, характеристики электромагнитной связи BTS были протестированы и проанализированы в [8]. Модель электромагнитной связи BTS была установлена в [9], и была проанализирована причина наведенной огибающей амплитуды напряжения бортовой приемной антенны в процессе связи. В [10] создана расчетная модель рабочего расстояния балансира и проанализировано влияние различных режимов установки на характеристики электромагнитной связи. В [11] метод оценки характеристик передачи, основанный на модели эквивалентного импеданса, был предложен для контроля качества передачи BTS по нисходящей линии связи. В [12] расчет на модели огибающей индуктивной амплитуды напряжения балансирующей приемной антенны нисходящего канала во время процесса связи был определен эффект боковых лепестков, и с помощью этой модели был проанализирован эффект боковых лепестков. Кроме того, Подмножество-036 предоставляет некоторые требования для BTS, но эти требования обычно имеют больший допустимый диапазон.

Однако, хотя процесс электромагнитной связи BTS обсуждался и анализировался в упомянутой выше литературе, проблема согласования системы в различных технических условиях применения не была полностью решена. Влияние различных режимов установки, вертикального расстояния и бокового отклонения между OAU и балансиrom на характеристики передачи сигнала телеграммы восходящей линии связи не было полностью изучено. Кроме того, интенсивность сигнала дистанционного включения нисходящей линии связи также влияет на характеристики передачи сигнала телеграммы восходящей линии связи, но это не обсуждалось в какой-либо литературе. Чтобы полностью понять сложную взаимосвязь между различными факторами, участвующими в процессе электромагнитной связи BTS, и установить модель электромагнитной связи, которая объединяет вышеупомянутые факторы, необходимо найти новый метод исследования для достижения этой цели.

Цифровой двойник (DT) - важная технология для изображения, моделирования, оптимизации и визуализации физического мира в информационном мире. Концепция DT была впервые предложена Гриверсом в 2003 г. [13] и впервые была применена в аэрокосмической области. В последние годы, с углублением исследований DT, становится все более очевидным, что наиболее значительным преимуществом DT является то, что оно может точно и своевременно отражать фактическое состояние обслуживания физических лиц для улучшения информационных услуг в жизни. цикл сущностей [14]. В [15] была предложена модель цифрового двойника литий-ионных

аккумуляторов для оценки ухудшения характеристик аккумуляторов. В [16] была создана модель цифрового двойника корабля на основе данных, собранных датчиками, и с помощью этой модели была успешно оценена потеря скорости, вызванная загрязнением морской среды. В [17] предлагается собственная структура для прогнозирования производительности производственной линии на основе технологии цифрового двойника, которая может контролировать производительность производственной линии при внезапном изменении производственного спроса. В [18] была создана DT-модель фюзеляжа для прогнозирования вероятности разрушения критических компонентов фюзеляжа. В [19] технология DT использовалась для моделирования автомобильных мостов для оценки рисков безопасности. Вышеупомянутое исследование доказывает большой потенциал DT в предсказании плохого поведения сложных систем [20].

Кроме того, особенность технологии DT состоит в том, что она может всесторонне описывать модель с четырех аспектов: трехмерная структура, физические характеристики, модели поведения и ограничения норм [21]. Процесс электромагнитной связи BTS - это динамический интерактивный процесс, который нельзя полностью объяснить традиционной статической моделью. DT - хороший способ преодолеть это противоречие. С помощью метода DT этот динамический процесс может быть полностью проанализирован и обсужден с различных аспектов, упомянутых выше.

Целью этого исследования был количественный анализ характеристик электромагнитной связи BTS с использованием технологии цифровых двойников. В этой статье был представлен процесс электромагнитной связи BTS, и основные факторы, участвующие в процессе электромагнитной связи, были качественно проанализированы с использованием метода диаграммы «рыбья кость». Затем, в соответствии с этими чувствительными факторами, была создана аналитическая модель или подгоночная модель каждого модуля в процессе передачи данных. Комбинируя эти модульные модели, была успешно создана модель цифрового двойника для количественного анализа этих чувствительных факторов. Эксперименты были разработаны для проверки достоверности и точности модели цифрового двойника. Наконец, модель цифрового двойника использовалась для количественной оценки влияния некоторых чувствительных параметров на характеристики электромагнитной связи BTS.

Остальная часть этого документа организована следующим образом: В разделе 2 рассматривается процесс электромагнитной связи BTS, а ключевые факторы процесса электромагнитной связи обсуждаются на диаграмме «рыбья кость». Раздел 3 устанавливает высокоточную модель электромагнитной связи BTS. В разделе 4 проводятся два эксперимента для проверки модели цифрового двойника. Затем влияние некоторых чувствительных параметров на процесс электромагнитной связи количественно анализируется в разделе 5. Раздел 6 является обсуждением и заключением.

2. Моделирование основы цифрового двойника

2.1. Основной принцип работы BTS

BTS - важный носитель поезда, позволяющий вовремя получать информацию о текущем состоянии движения. BTS состоит из бортового оборудования (модуль балансировки передачи (BTM) и OAU, который включает передающую антенну и приемную антенну) и наземного оборудования (пассивный балансир, активный балансир и линейный электронный блок). Схема работы BTS представлена на рисунке 1.

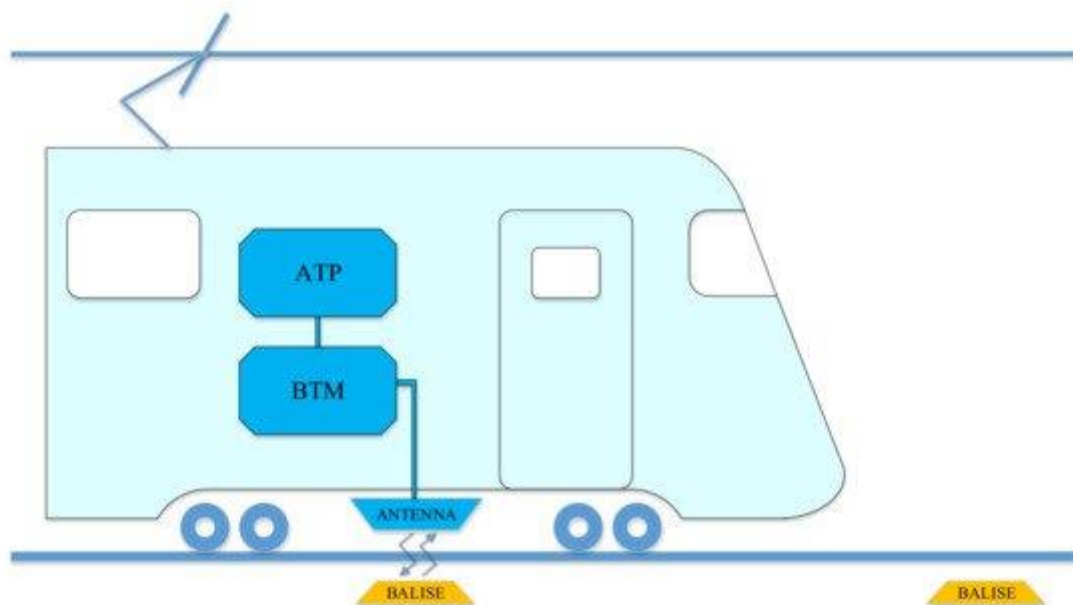


Рисунок 1. Схема работы BTS.

Во время движения поезда бортовая передающая антенна непрерывно посылает сигналы дистанционного питания на землю. Когда поезд приближается к пассивной балансировке, балансир активируется из состояния ожидания. После входа в активный режим балансир отправляет сохраненные сигналы телеграммы в соответствии с указанным форматом, модуляцией и скоростью передачи данных. Полученные сигналы дистанционного питания преобразуются в сигналы питания для пассивной балансировки. Когда сигнал дистанционного питания слишком слаб, чтобы обеспечить работу пассивной балансировки, процесс отправки сигналов телеграммы завершается. Во время активации балансировки сигналы телеграммы отправляются циклически. Питание активного балансира осуществляется от линейного электронного блока. BTM получает сигналы телеграмм через бортовую приемную антенну. Принятые сигналы, амплитуда которых превышает пороговый уровень BTM, будут отправлены на следующий схемный модуль для обработки. BTM выполняет следующие функции: балансирование питания, получение сигнала, фильтрация, усиление, демодуляция и декодирование и, наконец, сообщает результаты декодирования ядру автоматической защиты поездов (ATP). Таким образом, ядро ATP могло регулировать состояние движения поезда во времени, комбинируя информацию телеграммы и других датчиков.

В процессе связи BTS качество передачи сигнала телеграммы восходящей линии связи связано с тем, может ли ядро ATP успешно получать эффективные сигналы телеграммы. В SUBSET-036 обсуждалось несколько параметров, влияющих на характеристики передачи сигнала. Расстояние по вертикали между OAU и балкой должно составлять от 220 до 460 мм. Бальзам можно установить в середине пути продольно или поперечно. Кроме того, спецификация не выдвигает конкретных требований к форме и размеру бортовых антенн. Сила тока сигнала дистанционного питания на бортовой передающей антенне также ограничена косвенно.

Фактически, согласно предыдущим исследованиям, изменение мощности сигнала телеграммы восходящей линии связи с направлением движения поезда напрямую влияет на эффективное расстояние передачи и эффективное время передачи сигнала телеграммы восходящей линии связи [5]. Следовательно, характеристика электромагнитной связи, обсуждаемая в этом документе, относится к изменению мощности сигнала телеграммы восходящей линии связи, принимаемого бортовой приемной антенной, в зависимости от смещения антенны.

2.2. Факторный анализ процесса электромагнитной связи

Чтобы установить модель электромагнитной связи BTS с высокой точностью воспроизведения, необходимо найти все ключевые факторы, которые влияют на процесс электромагнитной индукции, путем качественного анализа. Что касается требований, изложенных в [1], и обсуждения рабочего процесса системы в предыдущем разделе, ключевые факторы, влияющие на прием сигнала восходящей линии связи, анализируются методом анализа диаграммы «рыбья кость».

По их признакам на Рисунке 2 классифицируются все факторы: нормативные ограничения, определенные производителем, и неконтролируемые. Более того, они обозначаются буквами N, D и U соответственно.

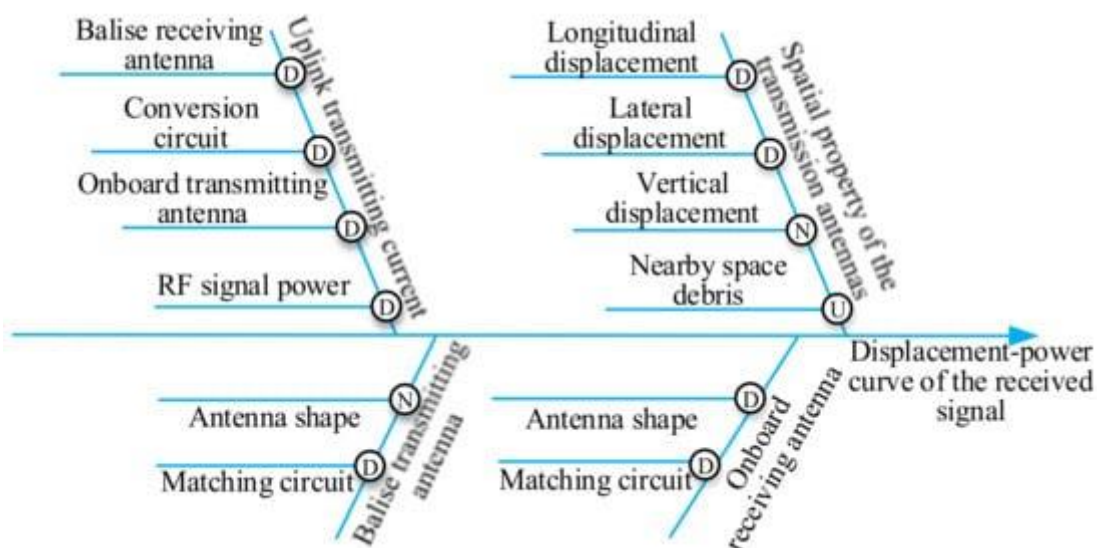


Рисунок 2. Диаграмма Fishbone влияющих факторов принимаемого сигнала восходящей линии связи.

Сигнал восходящей линии связи, принимаемый ВТМ, зависит от четырех аспектов: балансировки передающей антенны, передаваемого тока восходящей линии связи, бортовой приемной антенны и пространственных свойств передающих антенн.

Характеристики балансировочной передающей антенны и бортовой приемной антенны зависят от формы, размера и схем согласования каждой антенны. Однако, за исключением того, что в SUBSET-036 требуются форма и размер балансировочной антенны, конструкция ОАУ не имеет слишком многих ограничений. Для ОАУ необходимо только пройти соответствующие тесты в SUBSET-085, чтобы обеспечить базовую производительность, требуемую спецификацией тестирования. Поэтому для параметров, не указанных в спецификации, производитель оборудования может использовать различные конструкции для достижения требуемых характеристик оборудования.

Во время работы поезда ток передачи по восходящей линии связи пассивного балансира непостоянен. Эта ситуация может в дальнейшем привести к потере качества передачи сигнала. Ток восходящей линии связи зависит от бортовой передающей антенны, сигнала дистанционного питания, сбалансированной приемной антенны и ее внутренних схем преобразования. Среди них свойства схемы преобразования могут быть проверены в соответствии с тестом балансных входных и выходных характеристик в SUBSET-085.

Пространственные свойства между передающей антенной и балансирующей антенной в трехмерном пространстве зависят от продольного (направление движения поезда), бокового

(перпендикулярно пути), вертикального (высота установки) смещения и обломков (например, льда и снега, гравия). , металлический блок) в примыкании nt пространство антенны.

Вышеупомянутые факторы вместе оказывают важное влияние на качество передачи телеграфного сигнала восходящей линии связи. Как справиться с взаимосвязью между этими факторами и моделью DT обсуждается в следующих главах.

3. DT-модель процесса электромагнитной связи BTS.

3.1. Конструктивное проектирование DT-модели процесса электромагнитной связи BTS

Компоненты оборудования BTS и принципы их работы обсуждались в разделе 2.1. Факторы, влияющие на процесс электромагнитной связи BTS, качественно обсуждались в разделе 2.2. На основе этих двух подразделов в этом подразделе обсуждается структура DT-модели процесса электромагнитной связи BTS. Затем предлагается проектная схема модели системного уровня и указываются цели и задачи моделирования для каждой подмодели. Связь отображения между реальной BTS и DT-моделью процесса электромагнитной связи системы показана на рисунке 3.

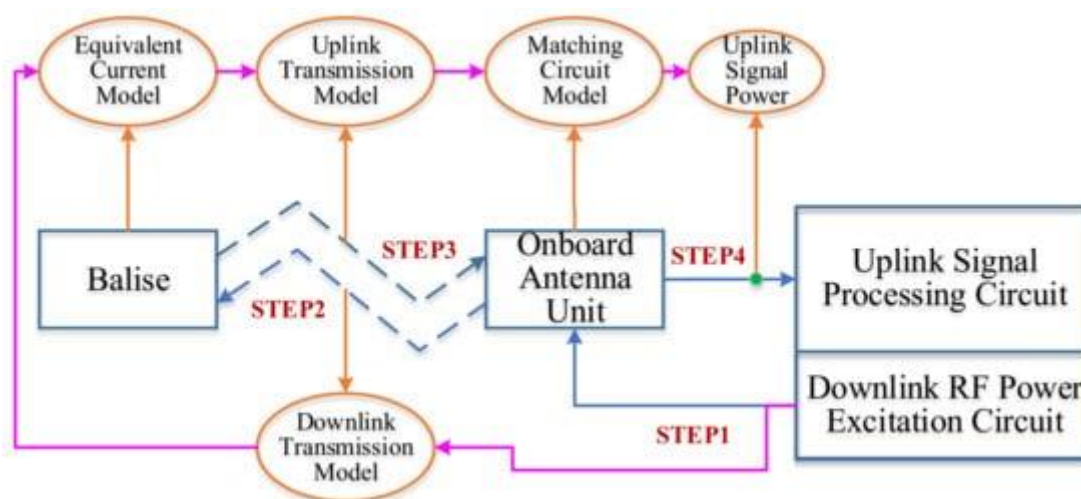


Рисунок 3. Принципиальная схема модели взаимной индуктивности между симметричной антенной и бортовой антенной.

Схема возбуждения нисходящей линии связи ВТМ передает сигнал мощности РЧ на балансирующую антенну через бортовую передающую антенну, а балансирующая приемная антенна принимает магнитный поток нисходящей линии связи. Процесс передачи этого мощного РЧ-сигнала требует модели передачи по нисходящей линии связи для описания влияния на магнитный поток, принимаемый сбалансированной приемной антенной, из-за силы тока РЧ-сигнала мощности, формы и размера антенны, а также относительного изменения положения антенн. во время движения поезда.

После того, как сбалансированная приемная антенна принимает сигнал мощности РЧ, балансировка активируется из неактивного состояния. Внутренняя схема преобразования балансного преобразователя обрабатывает радиочастотный сигнал мощности, чтобы обеспечить ток передачи для сигнала восходящей линии связи на пассивную балансирующую передающую антенну. Этот процесс требует эквивалентной текущей модели пассивной балансировки, которая описывает сопоставление силы магнитного потока, принимаемого балансирующей приемной антенной, с силой тока сигнала восходящей линии связи балансирующей передающей антенны.

Бортовая приемная антенна принимает сигнал восходящей линии связи от балансной передающей антенны через интерфейс с воздушным зазором. Магнитный поток, принимаемый бортовой приемной антенной, зависит от формы и размера антенны, силы тока на

балансирующей передающей антенне и относительного положения между антеннами. Для этого процесса требуется модель передачи по восходящей линии связи.

Схема согласования бортовой приемной антенны может улучшить характеристики приемной антенны и уменьшить потери в характеристиках передачи, вызванные рассогласованием импеданса и сдвигом резонансной частоты. Следовательно, модель схемы согласования бортовой приемной антенны необходима для прогнозирования взаимосвязи между магнитным потоком сигнала восходящей линии связи, принимаемого бортовой приемной антенной, и мощностью сигнала восходящей линии связи на входном порте ВТМ.

Поскольку относительные положения ОАУ и балансировки постоянно меняются во время движения поезда, модели передачи как по восходящей, так и по нисходящей линии связи должны полностью отражать изменения в характеристиках передачи сигнала, вызванные такими динамическими факторами. Модели передачи по восходящей и нисходящей линии связи имеют сходство и являются моделями электромагнитной индукции. Поэтому для обеих моделей фундаментальной задачей было создание точной модели взаимной индукции между антеннами.

Комбинируя вышеупомянутые подмодели, теоретически может быть успешно создана DT-модель процесса электромагнитной связи BTS. Чтобы осуществить количественный анализ характеристик электромагнитной связи BTS, сложно точно построить каждую из вышеупомянутых подмоделей и реализовать соединение подмоделей без потерь.

3.2. Расчет взаимной индуктивности между ОАУ и Balise

Уравновешивающая антенна и автомобильная антенна обычно имеют конструкцию прямоугольной катушечной антенны, которая принадлежит к электрической малой рамочной антенне. Согласно исследованию [22], когда ОАУ BTS находится на расстоянии более 11 см от металлической пластины, влиянием вихревого магнитного поля, создаваемого металлической пластиной, на ОАУ можно пренебречь. Следовательно, мы можем создать упрощенную модель процесса передачи восходящего канала в BTS, как показано на рисунке 4.

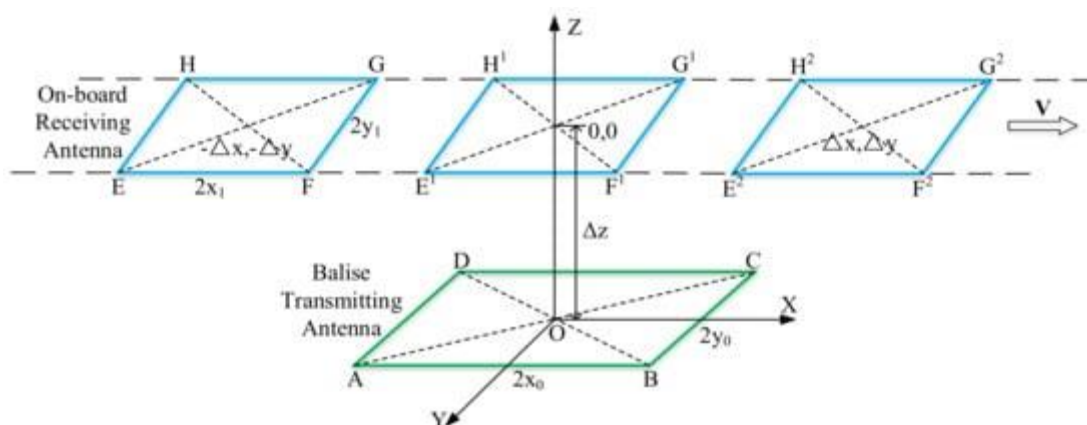


Рисунок 4. Принципиальная схема модели взаимной индуктивности между симметричной антенной и бортовой антенной.

Прямоугольная ABCD представляет собой балочную передающую антенну, а прямоугольная EFGH — бортовую приемную антенну. Устанавливается трехмерная прямоугольная система координат, принимая за начало координат центр передающей антенны бализа. Он принимает направления, параллельные сторонам AB и DA балочной передающей антенны, как ось OX и ось OY. Пусть направление, перпендикулярное передающей антенне бализа, будет осью OZ. Вектор скорости поезда $V \rightarrow$ соответствует положительному направлению оси OX.

Пусть μ_0 — проницаемость вакуума, а x_0 и y_0 — половина длины стороны балочной передающей антенны вдоль оси OX и оси OY соответственно. Пусть x_1 и y_1 — половина длины стороны бортовой приемной антенны вдоль оси OX и оси OY соответственно. $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ — координата центральной точки бортовой приемной антенны. Аналитическая модель взаимной индуктивности между двумя параллельными прямоугольными антеннами в произвольных относительных положениях может быть получена путем применения метода векторного потенциала второго порядка [23].

$$M = \frac{2\mu_0}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k e^{-k\Delta z + j(a\Delta x + b\Delta y)} \frac{\sin(ax_0)}{a} \cdot \frac{\sin(by_0)}{b} \cdot \frac{\sin(ax_1)}{a} \cdot \frac{\sin(by_1)}{b} da db. \quad (1)$$

Уравнение (1) является важной основой для количественной оценки характеристик электромагнитной связи BTS. Это объясняет взаимодействие между бортовой приемной антенной и балисом. Наведенное напряжение бортовой приемной антенны также можно рассчитать по (1).

3.3. Моделирование и анализ схемы согласования

Чтобы обеспечить эффективность передачи телеграммных сигналов и уменьшить искажение сигнала, вызванное отражением и групповой задержкой, антенны BTS обычно согласовывают по импедансу. Эквивалентная схема антенн передачи сигнала восходящей линии связи с использованием согласующей схемы L-типа показана на рисунке 5.

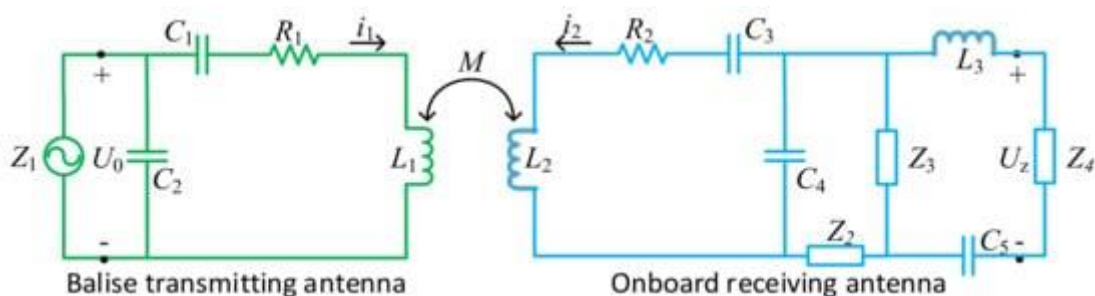


Рисунок 5. Эквивалентная схема антенн передачи сигнала восходящего канала.

Для восходящей передающей антенны бализа Z_1 — входное сопротивление, C_1 и C_2 — конденсаторы последовательной и параллельной настройки, соответственно, R_1 представляет собой сумму эквивалентного сопротивления передающей антенны и сопротивления последовательных потерь, а L_1 представляет собой эквивалентная индуктивность передающей антенны. i_1 — ток, протекающий через передающую антенну-бализ. Для бортовой приемной антенны L_2 представляет собой эквивалентную индуктивность бортовой приемной антенны. i_2 — наведенный ток бортовой приемной антенны. R_2 представляет собой сумму эквивалентного сопротивления и сопротивления последовательных потерь бортовой приемной антенны. C_3 и C_4 — последовательные и параллельные подстроечные конденсаторы соответственно. Z_2 и Z_3 — резисторы для согласования импедансов, Z_4 — импеданс нагрузки. L_3 и C_5 используются для фильтрации сигнала дистанционного питания. M — взаимная индуктивность между передающей антенной бализа и бортовой приемной антенной.

Данная статья посвящена анализу эквивалентной схемы бортовой приемной антенны. Назначение параллельного подстроечного конденсатора C_4 состоит в том, чтобы уменьшить относительно большой импеданс, включенный параллельно с правой стороны, чтобы действительная часть была равна R_2 . Добротность Q_r приемной антенны можно изменять, регулируя сопротивление R_2 . Роль последовательно включенного настроечного конденсатора C_3

заключается в том, чтобы резонировать с эквивалентной индуктивностью антенны L_2 и параллельным конденсатором C_4 , таким образом компенсируя реактивную часть цепи.

Поскольку в бортовой приемной антенне обычно используется одновитковая прямоугольная плоская рамочная антенна, ее эквивалентной емкостью можно пренебречь, а эквивалентную индуктивность L_2 можно рассчитать [24] следующим образом:

$$L_2 = \frac{\mu_0}{\pi} \left\{ l_a \cdot \ln \left[\frac{e^{2a} b}{d_c \cdot (l_a + \sqrt{l_a^2 + l_b^2})} \right] + l_b \cdot \ln \left[\frac{e^{2a} b}{d_c \cdot (l_b + \sqrt{l_a^2 + l_b^2})} \right] \right. \\ \left. - 2 [l_a + l_b - \sqrt{l_a^2 + l_b^2}] + \frac{l_a + l_b}{4} \right\}, \quad (2)$$

где l_a и l_b — размеры длинной и короткой сторон прямоугольной плоской рамочной антенны соответственно, а d_c — диаметр эквивалентного цилиндрического проводника с таким же периметром поперечного сечения антенного проводника.

$$d_c = \frac{2(t+w)}{\pi}, \quad (3)$$

где t — толщина проводника прямоугольной рамочной антенны, а w — ширина проводника.

Добротность Q_r согласующей цепи можно рассчитать следующим образом:

$$Q_r = \sqrt{\frac{Z_{total}}{R_2} - 1}, \quad (4)$$

где Z_{total} можно рассчитать в соответствии со структурой схемы:

$$Z_{total} = Z_2 + \frac{Z_3 \left(j\omega L_3 + Z_4 + \frac{1}{j\omega C_5} \right)}{j\omega L_3 + Z_4 + \frac{1}{j\omega C_5} + Z_3}. \quad (5)$$

Таким образом, после определения добротности Q_r можно рассчитать общее сопротивление R_2 последовательной цепи.

Значение реактивного сопротивления X_s согласующего контура, включенного последовательно с антенной, и значение реактивного сопротивления X_p согласующего контура, включенного параллельно антенне, можно выразить как:

$$\begin{cases} X_s = Q_r R_2 \\ X_p = \frac{Z_{total}}{Q_r} \end{cases}, \quad (6)$$

По резонансной частоте спроектированной схемы можно рассчитать параметры соответствующих компонентов индуктора и конденсатора.

$$\begin{cases} L_s = \frac{X_s}{\omega} = \frac{Q_r R_2}{2\pi f_0} \\ C_p = \frac{1}{\omega X_p} = \frac{Q_r}{2\pi f_0 Z_{total}} \end{cases}, \quad (7)$$

В уравнении (7) L_s представляет собой индуктивность в последовательной цепи, а C_p представляет собой емкость, подключенную параллельно выходному имп. еданс ($C_p=C_4$).

Поскольку антенна является индуктивной, ее индуктивность L_2 не равна расчетному значению приведенной выше последовательной индуктивности L_s с согласованным импедансом. Следовательно, индуктивность самой антенны можно использовать для согласования импеданса.

Для оставшейся индуктивности $\Delta L=L_2-L_s$, когда ΔL больше 0, мнимая часть согласуется с 0 через последовательную емкость, поэтому C_3 можно рассчитать следующим образом:

$$C_3 = \frac{1}{\omega^2 (L_2 - L_s)} = \frac{1}{2\pi f_0 (2\pi f_0 L_2 - Q_r R_2)}. \quad (8)$$

Уравнение двойной сетки всей эквивалентной схемы может быть выражено как:

$$\begin{cases} \left(R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{Z_0}{j\omega C_2 Z_0 + 1} \right) i_1 - j\omega M i_2 = U_0 \\ j\omega M i_1 - \left(R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_3} + \frac{Z_{total}}{j\omega C_4 Z_{total} + 1} \right) i_2 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

При настройке бортовой приемной антенны на центральную частоту 4,234 МГц сумма мнимых частей $j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_3} + \frac{Z_{total}}{j\omega C_4 Z_{total} + 1}$ должна быть равна 0, а действительная часть $\frac{Z_{total}}{j\omega C_4 Z_{total} + 1}$ равна R_2 , поэтому:

$$i_2 = \frac{j\omega M i_1}{2R_2}. \quad (10)$$

Когда ΔL меньше 0, последовательную индуктивность можно использовать для увеличения индуктивности последовательной цепи, чтобы компенсировать емкостное реактивное сопротивление параллельной цепи для достижения состояния согласования. В это время резонансный ток i_2' бортовой приемной антенны на центральной частоте можно рассчитать аналогичным образом:

$$i_2' = i_2 = \frac{j\omega M i_1}{2R_2}, \quad (11)$$

Следовательно, напряжение порта шунтирующего конденсатора C_4 равно:

$$U_{x_{total}} = \frac{Z_2 - j\omega C_4 Z_{total}^2}{2R_2 (1 + \omega^2 C_4^2 Z_{total}^2)} \times j\omega M i_1. \quad (12)$$

Объединяя (1), (5) и (12), можно получить напряжение порта полного сопротивления нагрузки Z_4 после согласования и фильтрации:

$$U_{x_4} = \frac{2A_x f_0 \omega i_1 (Q_r + j)}{\pi} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k e^{-k\Delta x + j(a\Delta x + b\Delta y)} \cdot \frac{\sin(ax_0)}{a} \cdot \frac{\sin(by_0)}{b} \cdot \frac{\sin(ax_1)}{a} \cdot \frac{\sin(by_1)}{b} dadb. \quad (13)$$

$$\text{where } A_x = \frac{Z_3 Z_4}{(Z_2 Z_3 + Z_2 Z_4 + Z_3 Z_4)}.$$

Согласно (13) видно, что напряжение восходящего сигнала, принимаемого бортовой приемной антенной после хорошего согласования импедансов, связано с добротностью антенны и не имеет

ничего общего с реактивными составляющими в цепи согласования. На напряжение также влияют размер передающей антенны баллиса и бортовой приемной антенны, относительное пространственное положение между антеннами и ток, протекающий через передающую антенну. Принятое напряжение восходящего сигнала пропорционально силе тока на передающей антенне балансира.

3.4. Эквивалентная модель пассивного баллиса, передающего ток

В зависимости от источника энергии баланса соответственно изменяется i_1 в (13). LEU подает ток на активную передающую антенну, поэтому сила тока может поддерживаться постоянной во время связи. Однако в пассивном балансира в качестве источника энергии используется принимаемый телесигнал, а на величину передаваемого тока влияет принимаемый магнитный поток, который изменяется при продольном смещении между антеннами.

Чтобы точно описать изменение силы тока передачи сигнала восходящей линии связи пассивной балки с интенсивностью магнитного потока принятого сигнала мощности ВЧ нисходящей линии связи, необходимо смоделировать входные-выходные характеристики пассивной балки. Непосредственное построение такой модели является сложной задачей для баллиса, внутренние схемы преобразования которого содержат нелинейные устройства. К счастью, спецификация теста SUBSET-085 предлагает метод тестирования черного ящика для сбалансированных входных-выходных характеристик. В соответствии с входной-выходной характеристикой балансира эквивалентная текущая модель балансира может быть получена путем подгонки кривой.

При прохождении поезда через пассивный баллиса ток на передающей антенне баллиса определяется магнитным потоком ϕ_d , проходящим через приемную антенну баллиса, и входными-выходными характеристиками баллиса:

$$\phi_d = M_d i_d. \tag{14}$$

M_d — взаимная индуктивность между бортовой передающей антенной с дистанционным питанием и приемной антенной-баллизом, которую можно рассчитать по формуле (1). Ток возбуждения i_d является регулируемой константой, предоставляемой ВТМ. Балансная входная-выходная характеристика определяется его внутренней схемой преобразования и должна соответствовать требованиям спецификации функционального интерфейса SUBSET-036 [1], как показано на рисунке 6.

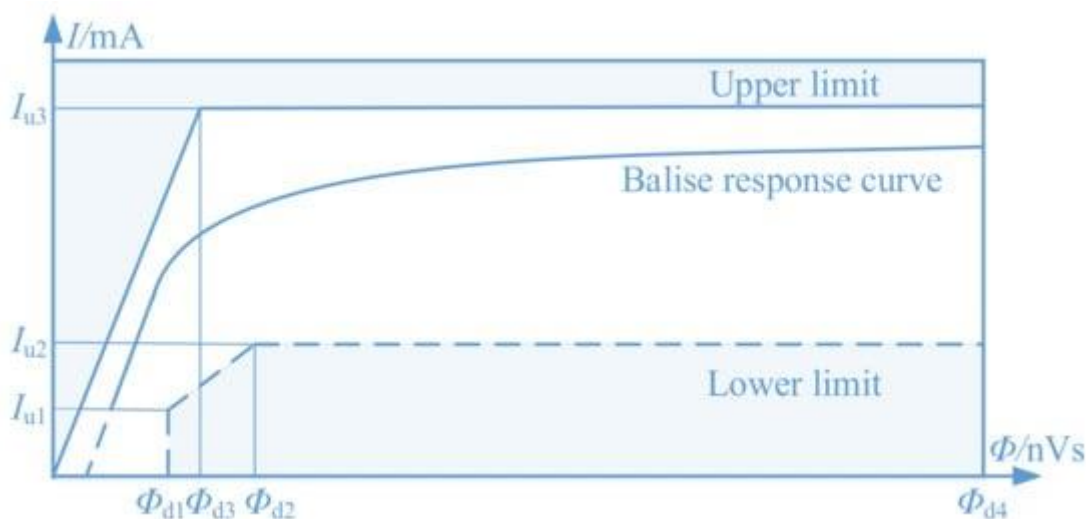


Рис. 6. Входные-выходные характеристики Balise.

По оси абсцисс отложен магнитный поток телесигнала, принимаемого бализой. По оси ординат отложен ток на передающей антенне балансира, который исходит от принятого магнитного потока, обработанного внутренними схемами преобразования. Соответствующие требования к параметрам баллиса уменьшенного размера в спецификации SUBSET-036 показаны в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики тьюков уменьшенного размера.

Tele-Powering Magnetic Flux (nVs)	Loop Current (mA)
$\phi_{d1} = 4.9$	$I_{u1} = 37$
$\phi_{d2} = 7.7$	$I_{u2} = 59$
$\phi_{d3} = 5.8$	$I_{u3} = 186$
$\phi_{d4} = 130$	$I_{u3} = 186$
$\phi_{d5} = 250$	Non-permanent damage

Мы можем подобрать кривую на рисунке 6 с помощью модели одномерной нелинейной регрессии:

$$i_{\phi} = a_{\phi} + b_{\phi}\phi_d + \frac{c_{\phi}}{\phi_d^2} + \frac{d_{\phi}}{\phi_d^6}, \quad (15)$$

В (15) a_{ϕ} , b_{ϕ} , c_{ϕ} и d_{ϕ} — константы, ϕ_d представляет собой магнитный поток, а i_{ϕ} представляет ток на передающей антенне баллиса.

Согласно рисунку 6, ток восходящей линии балансировки положительно коррелирует с магнитным потоком, проходящим через приемную антенну балансира, но это нелинейная зависимость. Точная входная-выходная характеристика балансировки i_s основа для создания текущей модели восходящего канала пассивного баланса. К счастью, в [2] был предложен метод измерения этой входной-выходной характеристики баланса. Кроме того, это испытание также является необходимой частью функционального испытания баллиса. Таким образом, упрощенный метод состоит в том, чтобы получить характеристическую кривую входа-выхода балансира путем тестирования и использования (15) для подгонки кривой, опуская моделирование сложных схем преобразования внутри балансира.

В соответствии с требованиями теста входных-выходных характеристик балансира в спецификации теста был протестирован определенный тип пассивного балансира. Блок-схема подключения испытательного оборудования и тестовая схема показаны на рис. 7 и рис. 8 соответственно. Программа испытаний и процедуры соответствовали требованиям спецификации. Стоит отметить, что в этом тесте расстояние по вертикали между тестовой антенной и балансом составляло 220 мм.

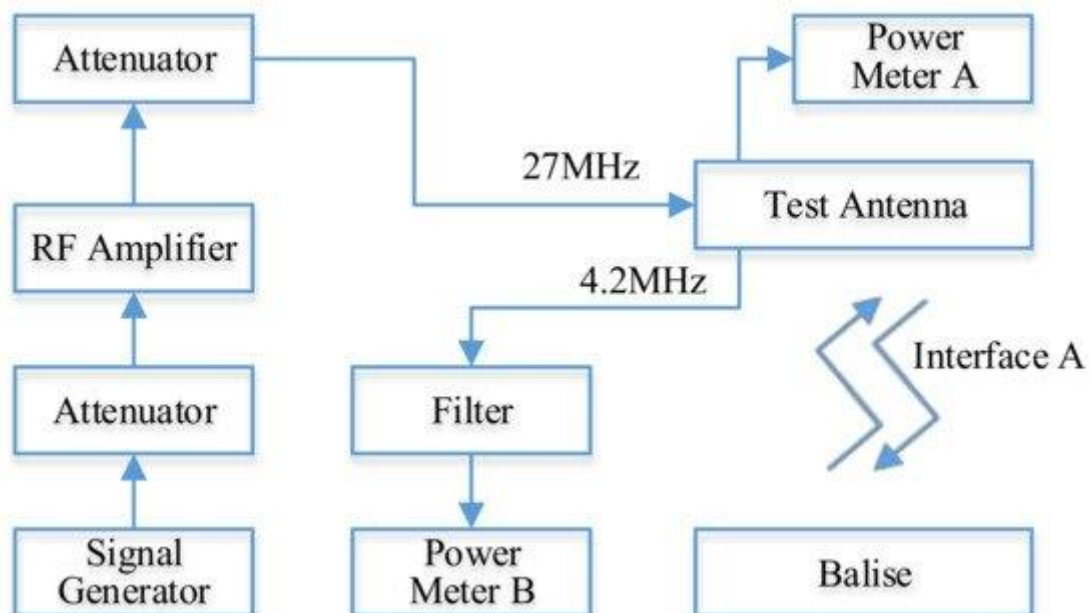


Рис. 7. Конфигурация тестирования входных и выходных характеристик Balise.

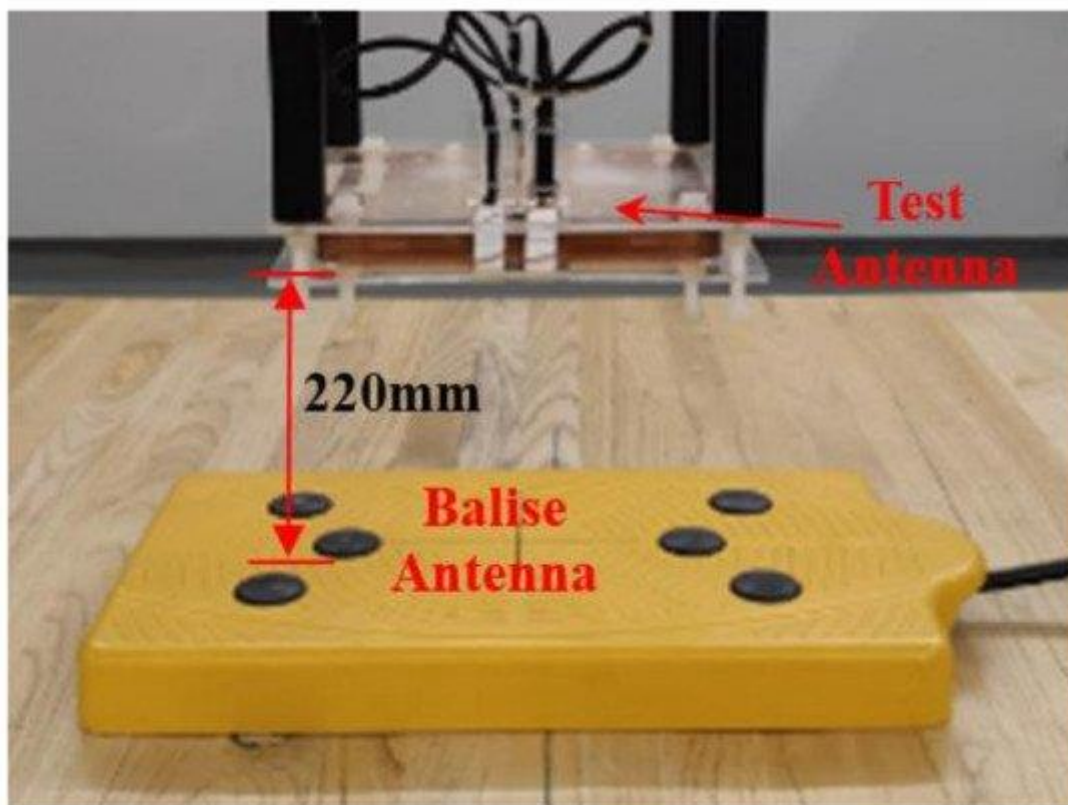


Рис. 8. Сценарий тестирования входных и выходных характеристик Balise.

Испытание проводилось в лаборатории, которая соответствовала требованиям к испытательному оборудованию и испытательной среде, указанным в спецификации. Красная звездочка на рис. 9 — это результат тестирования входных-выходных характеристик балансировки. На этом основании уравнение (15) использовалось для подгонки результатов, и кривая подгонки показана синей пунктирной линией на рисунке 9. Уравнение регрессии выглядит следующим образом:

$$i_{\phi} = 82 + 0.04141\phi_d - \frac{74.06}{\phi_d^2} - \frac{22820}{\phi_d^6}. \quad (16)$$

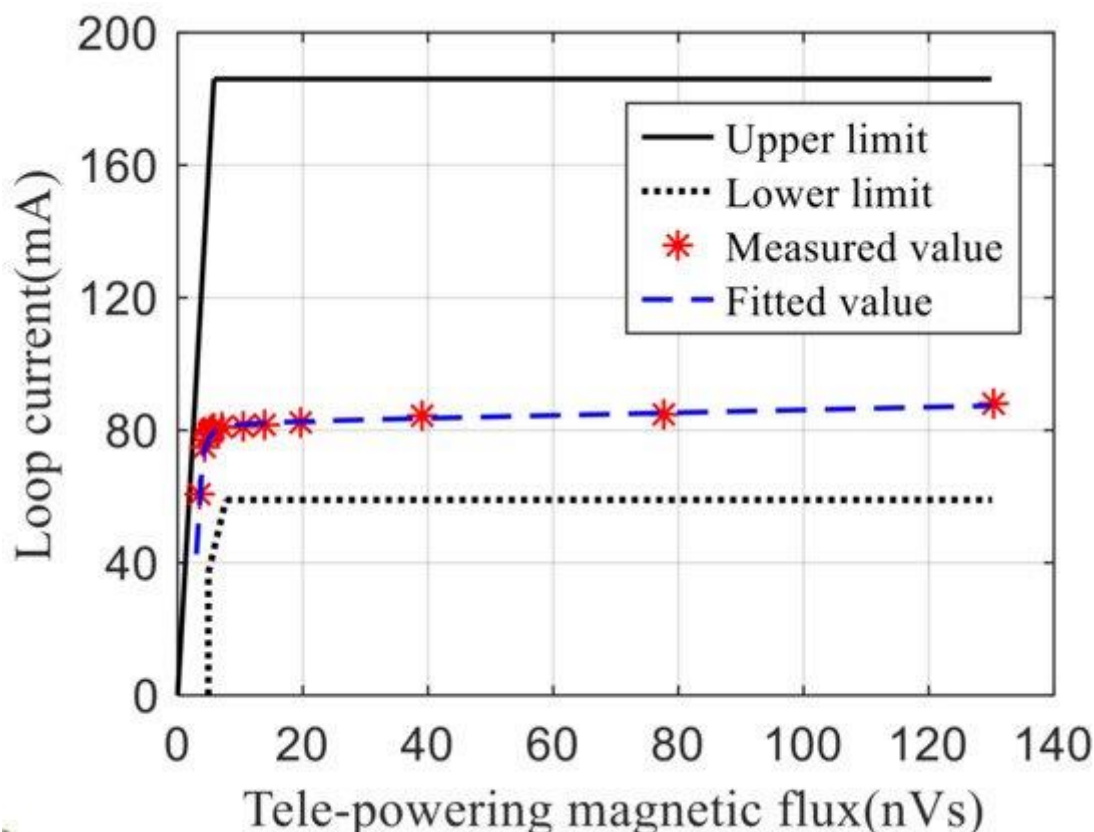


Рисунок 9. Результаты тестирования и подгонки входной-выходной характеристики балансировки.

В качестве критериев согласия модели использовались коэффициент детерминации R^2 и среднеквадратическая ошибка (RMSE):

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_e (y_e - i_{\phi_e})^2}{\sum_e (y_e - \bar{y})^2} \right). \quad (17)$$

где y_1, \dots, y_e — результаты измерения входных-выходных характеристик балки, e — общее количество точек измерения, i_{ϕ_e} — соответствующий результат подгонки, рассчитанный по (16).

Согласно расчету, коэффициент детерминации R^2 уравнения регрессии равен 0,9946, а СКО — 0,2221. Эти показатели показывают, что аппроксимация кривых входных-выходных характеристик балансировки дала удовлетворительные результаты.

Комбинируя (14) и (16), выражение для расчета тока восходящей линии связи выглядит следующим образом:

$$i_{\phi} = 82 + 0.04141M_d i_d - \frac{74.06}{(M_d i_d)^2} - \frac{22820}{(M_d i_d)^6}, \quad (18)$$

Передача информации BTS осуществлялась ближнепольной индукционной связью. Расстояние связи было намного меньше длины волны сигнала, поэтому мы могли игнорировать эффект многолучевости и эффект доплеровского сдвига в процессе связи. Согласно (13), (14) и (18) модель цифрового двойника процесса электромагнитной связи BTS была успешно создана. С помощью этой модели можно было точно рассчитать интенсивность сигнала телеграммы, подаваемой на бортовую приемную антенну, когда OAU и балис находились в любом относительном положении.

3.5. Модель DT процесса электромагнитной связи BTS

Три наиболее важные подмодели процесса электромагнитной связи BTS разработаны в Разделе 3.2., Разделе 3.3 и Разделе 3.4 соответственно. В этом подразделе, основанном на исследованиях предыдущих четырех подразделов, подмодели объединяются, и успешно создается DT-модель процесса электромагнитной связи BTS, как показано на рисунке 10.

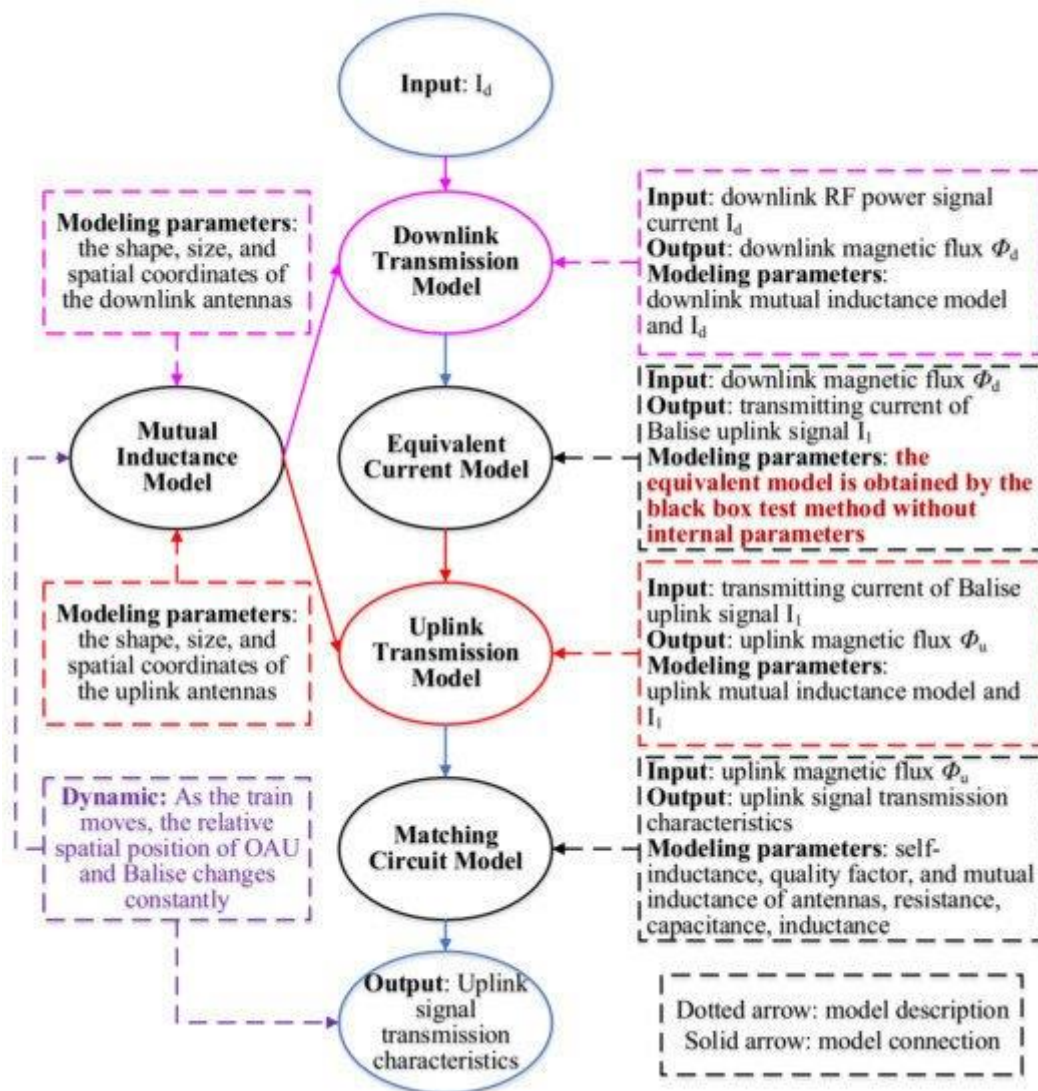


Рисунок 10. Модель DT процесса электромагнитной связи BTS.

Модель взаимной индуктивности между антеннами использовалась при построении модели передачи по восходящей или нисходящей линии связи. Модель передачи по восходящему каналу необходима для расчета взаимной индуктивности между бортовой приемной антенной и балочной передающей антенной, как показано в (1). Для модели передачи по нисходящему каналу антенны модели взаимной индуктивности стали бортовой передающей антенной и балочной приемной антенной, и соответствующие параметры антенны в (1) необходимо было заменить.

Модель передачи по нисходящей линии связи может быть получена в соответствии с (14). В (14) M_d относится к взаимной индуктивности между передающими антеннами нисходящей линии связи, которую можно рассчитать, обратившись к (1).

Эквивалентная текущая модель пассивного баллиса была получена методом тестирования черного ящика, как показано в (18). При изменении пассивного баланса мы сначала использовали метод тестирования черного ящика, чтобы получить кривую результатов тестирования входных и выходных характеристик баллиса, а затем получили соответствующую эквивалентную модель тока в соответствии с результатом подбора (15).

В соответствии с моделью передачи по восходящей линии связи и моделью схемы согласования бортовой приемной антенны можно рассчитать мощность сигнала восходящей линии связи, принимаемого бортовой приемной антенной, при любом взаимном расположении OAU и балансира, как показано в (13). Ток i_1 в (13) является током передачи восходящей линии связи, что согласуется с i_f в (18) для пассивной нагрузки.

Слияние вышеупомянутой подмодели привели к модели DT на уровне системы, которая позволила проанализировать процесс электромагнитной связи BTS. Влияние изменения различных параметров системы на характеристики передачи сигнала восходящей линии связи можно было бы количественно изучить с помощью этой DT-модели.

4. Экспериментальная проверка модели цифрового двойника

В этом разделе два эксперимента предназначены для проверки предложенной модели электромагнитной связи. OAU и balise в экспериментах были получены от производителя оборудования BTS в Китае. Тест проводился в лаборатории, квалификация, окружающая среда и соответствующее испытательное оборудование которой соответствовали требованиям SUBSET-085. Для оценки сходства между расчетными результатами модели электромагнитной связи и фактическими измеренными результатами в качестве оценочных показателей использовались коэффициент корреляции Пирсона и ранговый коэффициент корреляции Спирмена. Однако вышеупомянутые два метода были применимы только для оценки линейных или монотонных нелинейных отношений и не годились для работы со сложными нелинейными отношениями между различными данными [25]. Чтобы компенсировать вышеуказанные недостатки, максимальный коэффициент взаимной информации (MIC) [26] был использован в качестве дополнения, чтобы судить о наличии нелинейной корреляции между двумя результатами.

4.1. Проверка соответствия поля дистанционного питания

В табл. 2 приведены габаритные параметры и типовые параметры OAE и пассивного баллиса производства производителя BTS, у которых габаритные параметры бортовой приемной антенны соответствовали габаритным параметрам передающей антенны. i_d представляет ток сигнала дистанционного питания на бортовой передающей антенне. Для OAU и balise в таблице 2 мы измерили соответствие поля дистанционного питания в лаборатории со ссылкой на [2]. Тестовая конфигурация и тестовый сценарий показаны на рис. 11 и рис. 12 соответственно.

Расстояние по вертикали между ОАЕ и балисом было установлено равным 340 мм. Балза во время измерения фиксировалась на рабочем столе, а ОАЕ перемещался вбок по оси X.

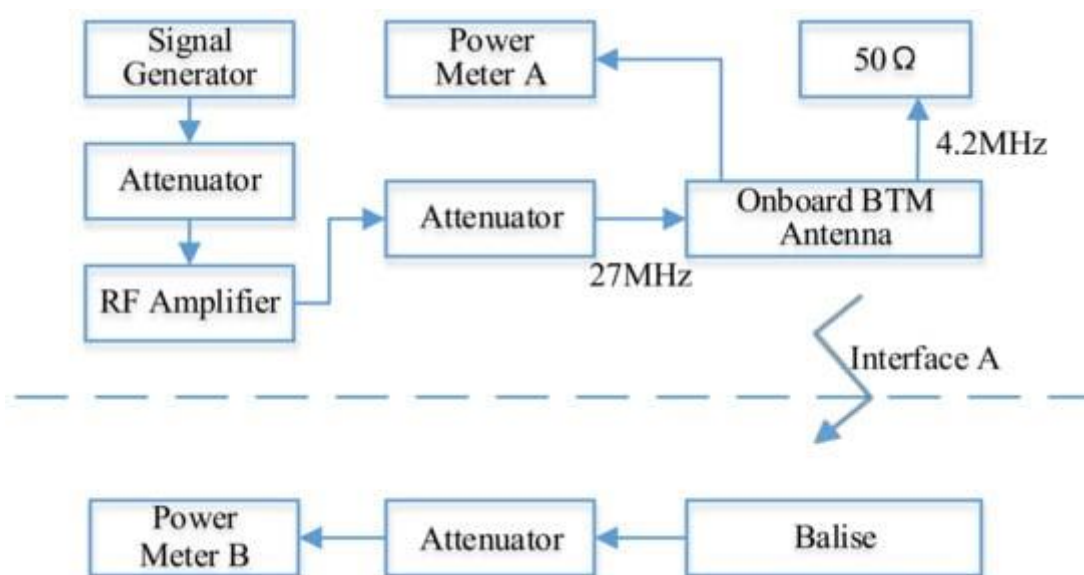


Рис. 11. Конфигурация полевых испытаний на соответствие требованиям дистанционного питания.

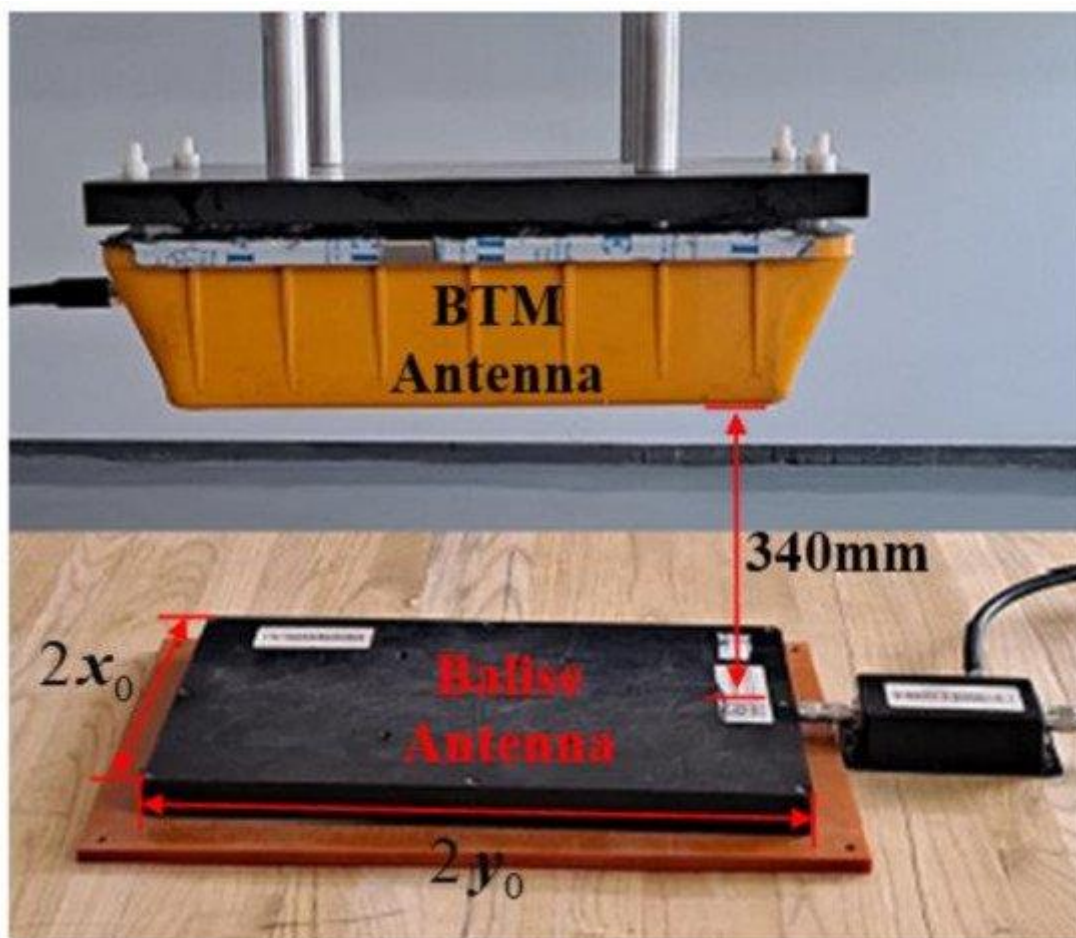


Рис. 12. Конфигурация полевых испытаний на соответствие требованиям дистанционного питания.

Таблица 2. Некоторые типичные параметры ОАЕ и пассивного балансира (часть А).

$2x_0$ (mm)	$2y_0$ (mm)	$2x_1$ (mm)	$2y_1$ (mm)	Δz (mm)	Δy (mm)	i_d (mA)
200	390	300	370	340	0	1000

В спецификации было два основных отличия от схемы измерения соответствия поля дистанционного питания. Во-первых, сигнал дистанционного питания, излучаемый бортовой передающей антенной, оставался постоянным в течение всего процесса измерения. Однако необходимо было измерить и записать реакцию балансира в каждой точке измерения. Во-вторых, из схемы измерительных соединений мы могли обнаружить, что специальная балластная тестовая антенна заменила пассивную балансирующую антенну, что устраняет необходимость в дополнительной тестовой антенне 4,2 МГц. Специально разработанная тестовая антенна с балансиром была основана на пассивном балансире уменьшенного размера с добавлением внешнего интерфейса мониторинга. Фильтр и измеритель мощности были напрямую подключены к конкретной тестовой антенне. Фильтр использовался, чтобы изолировать влияние сигнала дистанционного питания 27 МГц на измеритель мощности В, чтобы отклик балансировки мог быть непосредственно измерен измерителем мощности В.

За исключением двух вышеупомянутых отличий, методы испытаний и процедуры испытаний соответствовали требованиям спецификации. Одновременно с использованием модели передачи по нисходящему каналу, относящейся к (1) и (14), и тем же параметрам антенны из табл. 2, было рассчитано изменение магнитного потока, принимаемого баллисом, при продольном смещении ОАЕ. Результаты измерений и результаты расчетов представлены на рисунке 13.

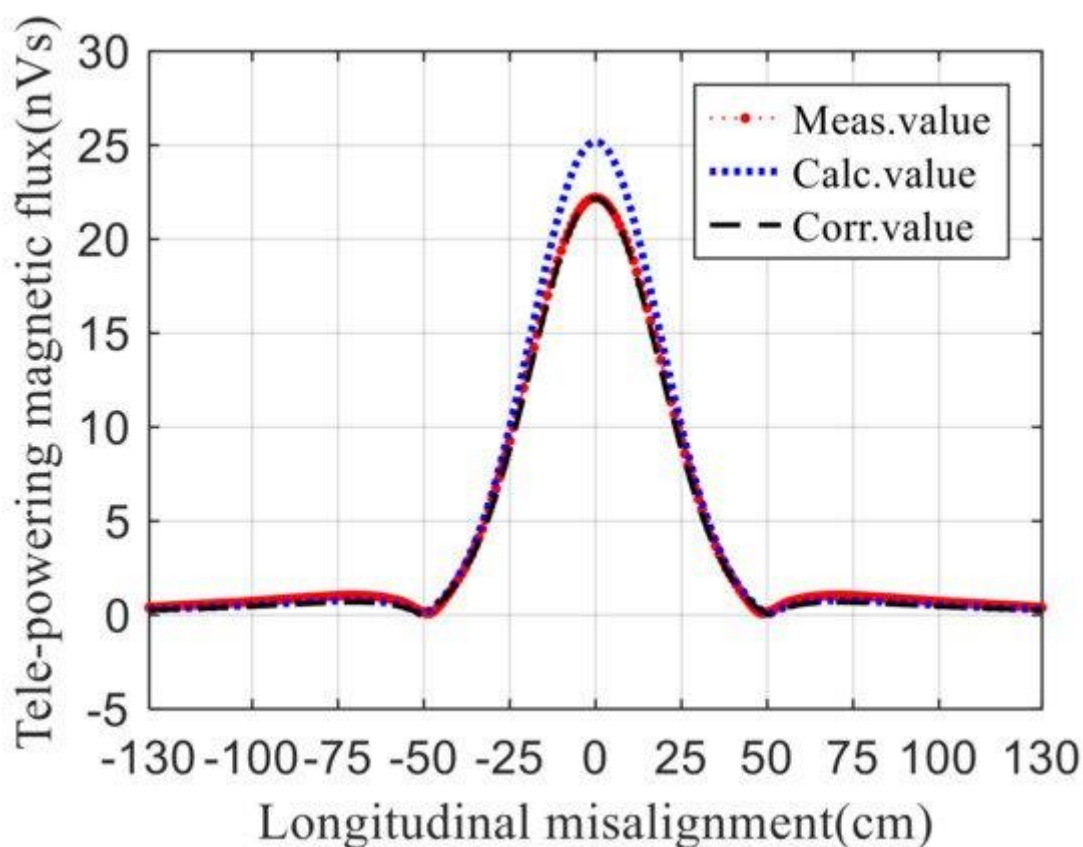


Рис. 13. Результаты валидации полевых испытаний на соответствие дистанционному питанию.

Магнитный поток, принимаемый баллисом, связан с относительным положением баллиса и ОАЕ. При совмещении ОАЕ и баллиса в плоскости XOY баллис получал наибольший магнитный поток.

С увеличением продольного смещения между ОАЕ и балисом принимаемый магнитный поток постепенно уменьшался и достигал минимального значения при абсолютной величине разности продольных перемещений около 50 см. При дальнейшем увеличении продольного смещения между антеннами магнитный поток, принимаемый балисом, сначала медленно увеличивался до максимума бокового лепестка, а затем продолжал уменьшаться с увеличением смещения.

Вышеупомянутое явление определялось характеристиками распределения магнитного поля прямоугольных антенн. Когда магнитный поток, принимаемый баллисом, достигал своего минимального значения, направление интенсивности магнитной индукции в районе баллиса менялось на противоположное за счет увеличения продольного смещения ОАЕ и баллиса. Linhai Zhao смоделировал распределение магнитного поля между баллисом и бортовым прямоугольным антенна [7]. Его результаты моделирования и анализа также показали, что передача информации между прямоугольными антеннами вызовет эффект боковых лепестков.

Огибающие кривые продольного смещения и потока на линии вниз были очень похожи между результатами измерений и результатами расчетов. Однако расчетный результат вблизи продольного смещения $\Delta x=0$ был значительно больше, чем измеренный результат. Расчетное значение было на 3,05 нВ больше, чем измеренное значение при $\Delta x=0$. С увеличением продольного смещения разница постепенно уменьшалась. Это явление было вызвано несоответствием между текущим значением i_d сигнала телепитания, использованным при расчете, и током на бортовой передающей антенне во время измерения. Из-за накопленных погрешностей в процессе измерения сила тока сигнала телепитания на бортовой передающей антенне может не достигать 1000 мА.

Мы скорректировали силу тока i_d в расчетной модели на 880 мА, а все остальные параметры оставили прежними. Скорректированный результат расчета можно было получить, как показано черным пунктиром на рис. 13. Скорректированная кривая результата расчета практически совпала с кривой результата измерения, а разница между скорректированным результатом расчета и результатом измерения составила всего 0,23 нВ при $\Delta x=0$. Это подтвердило предыдущую гипотезу о том, что ошибка была вызвана разницей в токе сигнала телепитания.

Коэффициент корреляции Пирсона, коэффициент ранговой корреляции Спирмена и максимальный коэффициент взаимной информации составили 0,9998, 0,9786 и 0,9999 соответственно для скорректированной кривой и измеренной кривой. Это указывает на то, что модель расчета электромагнитной связи, предложенная в этой статье, может точно предсказать результаты измерения соответствия поля дистанционного питания.

4.2. Проверка соответствия поля восходящего канала

ОАУ и баллиса в этой проверке такие же, как и антенны в таблице 2. Разница в том, что эта проверка предназначена для проверки характеристик передачи сигнала восходящей линии связи.

Некоторые типовые параметры схемы согласования приемной антенны восходящей линии связи, полученные от производителя, приведены в таблице 3. С помощью этих параметров можно рассчитать мощность сигнала порта приемной антенны восходящей линии связи согласно (13).

Таблица 3. Некоторые типичные параметры ОАУ и пассивного балансира (Часть В).

Q_r	A_z	Δz (mm)	Δy (mm)
3	0.5	340	0

Конфигурация проверки соответствия поля восходящей линии связи показана на рисунке 14. Генератор сигналов отправлял сигнал телеграммы с центральной частотой 4,2 МГц на бализу, а аттенуатор использовался для изоляции и защиты генератора сигналов. Мы отрегулировали выходную мощность генератора сигналов и наблюдали за измерителем мощности А, чтобы сила тока восходящего сигнала на передающей антенне балиса достигала 59 мА. Передающая антенна с дистанционным питанием на частоте 27 МГц была согласована по импедансу с нагрузкой 50 Ом. Мы получили мощность сигнала порта приемной антенны восходящего канала с помощью измерителя мощности В.

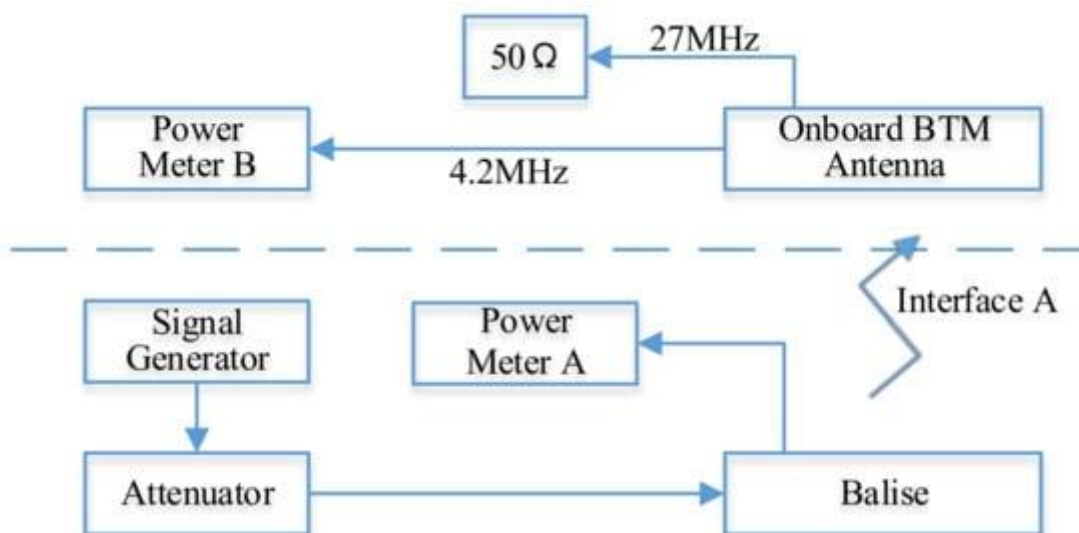


Рисунок 14. Конфигурация проверки соответствия восходящей линии связи.

Сценарий испытаний соответствовал рисунку 12. В процессе измерения текущая интенсивность восходящего сигнала на балочной передающей антенне оставалась неизменной. Необходимо было измерить и записать мощность сигнала порта бортовой приемной антенны в каждой позиции. Остальные этапы измерения соответствовали схеме измерения соответствия поля восходящей линии связи в спецификации теста. Результаты измерений и расчетов показаны на рис. 15. Причина эффекта боковых лепестков на рис. 15 та же, что и на рис. 13, что также связано с характеристиками распределения магнитного поля прямоугольных антенн. По сравнению с рис. 13, на рис. 15 используется логарифмическая система координат, поэтому эффект боковых лепестков проявляется более заметно. Огибающая кривой результата расчета была очень похожа на огибающую кривой результата измерения, а погрешность между результатами измерения и расчета в зоне главного лепестка не превышала 2 дБ.

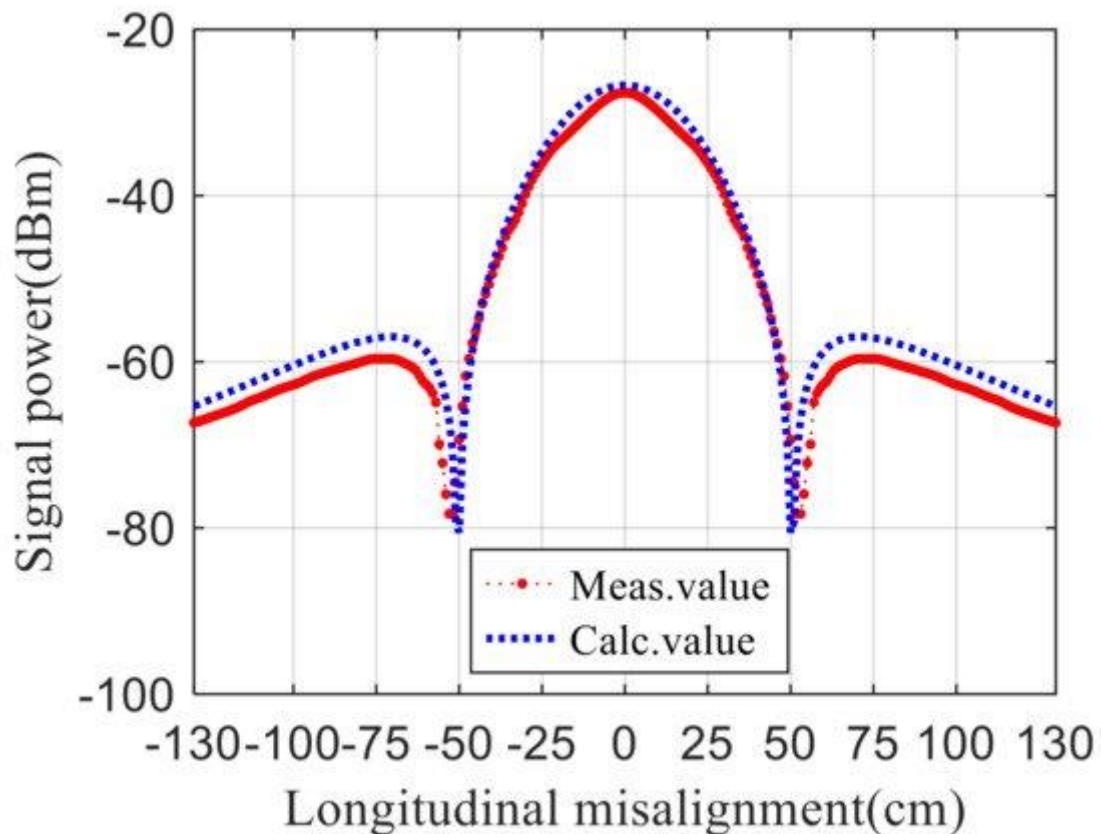


Рисунок 15. Результаты проверки соответствия поля восходящего канала.

Коэффициент корреляции Пирсона, коэффициент ранговой корреляции Спирмена и максимальный коэффициент взаимной информации составляли 0,9943, 0,9971 и 0,9999 соответственно для расчетной кривой и кривой измерения. Это показывает, что предлагаемая модель расчета электромагнитной связи может точно прогнозировать результаты измерения соответствия поля восходящей линии связи.

Тест на соответствие поля дистанционного питания и тест на соответствие поля восходящей линии связи предназначены соответственно для нисходящей и восходящей линий связи BTS. Основываясь на проверке этих двух аспектов, можно полностью подтвердить правильность и точность модели электромагнитной связи BTS, установленной в этой статье.

5. Количественная оценка влияния некоторых типичных параметров на восходящий сигнал Balise

Качественная передача сигнала — основа *ensuri*. нг надежности BTS. BTS включает множество системных параметров. Установка этих параметров и сопоставление различных параметров выполняется для обеспечения того, чтобы лучшая передача информации не была точно описана в соответствующих спецификациях, стандартах и предыдущей литературе, а скорее опиралась на инженерный опыт. В этом разделе представлена количественная оценка влияния некоторых типичных параметров, влияющих на мощность сигнала, подаваемого на бортовую приемную антенну восходящей линии связи.

Некоторые типичные параметры BTS, состоящей из OAU и балансира уменьшенного размера, показаны в таблице 4. x_0 и y_0 — это половина двух сторон антенны балансира уменьшенного размера (включая передающую антенну и приемную антенну) вдоль оси OX и OY. оси соответственно. x_1 и y_1 представляют половину двух сторон OAU (одна и та же антенна используется для передачи по нисходящей линии связи и для приема по восходящей линии связи) вдоль оси OX и оси OY соответственно. Стандарты и спецификации, относящиеся к BTS, не

выдвигают конкретные требования к размеру бортовых антенн. Ему нужно только пройти тест на соответствие поля дистанционного питания и тест на соответствие поля восходящей линии связи в спецификации теста. Допустимый диапазон вертикального расстояния антенны Δz составляет от 220 до 460 мм. Боковое отклонение антенны – это отклонение ОАЕ и балиса по оси OY. Обычно это вызвано статической установкой ОАУ и противовеса, а также рулевым управлением и вибрацией во время динамичной работы поезда. Максимально допустимое отклонение указывается производителем. Для баллистического эмиссионного тока $i_1, i_1 \in [I_{u2}, I_{u3}]$. I_{u2} и I_{u3} – минимальный и максимальный токи на передающей антенне при нормальной работе бализа, а амплитуды равны 59 и 186 мА соответственно.

Таблица 4. Некоторые параметры BTS.

Variable	Value	Variable	Value
x_0	100 mm	Δy	0 mm
y_0	195 mm	i_1	59 mA
x_1	100 mm	i_d	1500 mA
y_1	160 mm	Q_r	3
Δz	340 mm	A_x	0.5

Рассчитав параметры в таблице 4, мы можем обсудить влияние поперечного или продольного режима установки, вертикального расстояния, бокового отклонения, силы тока передачи по восходящей линии активной балки и силы тока сигнала телепитания бортовой передающей антенны на сигнал по восходящей линии системы.

В таблице 5 показано определение типа установки ОАУ и балиса. Боковое означает, что длинная сторона ОАУ или балиса соответствует направлению оси X. Продольный означает, что короткая сторона ОАУ или балиса соответствует направлению оси Y. На рис. 16 показана соответствующая компоновка бализа.

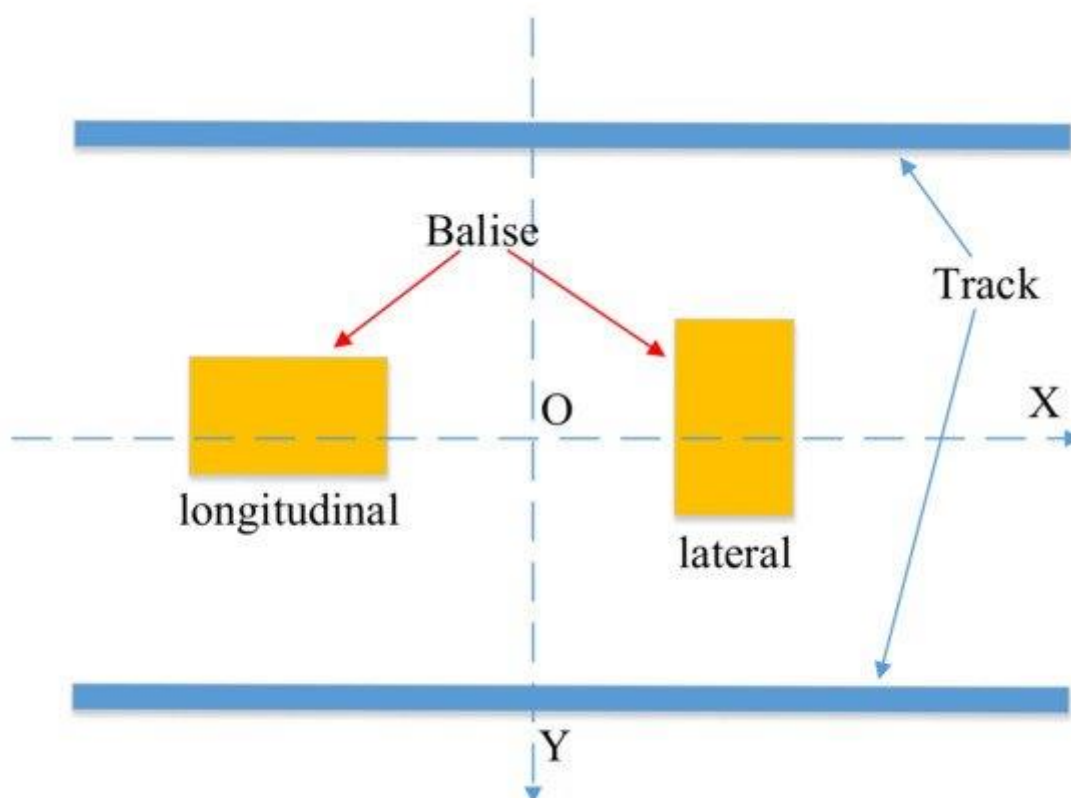


Рисунок 16. Схема продольного и поперечного баланса.

Таблица 5. Определение типа установки.

	OAU	Balise
Installation Type-1	lateral	lateral
Installation Type-2	longitudinal	lateral
Installation Type-3	lateral	longitudinal
Installation Type-4	longitudinal	longitudinal

Для бортовой приемной антенны ток передачи по восходящей линии пассивного баланса рассчитывается по формуле (20). Все параметры в табл. 4 могут быть рассчитаны по (14). На рис. 17, рис. 18, рис. 19, рис. 20, рис. 21 и рис. 22 показано изменение мощности сигнала на приемном терминале бортовой антенны при продольном смещении антенны при различных параметрах БТС.

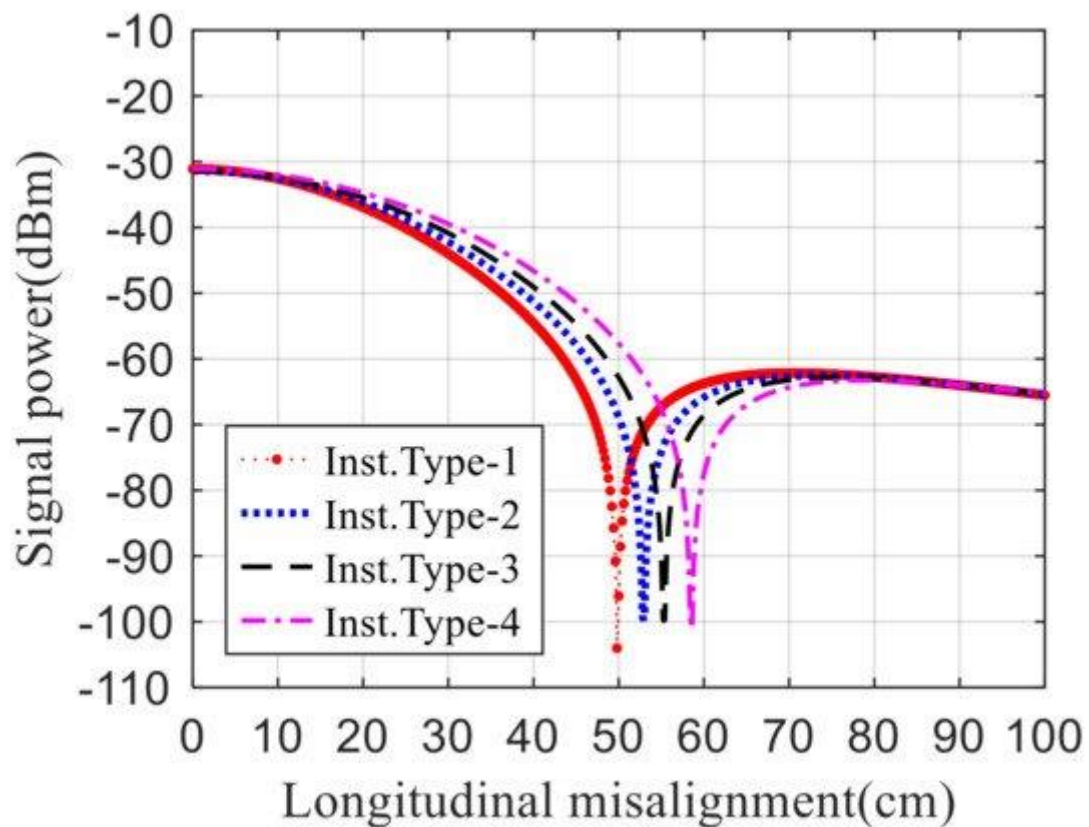


Рисунок 17. Изменение мощности принимаемого сигнала восходящей линии связи при различных режимах установки (активный баланс).

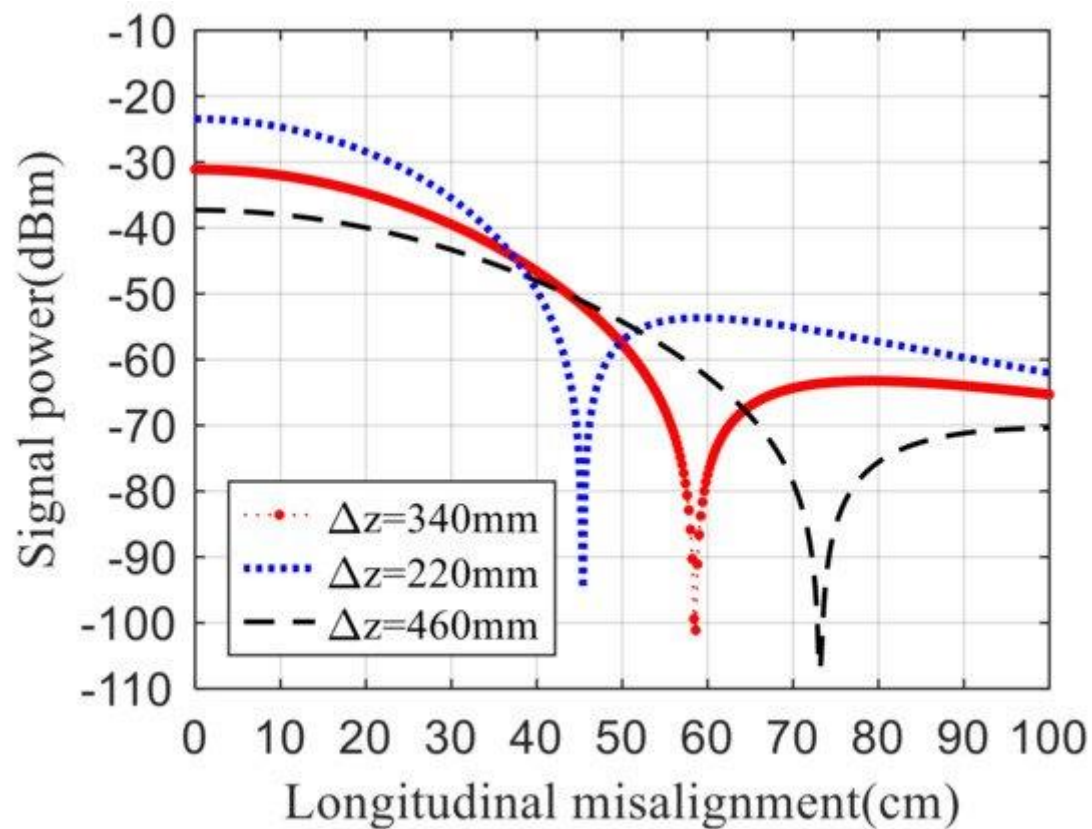


Рисунок 18. Изменение мощности принятого сигнала восходящей линии связи на различных расстояниях по вертикали между OAU и балисом.

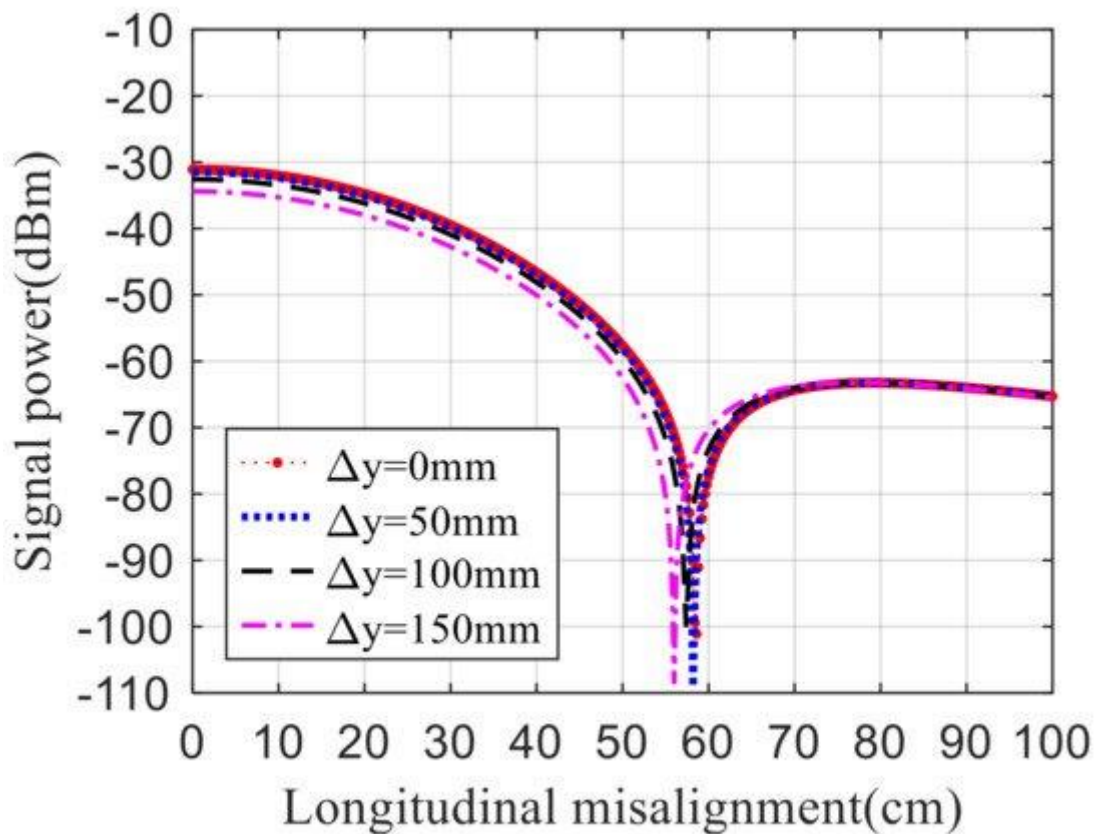


Рисунок 19. Изменение мощности принимаемого сигнала восходящей линии связи при различном боковом отклонении между OAU и балисом.

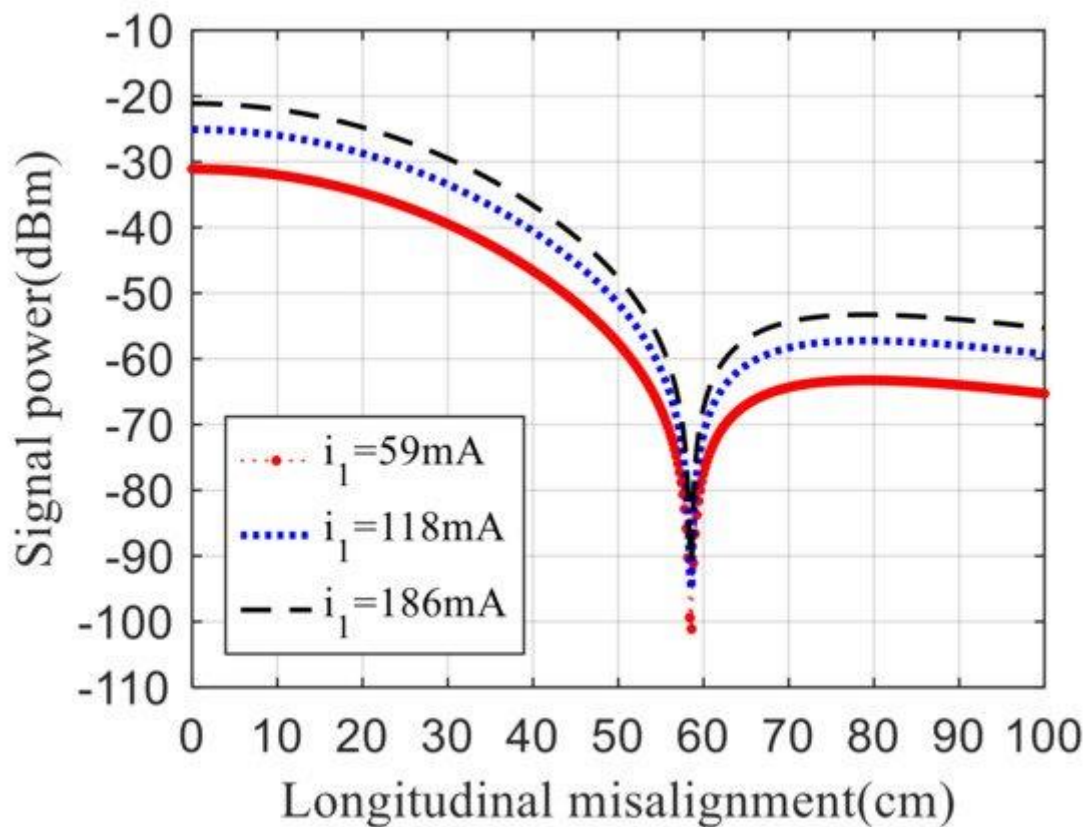


Рисунок 20. Изменение мощности принимаемого сигнала восходящей линии связи при разной силе передаваемого тока восходящей линии связи (активный баланс).

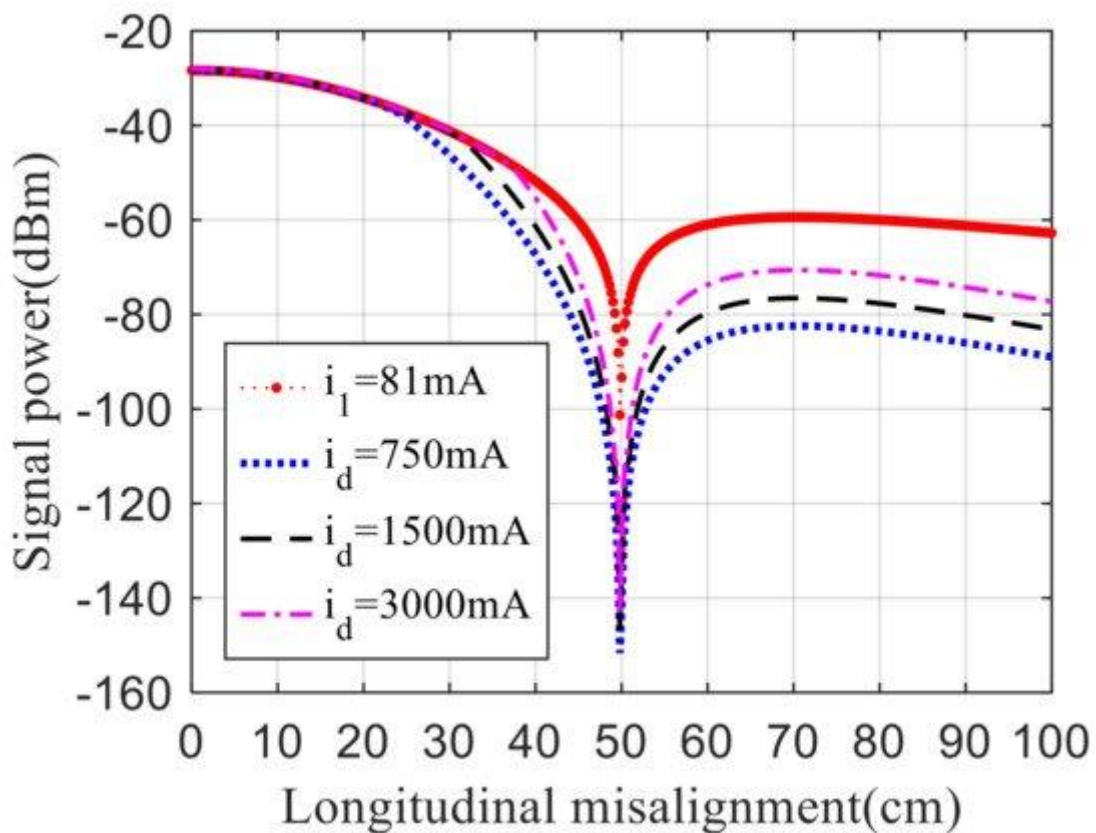


Рисунок 21. Изменение мощности принимаемого сигнала восходящей линии связи при различной силе тока сигнала дистанционного питания (пассивный баланс).

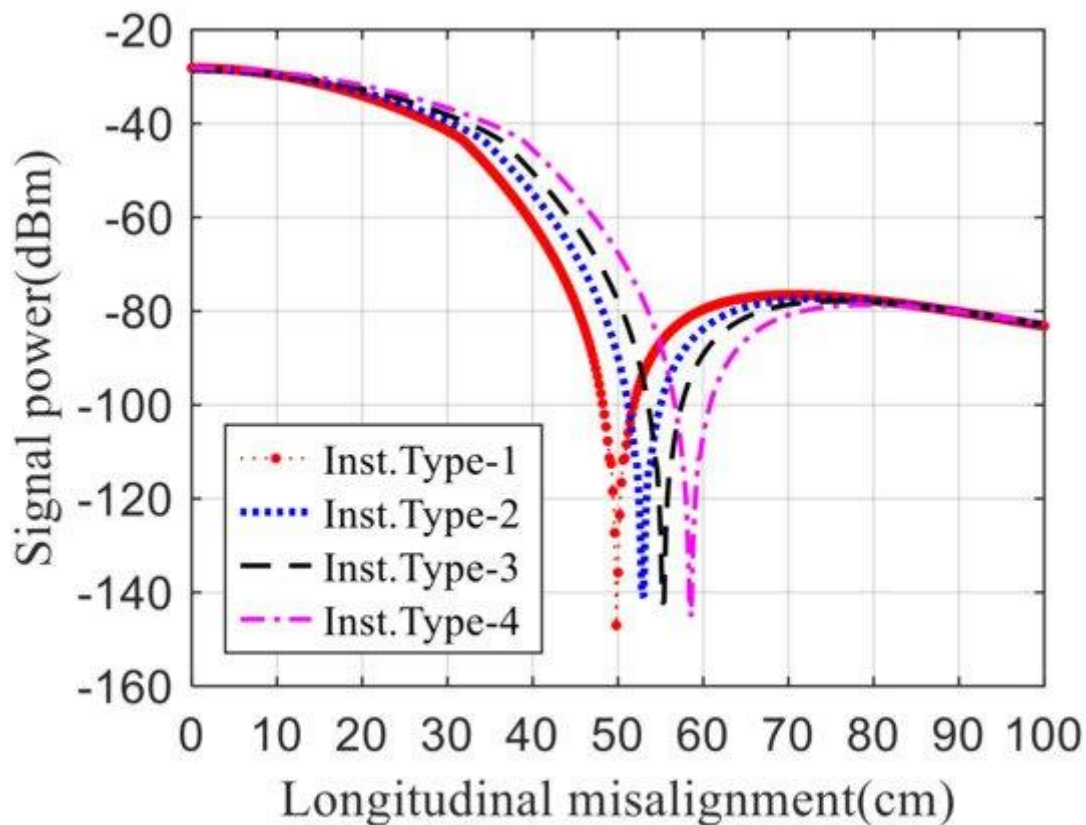


Рисунок 22. Изменение мощности принимаемого сигнала восходящей линии связи при различных режимах установки (пассивный баланс).

Влияние поперечной или продольной установки прямоугольного ОАЕ и балиса на мощность принимаемого сигнала восходящей линии связи показано на рисунке 17. Поскольку мощность сигнала на терминале бортовой приемной антенны симметрична относительно оси ОХ, нам нужно было только построить кривую положительной половины оси ОХ.

Боковая или продольная установка прямоугольного ОАЕ и балиса мало влияла на пиковую мощность основного лепестка и бокового лепестка принимаемого сигнала. Однако нулевое расстояние, очевидно, было связано с установкой этих антенн. При продольной установке ОАУ и балиса нулевое расстояние было на 88 мм больше, чем нулевое расстояние при поперечной установке этих антенн. Поэтому при продольной установке ОАЕ и балиса ширина основного лепестка водоизмещающей кривой была наибольшей. Это означало, что при одинаковом динамическом контактом расстоянии ослабление мощности принимаемого сигнала при продольном смещении антенны было наименьшим в этом режиме установки. Интенсивность и надежность принимаемого сигнала могут быть лучше гарантированы.

Фигур е 18 показано влияние вертикального расстояния между ОАУ и балансиром на мощность принимаемого сигнала восходящей линии связи. Чем меньше расстояние по вертикали между ОАЕ и балисой, тем уже ширина главного лепестка кривой водоизмещение-мощность, но тем больше пиковая мощность главного лепестка и бокового лепестка. В пределах допустимого диапазона функциональной спецификации мощность принимаемого сигнала восходящего канала при минимальном расстоянии по вертикали была на 13,85 дБ выше, чем при максимальном расстоянии по вертикали. Однако нулевое расстояние было на 278 мм меньше. Следовательно, при установке расстояния по вертикали между этими антеннами следует учитывать множество факторов.

Влияние бокового отклонения ОАЕ на мощность сигнала восходящего канала обсуждается на рис. 19. Согласно инженерному опыту, боковое отклонение между ОАЕ и балисом, допускаемое производителем, как правило, не превышало 100 мм. Боковое отклонение антенн не повлияло на форму огибающей кривой водоизмещение-мощность в этих диапазонах. При боковом смещении от 0 до 100 мм мощность сигнала в каждой точке кривой по оси ОХ уменьшалась примерно на 1,5 дБ. При увеличении бокового отклонения до 150 мм мощность сигнала уменьшилась примерно на 3,2 дБ.

Влияние тока передачи активного балансира по восходящей линии связи на мощность принимаемого сигнала по восходящей линии связи обсуждается на рисунке 20. Когда ток передачи на балисе оставался постоянным на протяжении всей передачи сигнала по восходящей линии связи, величина передаваемого тока не изменяла форму огибающей кривой водоизмещение-мощность, но была пропорциональна только мощности кривой в каждой точке вдоль оси ОХ.

На рисунке 21 показано влияние силы тока сигнала дистанционного питания 27 МГц на принимаемый сигнал восходящей линии связи в системе, состоящей из ОАУ и пассивного балансира. i_1 представляет собой кривую смещения-мощности принятого сигнала восходящей линии связи BTS, состоящей из активной балки, а сила тока передачи восходящей линии связи балисы была установлена на силу тока, когда пассивная балка, представленная (20), достигла стабильного рабочего состояния. В соответствии с требованиями к полевым испытаниям на соответствие требованиям дистанционного питания, указанным в спецификации, сила тока сигналов дистанционного питания на частоте 27 МГц находилась в пределах допустимого диапазона. Результаты на рисунке 21 показывают, что эти четыре кривые имеют одинаковое значение пиковой мощности главного лепестка. Однако пиковая мощность боковых лепестков в режиме активной балансировки была наибольшей. Пиковая мощность боковых лепестков в режиме пассивного балансирования уменьшалась с уменьшением силы тока дистанционного питания на частоте 27 МГц.

На рисунке 17 обсуждается влияние режима установки на принимаемый сигнал восходящей линии связи в системе, состоящей из активного баланса и ОАУ. По сравнению с рис. 17, на рис. 22 активный баланс заменен пассивным, а другие параметры такие же, как на рис. 17. При сравнении рис. 17 и рис. мощность принимаемого сигнала, вызванная режимом установки, не очевидна, и огибающая кривой в зоне главного лепестка очень похожа. Однако в условиях пассивного балансирования мощность сигнала в зоне боковых лепестков была значительно снижена, что согласуется с анализом на рисунке 21.

6. Обсуждение и выводы

В этом исследовании была создана модель DT для количественного анализа характеристик электромагнитной связи BTS. Чувствительные факторы характеристик электромагнитной связи были проанализированы с использованием метода диаграммы «рыбий скелет», и по результатам анализа были созданы подходящие модели для трех важных звеньев в процессе электромагнитной связи. Путем объединения этих подмоделей была получена DT-модель процесса электромагнитной связи BTS. Спланированные два эксперимента показали, что предложенная модель имеет достаточную точность и может быть использована для количественного анализа основных чувствительных параметров, участвующих в процессе электромагнитной связи.

Вклад этой статьи был двояким. Во-первых, модель DT, созданная в этой статье, может точно предсказать характеристики электромагнитной связи BTS. Традиционно характеристики электромагнитной связи BTS не ясны до тех пор, пока не будут завершены измерения соответствия поля восходящей линии связи и поля дистанционного питания. В процессе

исследований и разработок бортовой аппаратуры влияние размерной структуры ОАЕ и элементов схемы согласования на результаты испытаний в большей степени зависит от опыта инженеров. Это приводит к высокой цене проб и ошибок. Согласно модели DT, предложенной в этой статье, можно напрямую рассчитать, как выбор некоторых ключевых параметров и согласование этих параметров влияют на характеристики электромагнитной связи BTS, что помогает сократить время и капитальные затраты на разработку нового оборудования. Во-вторых, влияние σ и f некоторые параметры процесса электромагнитной связи были проанализированы количественно. Это не только важная основа для количественного анализа надежности передачи информации BTS, но и помогает производителям и операторам корректировать свои стратегии для получения лучшего качества передачи информации.

Однако вся модель BTS еще не создана. Модель DT, разработанная в этой статье, не может предсказать, может ли быть получен сигнал телеграммы должным образом, когда BTS подвергается воздействию электромагнитных помех. Если мы сможем получить модель цифрового двойника всей БТС, то можно будет решить проблемы электромагнитной восприимчивости и надежности БТС, которые очень важны, но трудно поддаются анализу традиционными методами. Следующей работой авторов является построение такой модели цифрового двойника системного уровня.

Кроме того, исследование в этой статье не учитывало ситуацию, когда поверхность балиса была покрыта посторонними предметами, такими как дождь, снег, град и мусор, что может произойти в некоторых суровых погодных условиях в реальности. Когда возникают эти условия, производительность передачи сигнала восходящей линии связи неизбежно снижается, что не может быть оценено моделью DT, установленной в этой статье. Эти вопросы еще нуждаются в дальнейшем изучении.

Вклад автора

Концептуализация, К.Г., Ю.В. и Д.З.; методология, К.Г., Ю.В. и Д.З.; проверка, JX и YZ; расследование, JX и LZ; написание - первоначальная черновая подготовка, QG; написание - обзор и редактирование, Ю.В. и Д.З. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование

Это исследование частично финансировалось Национальным фондом естественных наук Китая (№ U1734203), частично за счет расходов на фундаментальные исследования Пекинского университета Цзяотун — специальный проект передового научного центра интеллектуальной высокоскоростной железнодорожной системы (№ 2020JBZD004). и частично Enterprise Project (AIRPC/VJIT/20BW1219).

Заявление Институционального контрольного совета

Непригодный.

Заявление об информированном согласии

Непригодный.

Заявление о доступности данных

Непригодный.

Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить рецензентов за их ценные комментарии и предложения относительно этой рукописи. Кроме того, авторы хотели бы поблагодарить Хао Лю, старшего инженера компании Beijing Jiaoda Signal Technology Co., Ltd., за его пронизательные предложения и помощь.

Конфликт интересов

Авторы объявили, что нет никаких конфликтов интересов.

References

1. UNISIG. *SUBSET-036: FFFIS for EuroBalise 3.0.0*; UNISIG: Brussels, Belgium, 2012. [[Google Scholar](#)]
2. UNISIG. *SUBSET-085: Test Specification for EuroBalise FFFIS V3.0.0*; UNISIG: Brussels, Belgium, 2012. [[Google Scholar](#)]
3. *TB/T3485-2017: Technical Specification of Balise Transmission System*; China State Railway Group Co., Ltd.: Beijing, China, 2017.
4. Guo, Y.H.; Zhang, J.B. Analysis of electromagnetic compatibility of EMU onboard BTM equipment. *J. China Railw. Soc.* **2016**, *38*, 75–79. [[Google Scholar](#)]
5. Li, Z.J.; Cai, B.G.; Dai, S.H.; Lu, D.B.; Liu, J. Reliability evaluation of balise transmission system considering train velocity. *J. China Railw. Soc.* **2017**, *39*, 86–93. [[Google Scholar](#)]
6. Zhao, L.H.; Jiang, Y. Odelling and simulation of balise up-link data transmission based on finite element method. *J. Theor. Appl. Inf. Technol.* **2012**, *46*, 867–874. [[Google Scholar](#)]
7. Zhao, L.H.; Jiang, Y. Modeling and optimization research for dynamic transmission process of balise tele-powering signal in high-speed railways. *Prog. Electromagn. Res.* **2013**, *140*, 563–588. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
8. Lee, S.B.; Lyou, J. Analysis of air-gap interface transmission characteristics for improving reliability in ATP system. In Proceedings of the 2020 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC), Barcelona, Spain, 19–22 January 2020; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020; pp. 1–8. [[Google Scholar](#)]
9. Wang, T.; Zhao, L.H. Modeling and optimization for balise coupling process in high speed railway. In Proceedings of the 2017 7th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE), Xi'an, China, 24–27 October 2017; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020; pp. 176–179. [[Google Scholar](#)]
10. Liang, D.; Zhao, H.; Quan, H.; Zhang, Y. Research on electromagnetic coupling mechanism and mounting parameter optimization of balise transmission system. *J. China Railw. Soc.* **2014**, *36*, 64–70. [[Google Scholar](#)]
11. Li, Z.J.; Cai, B.G.; Liu, J.; Lu, D.B.; Zhu, L.F.; Liu, H. Research on performance evaluation method of down-link signal in balise based on equivalent impedance model. *J. China Railw. Soc.* **2020**, *42*, 85–92. [[Google Scholar](#)]
12. Wang, T.; Zhao, L.H. Cause analysis and application of balise system side-lobe based on electromagnetic induction. *J. China Railw. Soc.* **2019**, *41*, 111–117. [[Google Scholar](#)]
13. Grieves, M. *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*; White Paper; NASA: Washington, DC, USA, 2014. [[Google Scholar](#)]
14. Lin, K.; Xu, Y.L.; Lu, X.; Guan, Z.; Li, J. Digital twin-based collapse fragility assessment of a long-span cable-stayed bridge under strong earthquakes. *Autom. Constr.* **2021**, *123*, 103547. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
15. Qu, X.; Song, Y.; Liu, D.; Cui, X.; Peng, Y. Lithium-ion battery performance degradation evaluation in dynamic operating conditions based on a digital twin model. *Microelectron. Reliab.* **2020**, *114*, 113857. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
16. Coraddu, A.; Oneto, L.; Baldi, F.; Cipollini, F.; Atlar, M.; Savio, S. Data-driven ship digital twin for estimating the speed loss caused by the marine fouling. *Ocean. Eng.* **2019**, *186*, 106063. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
17. Fera, M.; Greco, A.; Caterino, M.; Gerbino, S.; Caputo, F.; Macchiaroli, R.; D'Amato, E. Towards digital twin implementation for assessing production line performance and balancing. *Sensors* **2020**, *20*, 97. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
18. Millwater, H.; Ocampo, J.; Crosby, N. Probabilistic methods for risk assessment of airframe digital twin structures. *Eng. Fract. Mech.* **2019**, *221*, 106674. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
19. Kaewunruen, S.; Sresakoolchai, J.; Ma, W.; Phil-Ebosie, O. Digital twin aided vulnerability assessment and risk-based maintenance planning of bridge infrastructures exposed to extreme conditions. *Sustainability* **2021**, *13*, 2051. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

20. Grieves, M.; Vickers, J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*; Springer: Berlin, Germany, 2017; pp. 85–113. [[Google Scholar](#)]
21. Tao, F.; Zhang, M.; Liu, Y.; Nee, A.Y. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. *Cirp Ann.* **2018**, *67*, 169–172. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
22. Zhu, L.F. Antenna Modeling and Optimization Research of Rail Traffic Balise Transmission System. Ph.D. Dissertation, Department of Electronic Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, 2018. [[Google Scholar](#)]
23. Wu, D.H.; Huang, C.; Yang, F.; Sun, Q.S. Analytical calculations of self-and mutual inductances for rectangular coils with lateral misalignment in IPT. *IET Power Electron.* **2019**, *12*, 4054–4062. [[Google Scholar](#)]
24. Jin, Z.Y. The Design, Optimization and Implementation of RFID Antenna in Train Control System. Master's Thesis, Department of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, China, 2017. [[Google Scholar](#)]
25. Fujita, A.; Sato, J.R.; Demasi, M.A.; Sogayar, M.C.; Ferreira, C.E.; Miyano, S. Comparing Pearson, Spearman and Hoeffding's D measure for gene expression association analysis. *J. Bioinform. Comput. Biol.* **2009**, *7*, 663–684. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. Reshef, D.N.; Reshef, Y.A.; Finucane, H.K.; Grossman, S.R.; McVean, G.; Turnbaugh, P.J.; Lander, E.S.; Mitzenmacher, M.; Sabeti, P.C. Sabeti. Detecting novel associations in large data sets. *Science* **2011**, *334*, 1518–1524. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]