

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.173

Интеллектуальные метаповерхности, Фурье-оптика и криптография: новые научные горизонты

Потапов А.А.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>
Москва 125009, Российская Федерация

Джинанский университет, Совместная китайско-российская лаборатория информационных технологий и фрактальной обработки сигналов, <https://jnu.edu.cn/>
Гуанчжоу 510632, Китай

E-mail: potapov@cplire.ru

Поступила 29.09.2023, рецензирована 02.10.2023, принята 09.10.2023, опубликована 25.04.2024

Аннотация: Рассматривается современное состояние программируемых и интеллектуальных метаповерхностей (МП) и возникающие их применения в передовых интегрированных устройствах. Например, интеллектуальная МП может адаптировать каналы распространения радиоволн и усиливать их различия. Рассмотрены основные стратегии проектирования интеллектуальных МП. Раскрывается необходимость совмещения таких интеллектуальных МП с многочисленными методами топологической текстурно-фрактальной обработки сигналов и полей.

Ключевые слова: фотоника; радиофотоника; метаоптика; искусственный интеллект; радиофизика; наноструктуры; информационная метаповерхность; интеллектуальная метаповерхность; обработка многомерных сигналов; фрактал; оптические аналоговые вычисления

УДК 519.24+ 537.86+621.396.96

Благодарности: Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИРЭ РАН, тема "Эфир-2". Автор выражает искреннюю благодарность китайским ученым, с которыми были совместно выполнены и опубликованы статьи по фотонике в ведущих международных научных журналах за период 2019–2023 гг.: Weiping Liu, Tianhua Feng, Lei Wan, Danping Pan, Min Ouyang, Zixian Liang, Zhaohui Li, Shuaifeng Yang, Xia Wu, Yi Xu, Ning Lai, Weilian Chen, Fugen Wang, Jin Yuan, Xin Zhang, Wei Zhang, а также всем тем ученым из Китая, которые оперативно присылают автору через ResearchGate свои недавно выпущенные оригинальные работы.

Для цитирования: Потапов А.А. Интеллектуальные метаповерхности, Фурье-оптика и криптография: новые научные горизонты. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):173-206. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.173.

Intelligent Metasurfaces, Fourier Optics and Cryptography: New Scientific Horizons

Alexander A. Potapov

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>
Moscow 125009, Russian Federation

Jinan University, JNU-IREE RAS Joint Laboratory of Information Technology and Fractal Processing of Signals, <https://jnu.edu.cn/>
Guangzhou 510632, China

E-mail: potapov@cplire.ru

Received September 29, 2023, peer-reviewed October 02, 2023, accepted October 09, 2023, published April 25, 2024

Abstract: Reviews the current state of programmable and intelligent metasurfaces (MS) and their emerging applications in advanced integrated devices. For example, intelligent MS can adapt radio wave propagation channels and enhance their differences. The main strategies for designing

intelligent MSs are considered. The necessity of combining such intelligent MSs with numerous methods of topological texture-fractal processing of signals and fields is revealed.

Keywords: photonics; radio photonics; nanotechnology; radiophysics; radar; radio engineering; texture; fractals; processing of multidimensional signals; frontier optics; computing metasurface; optical transfer function; optical analog computing

UDC 519.24+ 537.86+621.396.96

Acknowledgments: The research has been performed in the framework of the state task for IRE RAS, theme "Aether-2". The author expresses sincere gratitude to the Chinese scientists with whom articles on photonics were jointly completed and published in leading international scientific journals for the period 2019–2023: Weiping Liu, Tianhua Feng, Lei Wan, Danping Pan, Min Ouyang, Zixian Liang, Zhaohui Li, Shuaifeng Yang, Xia Wu, Yi Xu, Ning Lai, Weilian Chen, Fugen Wang, Jin Yuan, Xin Zhang, Wei Zhang, as well as all those scientists from China who promptly send to author their recently published original works.

For citation: Alexander A Potapov. Intelligent Metasurfaces, Fourier Optics and Cryptography: New Scientific Horizons. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):173-206e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.173.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (175)
2. ОПТИЧЕСКИЕ АНАЛОГОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ (175)
3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ (176)
 - 3.1. СВОЙСТВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ (176)
 - 3.2. АРХИТЕКТУРА БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ МП (177)
 - 3.3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПОЧТИ БЕЗ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ (178)
 - 3.4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ (178)
 - 3.5. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ИНТЕГРИРОВАННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ (179)
4. МЕТАПОВЕРХНОСТИ, ЦИФРОВОЕ КОДИРОВАНИЕ И КРИПТОГРАФИЯ (179)
5. БЕСПРОВОДНАЯ "МЫСЛЕННАЯ СВЯЗЬ" ЧЕРЕЗ ПЛАТФОРМУ МОЗГ-КОМПЬЮТЕР-МП (181)
 - 5.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПЛАТФОРМА МОЗГ-КОМПЬЮТЕР-МП ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНТЕЗОМ ИНФОРМАЦИИ И ЕЕ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ (182)
 - 5.2. БЕСПРОВОДНАЯ "МЫСЛЕННАЯ СВЯЗЬ" МЕЖДУ ДВУМЯ ОПЕРАТОРАМИ (183)
 - 5.3. РЕАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ (185)
 - 5.4. СИНТЕЗ ВОЛНОВОГО ФРОНТА С ПОМОЩЬЮ ЕВСМ (186)
 - 5.5. К НОВЫМ ПОКОЛЕНИЯМ БИОИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТАПОВЕРХНОСТНЫХ СИСТЕМ (188)
6. ПРОГРАММИРУЕМАЯ МП ДЛЯ ШИФРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ (188)
 - 6.1. НЕБОЛЬШОЕ ПРЕДИСЛОВИЕ (188)
 - 6.2. СХЕМА ШИФРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДУЛИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МП (188)
 - 6.3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ (189)
 - 6.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ (191)
 - 6.5. МЕТАКЛЮЧ НА ОСНОВЕ МП РоМ (193)
 - 6.6. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ С РоМ-ШИФРОВАНИЕМ (194)
 - 6.7. ОСОБЕННОСТИ ДЕКОДИРОВАНИЯ (195)
7. ОПТИЧЕСКОЕ ШИФРОВАНИЕ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЧАСТОТАХ С ПОМОЩЬЮ МП (197)
 - 7.1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ (197)
 - 7.2. РАБОЧИЕ ПРИНЦИПЫ (198)
 - 7.3. ШИФРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СИГНАЛА В ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ (199)
 - 7.4. ФАЗОВОЕ ШИФРОВАНИЕ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЧАСТОТЕ (201)
 - 7.5. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ЧАСТОТНОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕМКОСТИ ШИФРОВАНИЯ (202)
 - 7.6. ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ШИФРОВАНИЯ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЧАСТОТАХ (203)
8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (204)
- ЛИТЕРАТУРА (204)

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы появились многообещающие приложения искусственного интеллекта (ИИ) во многих дисциплинах, включая оптику, инженерию, медицину, экономику и т.д. В частности, синергия ИИ и метаоптики приносит большую пользу обеим областям. Метаоптика – это усовершенствованная плоская оптика с новыми функциями и способностями управления светом [1]. Метаматериалы позволяют точно адаптировать взаимодействия света и материи в субволновом масштабе, обеспечивая доступ ко всему спектру электромагнитных реакций, закодированных в уравнениях Максвелла и работающих в огромной полосе электромагнитного спектра. Метаповерхности (МП) представляют собой плоские оптические субволновые устройства, которые могут манипулировать светом (электромагнитными волнами). МП состоит из специально расположенного массива метаатомов. Искусственные метаатомы спроектированы и рассчитаны для управления фазой, амплитудой и поляризацией падающих электромагнитных волн. Новый волновой фронт может быть реконструирован МП. Многочисленные функции мета-устройств могут быть реализованы с помощью нескольких этапов, таких как выбор материала, проектирование метаатомов, проектирование фазового распределения, конфигурация макета, изготовление, характеристика и демонстрация приложений. Эти шаги были подробно представлены в предыдущих обзорах [2-8].

На **Рис. 1** показана тенденция развития ИИ (красный цвет) и метаоптики (синий цвет) [1]. По совпадению, обе области начали быстро расти примерно в 2012 году. Развернутое пояснение основных этапов развития ИИ и метаоптики на **Рис. 1** приведено в [1]. Главным образом, в обзоре [1] классифицируются и обсуждаются последние разработки, интегрированные двумя темами, а именно ИИ для метаоптики и метаоптика для ИИ. Первая описывает, как применять ИИ к исследованиям метаоптики для проектирования, моделирования, оптического анализа информации и применения. Вторая сообщает о развитии оптических систем и вычислениях с помощью метаоптики.

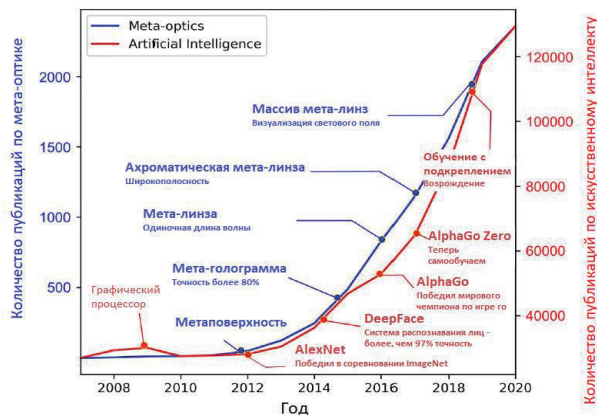


Рис. 1. Тенденции развития ИИ и метаоптики (количество публикаций в год собрано из поиска в Web of Science [1]).

Данная работа является непосредственным продолжением предыдущего авторского обзора по физике и дизайну основных вычислительных диэлектрических МП и их применениям [9], в которой учтены исследования с китайскими учеными в совместной лаборатории информационных технологий и фрактальной обработки сигналов в Китае за период 2022-2023 гг. [10-17].

2. ОПТИЧЕСКИЕ АНАЛОГОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МП

Перед лицом все более сложных информационных технологий вопрос о том, как улучшить производительность обработки, скорость работы и эффективные вычислительные возможности, становится важной проблемой в информационной и инженерной сфере. По сравнению с традиционными аналоговыми вычислениями оптическая аналоговая операция реализуется посредством модуляции света. Таким образом, этот процесс является параллельным и пассивным, а его преимуществами являются низкое энергопотребление и высокая скорость работы. Историческое обозрение оптических аналоговых вычислений приведено в обзоре [18] и показано на **Рис. 2**, а их физика – на круговой диаграмме (**Рис. 3**, с дополнениями).

Как наиболее интуитивно понятный метод восприятия объектов, обнаружение краев изображения является неотъемлемой частью распознавания изображений, ИИ и машинного обучения [10-18]. Обнаружение



Рис. 2. Развитие оптических аналоговых вычислений [18].

краев изображения можно просто рассматривать как процесс фильтрации высоких частот, усиливающий полезную высоко пространственную информацию о пространственных частотах и подавляющий нерелевантную низко пространственную информацию о пространственных частотах. Оптические аналоговые вычисления привлекли большое внимание в последнее время. Кроме того, оптические аналоговые вычисления также продемонстрировали уникальный потенциал в работе свертки и решении сложных математических уравнений. Высокая интеграция, высокая скорость отклика и точное управление оптическими аналоговыми операциями делают их перспективным инструментом для реализации конкретных задач обработки многомерных сигналов.

Функция МП состоит в том, чтобы манипулировать волновым фронтом падающего света путем адаптации фазового профиля заданной рабочей длины волны. Метод

достижения полной 2π фазовой модуляции является ключом к обеспечению полного управления волновым фронтом. Диэлектрические метаатомы поддерживают различные локальные резонансы сильного электрического и магнитного рассеяния, которые описываются с помощью теории Ми. Когда частота падающего света ниже или вблизи частоты запрещенной зоны диэлектрического материала, электрический диполь и магнитный дипольные резонансы возбуждаются. Диэлектрический резонатор Ми включает различные электрические и магнитные компоненты, которые позволяют создавать электромагнитные волны [1].

Когда определенные резонансы возбуждаются в МП электромагнитными волнами, могут наблюдаться резкие фазовые изменения. Эти резонансы можно разделить на электрический резонанс и магнитный резонанс в зависимости от дипольного момента соответствующей структуры. Простейший класс МП состоит из субволновых периодических массивов диэлектрических или металлических включений, обладающих чисто электрическим дипольным откликом, тогда как МП Гюйгенса включают электрический отклик и магнитный отклик [10,12,15,18]. Поверхность Гюйгенса – МП, используемая для достижения определенного волнового фронта с использованием принципа Гюйгенса. Общий отклик МП регулируется принципом Гюйгенса, где каждая точка на волновом фронте является источником вторичных волн. Модуляция электрических и магнитных диполей на МП Гюйгенса может контролировать рассеянное поле. В частности, в [19] демонстрируется путь к формированию высококачественного факторного волнового фронта в двух пространственных измерениях на основе полностью диэлектрических МП Гюйгенса с использованием резонансов Ми более высокого порядка в ближнем ИК диапазоне.

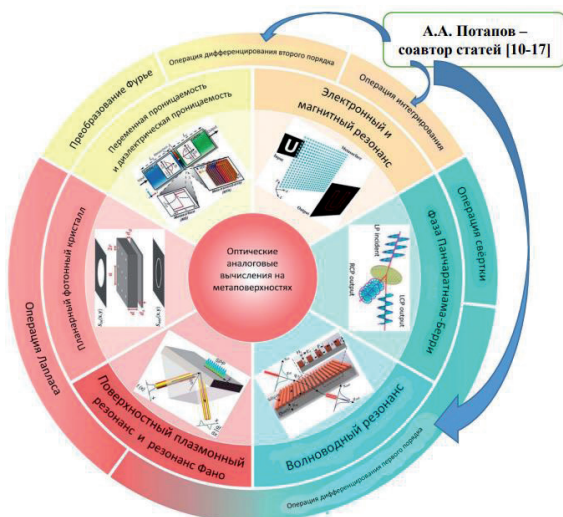


Рис. 3. Различные физические основы оптических аналоговых операций [18] (адаптировано).

3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ

3.1. Свойства интеллектуальных метаповерхностей

Одновременное управление электромагнитными волнами и информацией с помощью

информационных МП имеет центральное значение в современном мире. Метаматериалы эволюционировали от инженерных структур до интеллектуальных волновых агентов, добились огромных успехов в управлении взаимодействием волны, информации и материи, чего нельзя было достичь с природными материалами [20]. В последнее время обычные структурные или пассивные МП сделали значимый шаг вперед к интеллектуальным МП за счет интеграции с алгоритмами и нелинейными материалами или активными устройствами [1,6,20-23]. Метаатом интеллектуальной МП интегрирован с перестраиваемыми функциональными материалами или активными устройствами и предназначен для перепрограммирования *in-situ* под управлением соответствующих алгоритмов.

В отличие от обычных МП, интеллектуальная МП обладает тремя важными свойствами: цифровизацией, программируемостью и интеллектом, предоставляя нам возможность контролировать взаимодействие волны, информации и материи без вмешательства человека. Здесь цифровизация позволяет интеллектуальной МП кодировать/декодировать и хранить цифровую информацию на физическом уровне. Программируемость означает, что интеллектуальная МП способна реализовывать различные функции с одной физической сущностью, и переключение между которыми путем изменения последовательностей управляющего кода. В то время как интеллект указывает на то, что интеллектуальная МП имеет локальные или облачные алгоритмы в качестве своего мозга и способна принимать решения, самопрограммироваться и выполнять ряд последовательных задач без контроля человека [20]. Поэтому реконфигурируемые и перепрограммируемые МП можно отнести к стадии младенчества разумной МП, поскольку они строго не являются разумными согласно приведенному выше определению.

Одним словом, интеллектуальные МП могут предоставить нам интеллектуальные платформы для манипулирования волново-информационными взаимодействиями материи, которые обладают многообещающими потенциалами в установлении прямой связи между физическим миром и цифровым миром и

служат естественной ролью слияния физической сущности с ее цифровым двойником. Интеллект является ядром интеллектуальных МП, и алгоритмы (особенно методы глубокого обучения) могут хорошо взять на себя эту роль.

Исторически сложилось так, что в ходе эволюции интеллектуальных МП произошло два важных события: активные МП и программируемые МП кодирования. В отличие от пассивных (т.е. только структурных) МП, активные МП представляют собой гибридные структуры, встроенные перестраиваемые функциональные материалы (например, халькогенидное соединение $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$) и активные элементы (PIN-диоды, варакторы и MEMS-переключатели), позволяющие нам динамически управлять взаимодействием волна-информация-материя за счет энергопотребления. В программируемых МП каждый строящийся метаатом имеет конечное число квантованных физических состояний и может быть использован для кодирования цифровой информации на физическом уровне, соединяя цифровой мир и физический мир. Интеллектуальная МП состоит из управляемых метаатомов, и каждый метаатом имеет ряд квантованных физических состояний.

Большинство современных вариантов проектирования интеллектуальной МП, способов преобразования падающего на МП пучка освещения в пучок с желаемым волновым фронтом и/или формой волны, беспроводная передача энергии и сбор энергии в обществе Интернета вещей (IoT) и методов формирования динамических голограмм с помощью интеллектуальных МП приведено в [20,23].

3.2. АРХИТЕКТУРА БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ МП

Беспроводная связь стала важным инструментом решения постоянно растущих потребностей в беспроводной передаче информации в современном обществе. Основные архитектуры беспроводной связи с помощью интеллектуальной МП (или реконфигурируемая интеллектуальная поверхность) были предложены недавно, и их в [20] классифицируют на три основных типа: (А) немодулированные метаповерхностные обратные рассеянные коммуникации (NMMBC), (В) модулированные метаповерхностные обратные рассеяния

(ММСС) и (С) окружающие модулированные метаповерхностные коммуникации обратного рассеяния (АММВС)

3.3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПОЧТИ БЕЗ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Интеллектуальное зондирование почти без цифровых вычислений представлено в [20]. В настоящее время для большинства практических сенсорных систем наиболее важной, но сложной проблемой является работа с многомерными данными или «кризисом данных». К счастью, многомерные данные имеют некоторые структурированные представления во многих практических сценариях. Известная лемма Джонсона-Линденштрауса (Johnson–Lindenstrauss) утверждает, что структурированные высокоразмерные данные могут быть спроецированы в низкоразмерное пространство признаков с почти пренебрежительной потерей информации через правильно спроектированное линейное преобразование [24]. Другими словами, существенная информация о многомерных данных может быть получена из их удивительно сокращенных измерений в большинстве практических условий. К настоящему времени существует множество популярных линейных преобразований встраивания с так называемым свойством ограниченной изометрии. Среди них некоторые встраиваемые преобразования, например, принципиальный компонентный анализ (ПКА), позволяют создавать низкоразмерные представления с математически или физически значимыми признаками, подразумевая, что целевая информация может быть хорошо извлечена из этих низкоразмерных признаков почти без цифровых вычислений.

В [25] рассмотрено использование методов линейного встраивания в интеллектуальные метаповерхностные датчики. Интеллектуальная МП способна генерировать почти произвольно диаграммы излучения или режимы измерения методами машинного обучения. Была предложена концепция перепрограммируемого тепловизора машинного обучения [25], в котором интеллектуальная МП обучается с помощью огромного количества обучающих данных с использованием ПКА, так что желаемые машинным обучением диаграммы излучения могут быть достигнуты на физическом уровне.

Затем интеллектуальная МП служит физическим вычислительным устройством, которое выводит низкоразмерные функции ПКА из входных данных высокоразмерных необработанных данных аналоговым вычислительным способом. Таким образом, результирующая стратегия зондирования почти свободна от цифровых вычислений. Интеллектуальная МП предназначена для работы на частоте около 3 ГГц. Можно заключить, что стратегия зондирования с помощью машинного обучения позволяет получать высококачественные изображения в режиме реального времени с почти игнорируемыми цифровыми вычислениями, и такая стратегия зондирования предоставит нам многообещающий маршрут для интеллектуального зондирования на различных частотах и за их пределами.

3.4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

В последнее время использование беспроводных сигналов в области зондирования, особенно зондирования человеческого поведения, приобрело у исследователей интенсивную привлекательность, но эти стратегии страдают от ограниченного пространственно-временного разрешения изображения и точности распознавания из-за ограниченного размера области обзора. В отличие от этих методов, здесь следует выделить трехаспектные критические роли интеллектуальной МП [20]. Во-первых, интеллектуальная МП используется для зондирования людей в режиме реального времени в сцене полного просмотра с высоким временно-пространственным разрешением. Во-вторых, интеллектуальная МП управляет электромагнитными волновыми полями (например, окружающими беспроводными сигналами) в направлении локальных точек, представляющих интерес, для эффективного распознавания мелкозернистых признаков тела, с помощью которых нежелательные помехи от окружающей среды и других частей тела могут быть значительно подавлены. Наконец, признаки тела (например, тонкий язык жестов) и физиологическое состояние нескольких не контактирующих друг с другом людей, могут быть четко идентифицированы в режиме реального времени.

3.5. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ИНТЕГРИРОВАННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Чтобы в полной мере воспользоваться преимуществами интеллекта во всей цепочке зондирования, три составляющих компонента интеллектуального зондирования – сцена в физическом мире, данные в цифровом мире и мера, соединяющая два мира – должны быть совместно рассмотрены в уникальном обучаемом конвейере [20].

Интеллектуальная МП, развернутая в физических средах, имеет очень сильную электромагнитную связь с окружающей средой и целями. Однако к настоящему времени окружающая среда в значительной степени рассматривается как свободное пространство, например, в области беспроводной связи, что, очевидно, нереально и оказывает значительное негативное влияние на производительность сбора и обработки информации. Поэтому требуется моделировать реалистичное взаимодействие между интеллектуальными МП и окружающей средой. Интеллектуальная МП может адаптировать каналы распространения и усиливать их различия.

4. МЕТАПОВЕРХНОСТИ, ЦИФРОВОЕ КОДИРОВАНИЕ И КРИПТОГРАФИЯ

Информационная безопасность является важной темой, она всегда занимает значительное место в повседневной жизни современного общества и тем самым порождает различные современные методы шифрования. Сообщалось о нескольких интересных работах по голографическому шифрованию, основанных на технологии МП [26-28], которые продемонстрировали большую потенциальную ценность в системах оптического шифрования. Модулируя как спектральные, так и поляризационные реакции, метаповерхностная голография была успешно применена для сокрытия различной информации в разных цветах и поляризационных каналах.

Оптическое шифрование использует обильные степени свободы света (например, амплитуду, фазу, поляризацию, длину волны, орбитальный угловой момент и динамическое управление, а также, их комбинации) для кодирования и декодирования целевой

информации, что открывает новые возможности для передачи и хранения информации. В недавно опубликованной статье [29] предлагается цифровая программируемая МП с элементарно-независимым зондированием видимого света; МП может быть адаптивно перепрограммирована для достижения различных электромагнитных функций путем восприятия цветовых изменений падающего света. Данная МП интегрирована с трехцветными датчиками цвета (TCS3200), микроконтроллерами и алгоритмом кодирования предварительной загрузки. Благодаря установлению обратной связи с программируемым вентиляемым массивом (FPGA) МП формирует полную интеллектуальную систему адаптивного и реконфигурируемого кодирования. МП состоит из 16×16 метаклеток, с четырьмя метаатомами в группе, каждая группа интегрирует трихроматический датчик и микросхему.

Алгоритм связывает процесс светочувствительных МП от обнаружения к сенсорным данным, сравнения данных и, наконец, формирования различных моделей распределения напряжения на МП. В частности, когда информация о частоте света воспринимается трихроматическими датчиками и выводится на высокоскоростной АЦП, тот определяет, превышен ли порог, а затем FPGA определяет пороговое решение и управляет PIN-диодом на МП для выполнения кодирования цветов, соответствующих текущему пороговому значению. Например, когда FPGA определяет, что падающий свет красный, МП выполняет кодирование двойного луча; когда падающий свет горит зеленым, МП выполняет кодирование четырехлучевой схемы; и когда падающий свет синий, МП выполняет кодирование режима рассеяния волн (radar cross-section – RCS).

В [29] дано описание созданной метаповерхностной архитектуры для модуляции электромагнитного поля – **Рис. 4.** Метаячейка имеет три слоя. Первый слой представляет собой металлическую пластину (patch) толщиной 0.1 мм, средний слой представляет собой слой FR-4 с $\epsilon = 4.3$ и $\text{tg}\delta = 0.025$, а нижний слой представляет собой металлический экран. Для достижения динамической настройки устройства установлен PIN-диод (Skyworks SMP1320) между двумя

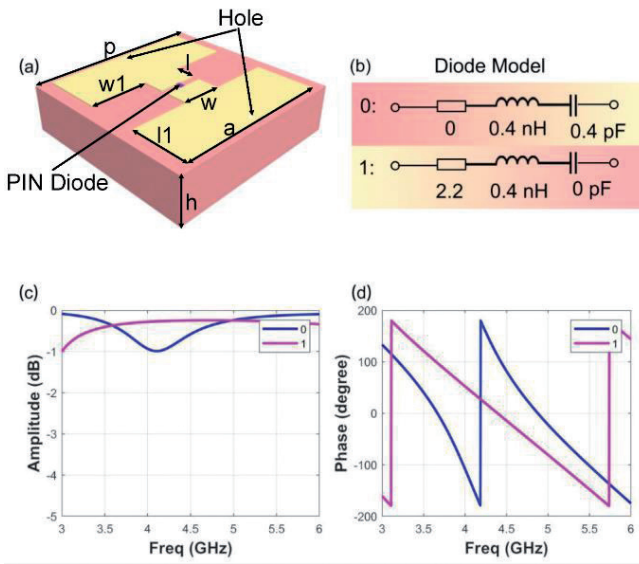


Рис. 4. Описание структуры и ЭМ-отклика метаатома [29]: а) Трёхмерный вид суперячейки. б) Эквивалентная схема PIN-диода в состоянии OFF/ON, в) амплитудная реакция элемента, д) фазовая реакция элемента.

симметричными металлическими патчами в первом слое. Кроме того, для подключения цепи управления на блоке есть два сквозных отверстия диаметром 0.15 мм. В процессе имитационной верификации с использованием системы моделирования СВЧ трехмерных структур CST Microwave Studio была установлена модель блока метаматериала (показанная на Рис. 4а) с периодом $p = 14$ мм, толщиной среды $h = 3.5$ мм. Другие параметры: $a = 12$ мм, $w = 3$ мм, $w_1 = 4.5$ мм, $l_1 = 1.7$ мм и $l_2 = 4.5$ мм.

Эквивалентные схемы PIN-диода на основе модели R-L-C показаны на Рис. 4б. Код "0" указывает, что PIN-диод находится в состоянии "ВЫКЛ", при этом $R_1 = 0$, $L_1 = 0.4$ нГн и $C_1 = 0.4$ пФ. Код "1" указывает, что PIN-диод находится в состоянии "ВКЛ", где $R_2 = 2.2$, $L_2 = 0.4$ нГн и $C_2 = 0$ пФ. Амплитудные и фазовые кривые элемента метаматериала при y -поляризации показаны на Рис. 4с,д ($n = 0$ и 1). В точке частоты 4.1 ГГц разность фаз между двумя состояниями элемента π , а амплитуды двух состояний составляют -0.27 дБ и -0.99 дБ соответственно, показывая, что метаповерхностный волновой фронт хорошо управляется.

Возвращаясь к истории вопроса, следует особо отметить, что в 2014 г. была опубликована одна из первых работ по

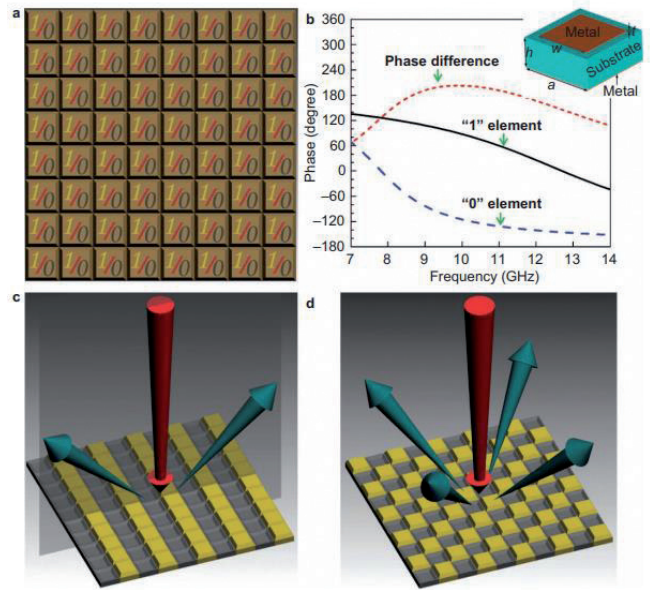


Рис. 5. 1-битная цифровая МП и кодирование МП [30]: (а) 1-битная цифровая МП состоит только из двух типов элементов: '0' и '1'. б) квадратная металлическая конструкция патч-блока (вставка) для реализации элементов "0" и "1" и соответствующих фазовых характеристик в диапазоне частот. в) Две 1-битные периодические кодирующие МП для управления рассеянием лучей путем проектирования кодирующих последовательностей элементов '0' и '1': (с) 010101.../010101... код и (д) 010101.../101010... код.

цифровому кодированию программируемых метаматериалов/метаповерхностей [30], когда интегрируют цифровую информацию в дизайн метаматериалов, соединяя физические миры и миры цифрового кодирования.

Все результаты в статье [30] основаны на концепции кодирования метаматериалов. Начнем с 1-битного кодирования МП – **Рис. 5а**. Мы рассматриваем специальную МП, которая состоит из бинарных цифровых элементов '0' или '1'. В двоичном случае максимальная разность фаз составляет π (или 180°). Следовательно, мы проектируем элемент "0" как частицу метаматериала с 0-фазовым откликом, а элемент "1" как частицу метаматериала с π фазовым ответом. Таким образом, фазовые ответы элементов '0' и '1' просто определяются как $\varphi_n = n\pi$ ($n = 0,1$). Чтобы достичь широкой полосы частот, используется субволновая квадратная металлическая патч-вставка, напечатанная на диэлектрической подложке, для реализации двоичных элементов (см. вставку Рис. 5б).

В отличие от существующих аналоговых метаматериалов, которые используют эффективные параметры среды или специальные дисперсионные отношения для управления электромагнитными полями, кодирующие метаматериалы просто манипулируют электромагнитными волнами через различные кодирующие последовательности элементов "0" и "1". Например, при периодической кодирующей последовательности 010101.../010101..., нормально падающий луч будет в основном отражаться МП в двух симметрично ориентированных направлениях, тогда как при периодической кодирующей последовательности 010101.../101010.../010101.../101010..., обычно падающий луч будет в основном отражаться в четырех симметрично ориентированных направлениях, как показано на Рис. 5с и 5d.

Концепция кодирующего метаматериала может быть расширена от 1-битного кодирования до 2-битного кодирования или выше [30]. В 2-битном кодировании четыре типа единичных ячеек с различными ответами должны имитировать элементы '00', '01', '10' и '11'. 2-битное кодирование имеет большую свободу манипулировать электромагнитными волнами, чем 1-битное кодирование, но требует более сложной технологии для цифрового управления. Подобно 1-битному случаю, четыре типа единичных ячеек в 2-битных кодирующих метаматериалах должны иметь фазовые ответы 0, $\pi/2$, π и $3\pi/2$, соответствующие элементам '00', '01', '10' и '11' соответственно. Следовательно, фазовые ответы φ_n просто определяются как $\varphi_n = n\pi/2$, ($n = 0,1,2,3$).

Чтобы реализовать эти частицы метаматериала, в [30] по-прежнему используются квадратные металлические патч-вставки различных размеров, напечатанные на диэлектрической подложке, для проектирования элементов "00", "01", "10" и "11", как показано на Рис. 6. Благодаря 2-битному кодированию метаматериалов или МП у нас есть большая гибкость в управлении последовательностями кодирования для достижения более широких приложений.

Предложенные кодирующие метаматериалы, цифровые метаматериалы и программируемые

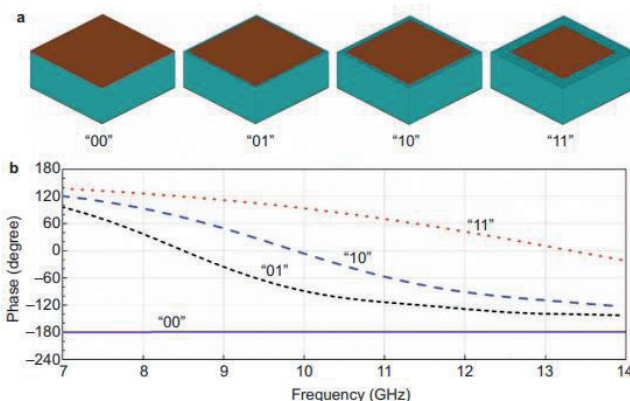


Рис. 6. 2-битное кодирование метаповерхностных элементов и их фазовых откликов [30]: а) элементы "00", "01", "10" и "11" (слева направо), выполненные с помощью квадратных металлических патч-блоков различных размеров. б) фазовые ответы элементов "00", "01", "10" и "11".

метаматериалы, как отмечается в [30], очень привлекательны для различных применений, таких как управление пучками излучения антенн (аналогично антеннам с фазовыми решетками, но с использованием другого принципа со значительно менее дорогим подходом), уменьшение характеристик рассеяния целей и реализация других интеллектуальных метаматериалов.

Далее рассмотрим наиболее характерные примеры интеллектуальных МП. Начнем с уникального примера интеллектуальной МП, опубликованный в июне 2022 года [31].

5. БЕСПРОВОДНАЯ "МЫСЛЕННАЯ СВЯЗЬ" ЧЕРЕЗ ПЛАТФОРМУ МОЗГ–КОМПЬЮТЕР–МП

Исследование механизмов мозга человека, и, в частности, изучение механизмов обеспечения психических процессов, является одной из актуальных проблем современной науки. Китайские ученые представили электромагнитную интеллектуальную МП с интерфейсом мозг-компьютер (BCI), управляемую с помощью сигналов мозга напрямую и неинвазивно [31]. В своей работе ученые разработали и экспериментально подтвердили возможность беспроводной «мысленной связи» и дистанционного управления «силой мысли». Для работы устройства используются неинвазивные электроды, которые

считывают электроэнцефалограмму (ЭЭГ) с помощью метода вызванного потенциала на волне P300. Напомним, что волна P300 (P3) - это компонент потенциала, связанный с событиями, возникающий в процессе принятия решений. Считается, что это эндогенный (происходящий из живой системы) потенциал, поскольку его возникновение связано не с физическими свойствами стимула, а с реакцией человека на него. Утверждается, что активность мозга можно превратить в радиоволны с помощью программируемой МП. Эта технология открывает путь к созданию управляемых «сознанием» радаров, систем обнаружения уставших водителей и другим применениям.

5.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПЛАТФОРМА МОЗГ-КОМПЬЮТЕР-МП ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНТЕЗОМ ИНФОРМАЦИИ И ЕЕ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ

В последнее время перепрограммируемые МП, включающие в себя PIN-диоды, варикапы,

микро/наноэлектромеханические системы (MEMS/NEMS) [21, 23], позволили осуществлять активный в реальном времени программируемый контроль над функциями электромагнитного поля, которые (МП) раньше были статическими или полностью ограничены в обычных пассивных аналогах. В [31] впервые предложена и создана электромагнитная платформа мозг-компьютер-МП (ЕВСМ) для неинвазивного управления синтезом информации и ее беспроводной передачей – **Рис. 7**. Оператор, оснащенный электродами и устройством P300 ВСИ, может напрямую управлять МП с различными электромагнитными функциями под визуальным стимулом с помощью определенных временных последовательностей кодирования. На Рис. 7а продемонстрированы четыре типичные схемы, включая беспроводную связь мозга, расшифровка шаблонов кодирования, сканирование луча и многофункциональность электромагнитных модуляций.

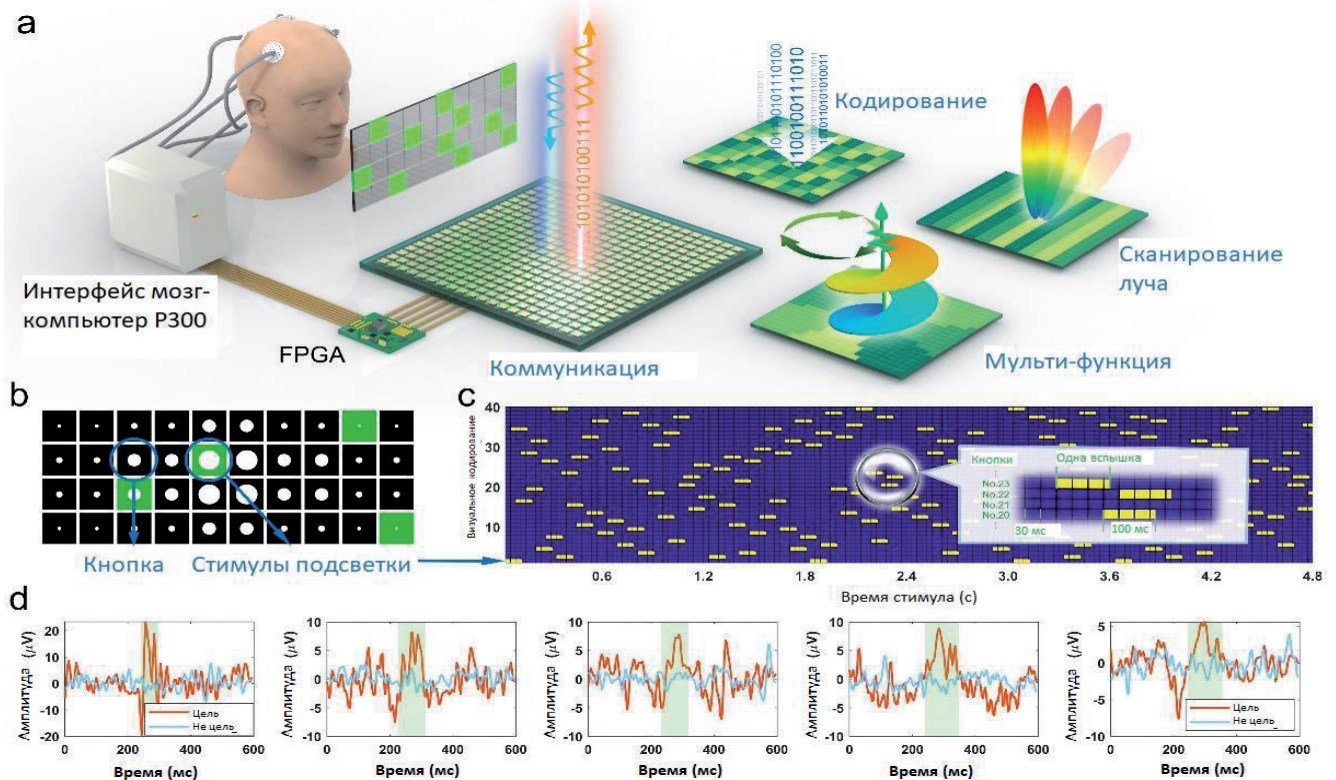


Рис. 7. Платформа ЕВСМ [31]: (а) Системная архитектура ЕВСМ. (б) Графический пользовательский интерфейс схемы отклонения луча. Кнопки с разными кружками представляют разные направления рассеяния луча, где выделенный стимул – зеленые блоки. (с) Схематическая диаграмма последовательности стимулов, в которой 40 строк представляют 40 кнопок, а желтые блоки отмечают выделение кнопок, каждое из которых длится 100 мс. (д) Экспериментально измеренные сигналы ЭЭГ пяти нажатий кнопок, где очевидные пики амплитуды возникают примерно через 300 мс.

Дисплей размещается перед оператором для отображения графического пользовательского интерфейса (GUI) и имеет виртуальную матрицу кнопок, как показано на Рис. 7*b*. Разные кнопки соответствуют разным операциям шаблона кодирования ЕВСМ. Каждая попытка соответствует одной отправке команды, и кнопки начинают последовательно мигать в случайном порядке около 5 раундов, каждый из которых содержит по одной вспышке для каждой кнопки. Последовательность вспышек генерируется случайным образом перед каждым испытанием. На Рис. 7*c* представлена последовательность мигания 40 кнопок (40 рядов) в схеме сканирования луча, где желтые квадраты указывают начальную точку стимула.

Вертикальная ось представляет количество кнопок от 1 до 40, а горизонтальная ось представляет 160 последовательных вспышек стимула, отмеченных желтыми полосами на Рис. 7*c*. Каждый отмеченный блок на Рис. 7*c* соответствует продолжительности 30 мс, а каждая вспышка длится 100 мс, что охватывает чуть более 3 блоков. На Рис. 7*c* мы дополнительно показываем увеличенное изображение трех вспышек, чтобы более четко проиллюстрировать временные последовательности стимулов различных кнопок.

Внимание оператора сосредоточено на кнопке, соответствующей команде, которую он хотел бы подать (т. е. цели). Когда мишень мигает, положительный потенциал может быть обнаружен на ЭЭГ примерно через 300 мс, получивший название потенциала Р30034. Экспериментально доказано, что такой ВСИ на основе Р300 эффективен для непосредственного управления мозгом внешними устройствами. Чтобы представить сигналы мозга для двух типов стимулов (целевой и нецелевой), на Рис. 7*d* показаны измеренные сигналы ЭЭГ, где красная и синяя кривые соответствуют сигналам для целевого и нецелевого стимула соответственно. На каждом подрисунке Рис. 7*d* сигналы, соответствующие как целевой, так и нецелевой кнопкам, усредняются по множеству вспышек. Для каждой вспышки кнопки в испытании сегмент сигнала ЭЭГ от 0 до 600 мс после начала вспышки извлекается и корректируется с помощью базовой линии,

извлеченной из 200 мс до начала вспышки. Затем этот последовательный стимул используется для прямого управления программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС) для выполнения соответствующих инструкций.

5.2. БЕСПРОВОДНАЯ "МЫСЛЕННАЯ СВЯЗЬ" МЕЖДУ ДВУМЯ ОПЕРАТОРАМИ

В качестве демонстрации концепции ЕВСМ в [31] представлена беспроводная "мысленная связь" между двумя операторами – Рис. 8*a*. Для оператора ВСИ предоставляется текстовый графический интерфейс в котором визуальная кнопка кодируется непосредственно как определенная последовательность кодирования, состоящая из "0" и "1", связанная с двумя шаблонами кодирования. Используется однолучевая диаграмма с высоким усилением и диаграмма уменьшения рассеяния для амплитудной модуляции, соответственно "1" (высокая амплитуда) и "0" (низкая амплитуда). В качестве доказательства прототипа показана беспроводная передача текста мысленно от одного оператора к другому в рамках системы связи ЕВСМ. Оператор А, как передатчик текста, отправляет буквы, визуально глядя на кнопку символа в графическом интерфейсе ЕВСМ. Когда целевая буква декодируется из сигналов ЭЭГ, последовательность кодирования, основанная на кодах ASCII, реализуется на ПЛИС для переключения изменяющихся во времени шаблонов.

В процессе кодирования, поскольку кнопки, представляющие связанные текстовые символы, имеют соответствующие коды ASCII, выбранная кнопка напрямую преобразуется в двоичные коды ASCII с заголовком кадра "1111111110000", как показано на Рис. 8*c*. Затем, в соответствии с окончательным кодом, МП отражает высокую или низкую интенсивность в пространстве. В процессе декодирования мы сначала собираем пространственную электромагнитную энергию, используя приемный канал, включающий микрополосковую антенну, встроенную рядом с МП, как показано на Рис. 8*e*, а также малошумящий усилитель (МШУ) и высокоскоростной аналого-цифровой преобразователь (АЦП), управляемый ПЛИС. Собранный поток данных представляет собой набор последовательных кадров, который представляет замеренную интенсивность при

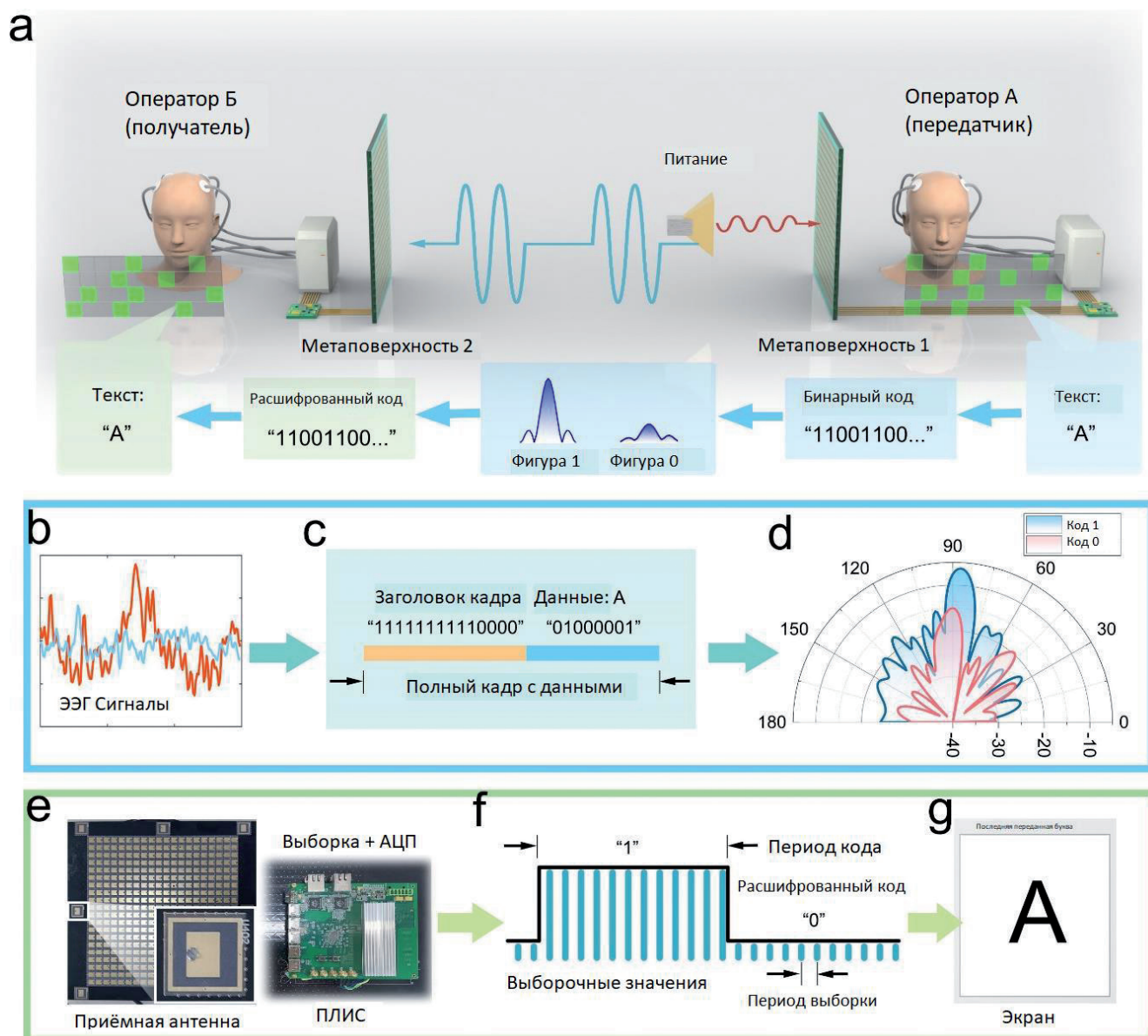


Рис. 8. Беспроводная текстовая связь с использованием EBCM [31]: а) системная архитектура системы текстовых сообщений, а также процесс кодирования и декодирования. (b)-(d) Процесс кодирования сигналов ЭЭГ в переданные электромагнитные сигналы, где сигналы ЭЭГ, показанные в (b), сначала обнаруживаются ВСІ и преобразуются в цифровую последовательность (c) для беспроводной передачи, а затем излучаются с помощью МП с разными амплитудами (d). (e)-(g) Процесс декодирования беспроводной связи, когда антенна и ПЛИС (e) сначала принимают и дискретизируют сигналы из пространства и преобразуют их в цифровые сигналы. Выборочные данные дискретизируются в коды 0/1 для декодирования (f), и, наконец, переводятся в текст для отображения (g).

частоте сбора данных 10 МГц. Используется алгоритм декодирования, чтобы определить положение заголовка кадра для определения начальной точки кадра данных, как показано на Рис. 8f. Затем выборочные данные переводятся в двоичные коды ASCII, и далее текст отображается в графическом интерфейсе.

Четыре текстовые последовательности успешно отправляются и принимаются с помощью платформы EBCM, включая

"HELLO WORLD", "HI, SEU", "HI, SCUT" и "BCI METASURFACE". Среднее время ввода каждого символа составляет около 5 сек. при использовании ВСІ на базе P300 опытным оператором ВСІ. Поскольку программируемая МП может достигать скорости передачи кода "0/1" не менее 1 Мбит/с, максимальная скорость передачи символов для МП составляет около $5 \cdot 10^4$ символов в секунду (20 бит в каждой последовательности). Следовательно, конечная

скорость передачи текста составляет около 12 символов в минуту. Стоит отметить, что ВСИ на основе P300 обеспечивают большую точность и надежность среди различных неинвазивных ВСИ.

5.3. РЕАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

Подробно система связи представлена на **Рис. 9a** [31]. В передающей части сигналы ЭЭГ сначала обнаруживаются и обрабатываются устройствами ВСИ и транслируются в соответствующие управляющие сигналы ПЛИС. Сигналы управления следуют принципу кодирования сигналов соответствующего интерфейса, показанного на **Рис. 7b-7d**.

ПЛИС выполняет кодирование и переводит PIN-диоды в нужные состояния. В приемной части микрополосковая антенна (МПА) рядом с метаповерхностью принимает электромагнитные сигналы от передатчика и направляет их в МШУ и детектор. Детектор производит выборку аналоговой амплитуды,

которая далее преобразуется в цифровые коды для ПЛИС. Представленный процесс является однонаправленным, но система связи ЕВСМ является двунаправленной, поскольку фронты передачи и приема являются соответственно метаповерхностью и МПА, как показано на **Рис. 9b**.

Экспериментальный сценарий представлен на **Рис. 9c**, в котором оператор А выполняет задачу передачи текста, а оператор В получает и читает текст. Расстояние между передающей и принимающей МП составляет около 1.3 м, при этом передающая МП возбуждается широкополосной антенной с расстояния 0.3 м, а приемник представляет собой интегрированную вблизи приемной МП антенну, которая подключена к МШУ и детектору, а также АЦП, управляемым другим ПЛИС. Полученные и демодулированные буквы и текст окончательно отображаются в разработанном графическом интерфейсе. Результаты всех экспериментов представлены в дополнительном фильме к [31].

На **Рис. 10a** представлены обработанные ЭЭГ – ответы канала 0Z на два типа стимулов (целевой и нецелевой) при произнесении испытуемым слова "HELLO".

В каждой подфигуре, соответствующей написанию одного символа, для каждого из двух типов стимулов формы сигналов потенциала, связанного с событием (ERP), извлекаются с помощью фиксированного по времени среднего значения сигналов ЭЭГ по всем вспышкам цели или одной из кнопок без цели в испытании. По сравнению с нецелевыми данными, высокая амплитуда четко наблюдается примерно через 300 мс после стимула. В соответствии с сигналами ЭЭГ, ЕВСМ выдает амплитудно-модулированные электромагнитные сигналы различных букв, используя код ASCII.

Чтобы полностью продемонстрировать беспроводную связь, дополнительно в [31] предоставлены 12 сегментов измеренных электромагнитных сигналов, включая буквы "H, E, L, O, B, C, I, S, M, E, T, A", как показано на **Рис. 10b-10d**, где высокие и низкие амплитуды соответственно означают "1" и "0" в коде ASCII.

Представленные данные собираются электромагнитным детектором и нормализуются. Каждое обнаружение генерирует амплитудный

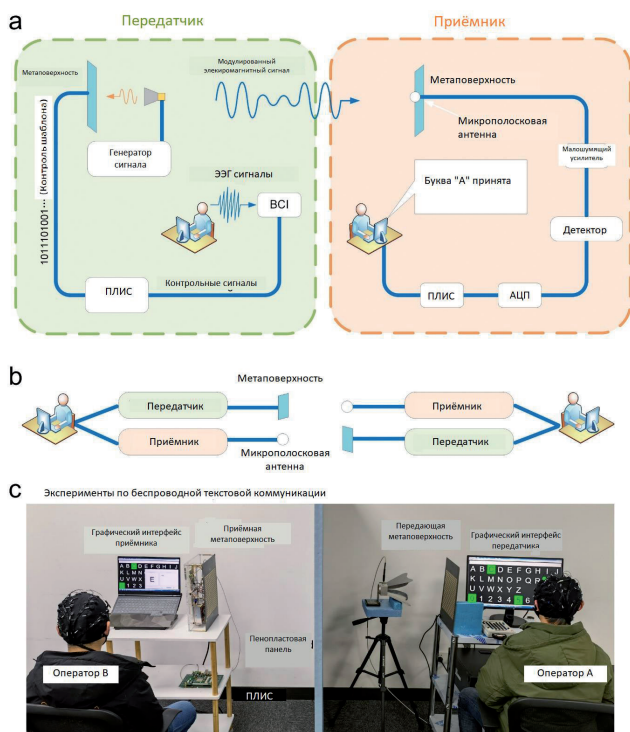


Рис. 9. Экспериментальная реализация беспроводной текстовой связи [31]: (a) Системная архитектура эксперимента по беспроводной текстовой связи. (b) Иллюстрация рабочего механизма передающей и принимающей частей. (c) Сценарий эксперимента с беспроводной текстовой связью напрямую через ЕВСМ, где между двумя операторами помещается панель из пенопласта для проверки свойств беспроводной связи.

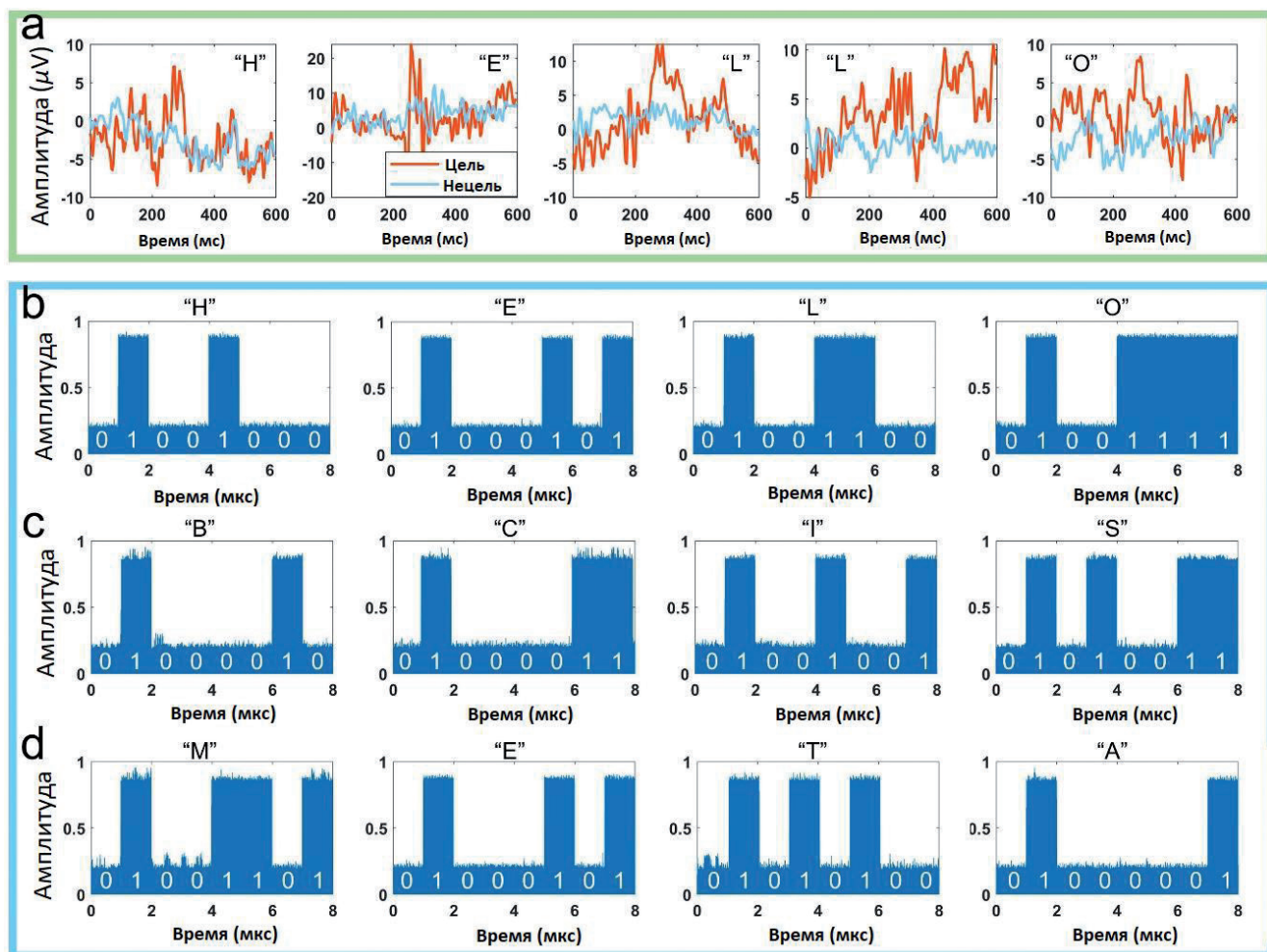


Рис. 10. Экспериментальные результаты беспроводной текстовой связи с использованием EBCM [31]: (а) Экспериментально измеренные сигналы ЭЭГ в схеме текстовой коммуникации. Для демонстрации представлены сегменты ЭЭГ, соответствующие пяти буквам "HELLO". (b)-(d) Измеренные электромагнитные сигналы букв "HELO", "BCIS" и "META".

импульс и множество амплитудных импульсов для составления представленных данных, где высокие и низкие амплитуды соответственно означают коды 1 и 0. ASCII-коды этих букв четко прослеживаются в соответствии с Рис. 10b-10d.

5.4. СИНТЕЗ ВОЛНОВОГО ФРОНТА С ПОМОЩЬЮ EBCM

Дополнительные функции синтеза волнового фронта с помощью EBCM исследовались также в [31]. Для этого были разработаны три типовых приложения, включая сканирование визуального луча, множественные электромагнитные модуляции и ввод шаблона кодирования, а также, установлен демонстрационный прототип EBCM, в котором МП заменена версией светодиода вместо PIN-диода, как показано на Рис. 11а.

Поскольку шаблоны кодирования на МП напрямую определяют электромагнитные

функции, светодиоды встраивались так, чтобы интуитивно визуализировать управление шаблоном в системе проверки EBCM. В схеме сканирования визуального луча мы хотим, чтобы оператор мог соответствующим образом управлять сканированием электромагнитного луча с помощью EBCM, включая отклонения луча, генерацию луча с орбитальным угловым моментом (orbital-angular momentum – OAM) и контроль радиолокационного поперечного сечения (radar cross section – RCS), как показано на Рис. 11b. Был разработан графический интерфейс сканирования луча – Рис. 8e. Предполагается, что эта схема может быть дополнительно интегрирована с техникой дополненной реальности (augmented reality – AR) и найдет больше применений в адаптивной беспроводной связи "разум-текст" и интеллектуальном обнаружении радаров.

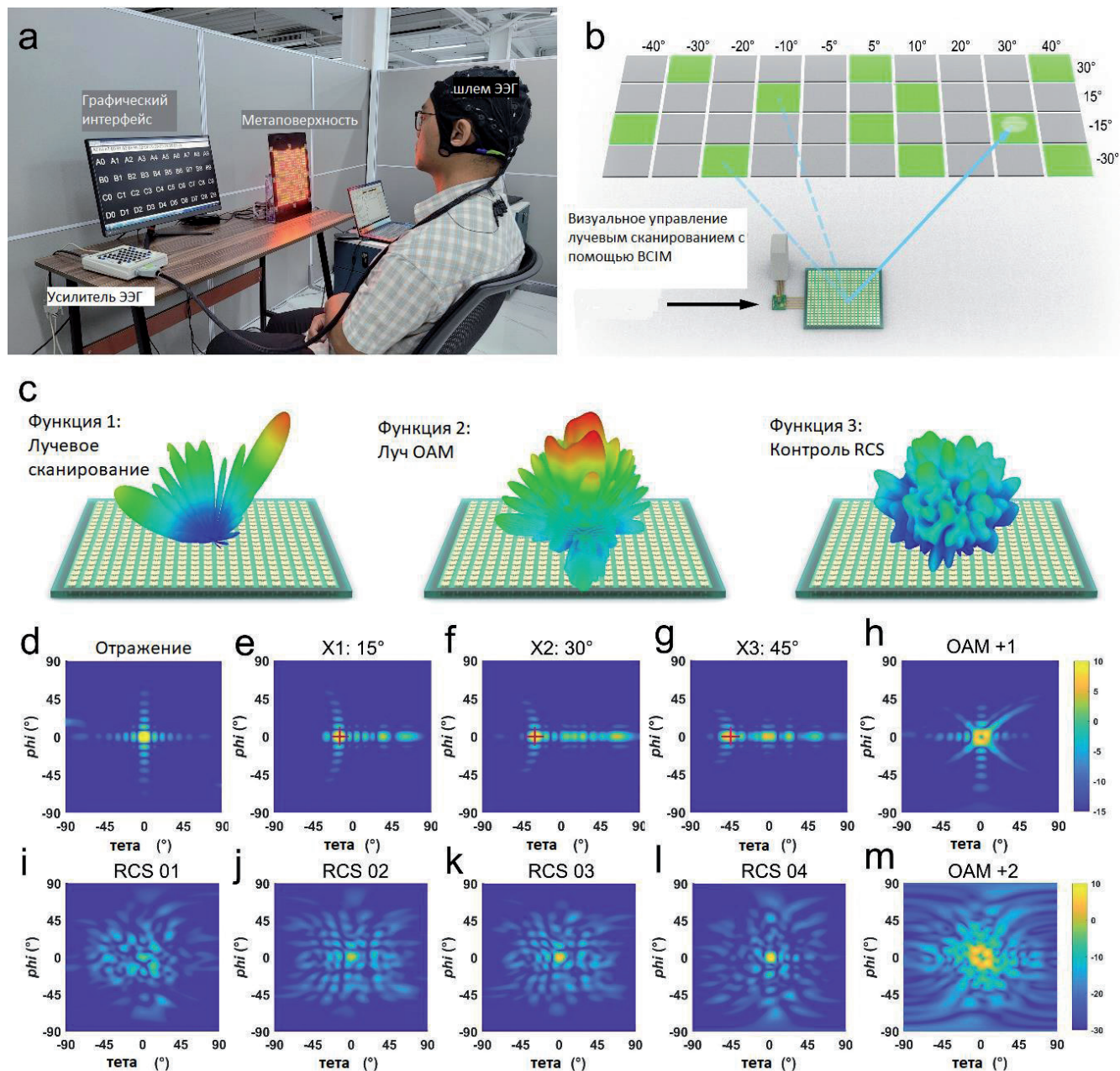


Рис. 11. Дополнительные функции синтеза волнового фронта с использованием ЕВСМ [31]: (а) Фото схемы кодирования образов. (б) Иллюстрация сканирования луча с помощью ЕВСМ. Визуальный взгляд оператора ВСМ непосредственно управляет МП, чтобы отрегулировать направление рассеяния до желаемого угла. Каждая кнопка относится к определенному направлению рассеяния. (в) Три типовые электромагнитные функции, включая сканирование луча, генерацию луча ОАМ и управление RCS. (d)-(g) Смоделированные результаты четырех видов полей сканирования луча, где результат измерения основного направления отмечен красным крестом. Рассеивающий пучок отклоняется от 0° до 45° по оси x. (g)-(j) Результаты смоделированного поля контроля RCS, где значения от "01" до "04" указывают четыре уровня интенсивности отражения. (k) и (l) Результаты моделирования в дальней зоне для режимов OAM +1 и +2. Отчетливо виден центральный нуль.

Теперь оператор может напрямую управлять ЕВСМ для различных электромагнитных функций, включая отклонения луча, генерацию луча с ОАМ и контроль RCS, как показано на Рис. 11с. Результаты моделирования этих функций представлены на Рис. 11d-11m. Например,

мы иллюстрируем результат вертикально отраженного одиночного луча, генерируемого однородной фазовой диаграммой на Рис. 11d, и результаты трех углов отклонения на Рис. 11e-g, где смоделированные данные четко указывают направления рассеяния 15°, 30° и

45°, что свидетельствует о большом совпадении с измеренными направлениями, отмеченными красным крестом. В регулировке уровня RCS четыре кнопки RCS от "01" до "04" будут генерировать рассеянные поля, представленные на Рис. 11*i-l*, показывающие уровни рассеяния -15 дБ, -12 дБ, -9 дБ и -6 дБ соответственно. Для генерации пучка ОАМ мы наблюдаем два поля рассеяния двух мод ОАМ (+1 и +2) на Рис. 11*b* и 11*m*, на которых отчетливо наблюдается ноль центральной амплитуды.

5.5. К НОВЫМ ПОКОЛЕНИЯМ БИОИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТАПОВЕРХНОСТНЫХ СИСТЕМ

Таким образом, на основе платформы ЕВСМ в [31] показано, что оператор больше не нуждается в каких-либо мышечных действиях, а только смотрит на конкретную визуальную кнопку для соответствующего последовательного стимула, который может быть распознан ЕВСМ и преобразован в соответствующие электромагнитные сигналы для связи. Продемонстрированы три типовые схемы с различными функциями, включая визуальное сканирование луча, множественное переключение электромагнитных функций и ввод шаблона МП, который содержит более 20 шаблонов кодирования для различных однолучевых сканирований, формирований нескольких лучей, генерации ОАМ-луча и контроль RCS. Представленная работа, объединяющая электромагнитное волновое пространство и ВСИ, может открыть новое направление для изучения глубокой интеграции метаповерхности, интеллекта человеческого мозга и искусственного интеллекта с целью создания новых поколений биоинтеллектуальных метаповерхностных систем.

6. ПРОГРАММИРУЕМАЯ МП ДЛЯ ШИФРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

6.1. НЕБОЛЬШОЕ ПРЕДИСЛОВИЕ

Программируемые и информационные МП продемонстрировали большой потенциал в беспроводной связи, но работ по шифрованию этой связи сейчас немного. Хотя архитектуру обычных радиочастотных передатчиков можно значительно упростить, применив новую

представленную автором выше технологию [30,31], однако, насколько нам известно, эти исследования сводятся лишь к незащищенной прямой передаче информации, а исследования технологии шифрования информации на основе этой беспроводной связи нового типа все еще очень ограничены. В работе [32] предложена программируемая поляризационно-модулированная (РоМ) информационная МП, которая может не только получать произвольно линейно поляризованные отраженные волны, но и модулировать их амплитуды в реальном времени. Кроме того, предлагается схема шифрования беспроводной связи путем введения метаключа с использованием программируемой МП информации РоМ.

Затем метаключ кодируется и шифруется путем сокрытия его кодов в различных поляризационных каналах в соответствии с протоколом шифрования и отправляется пользователю с использованием программируемой МП информации РоМ на передающем конце. В месте приема пара поляризационных дискриминаторных антенн (РДА) предназначена для приема и декодирования зашифрованных сигналов метаключа. Как только пользователь получает метаключ, зашифрованная целевая информация может быть восстановлена. Результаты показывают, что предлагаемая программируемая МП информации РоМ не только может достичь хорошей производительности модуляции поляризации, но и показывает хорошие потенциалы в шифровании коммуникаций, что может значительно повысить безопасность беспроводной связи.

6.2. СХЕМА ШИФРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДУЛИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МП

На Рис. 12 показана концептуальная иллюстрация схемы шифрования беспроводной связи, основанной на программируемой МП РоМ [32]. На передающем конце целевое изображение, такое как изображение рыси, шифруется с помощью метаключа и предварительно отправляется Бобом – Рис. 12*a*. Поэтому, даже если зашифрованная информация будет перехвачена,

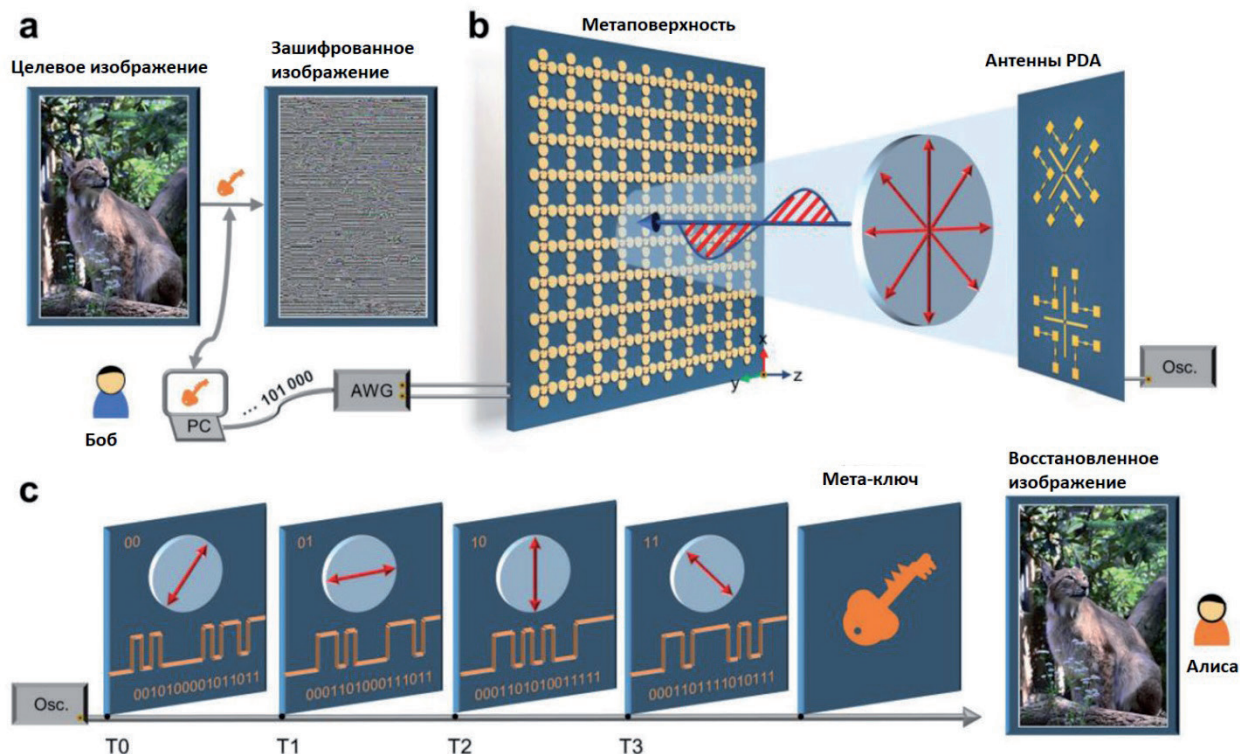


Рис. 12. Концептуальная иллюстрация схемы шифрования беспроводной связи на основе программируемой информационной МП РоМ [32]: а) Целевое изображение шифруется с помощью метаключа для создания зашифрованного изображения. б) МП РоМ, управляемая напряжением, шифрует и отправляет метаключ, а пара антенны поляризационной дискриминации, подключенных к осциллографу, принимает и идентифицирует сигналы. в) Метаключ расшифровывается сигналами, полученными от четырех различных каналов поляризации, а затем с помощью метаключа может быть восстановлен целевой зашифрованный образ. (Фото: Hai Lin Wang, Southeast University).

расшифровать ее без метаключа невозможно. Однако для того, чтобы Алиса могла получить правильную информацию о цели, метаключ также должен быть отправлен Алисе безопасным образом, за исключением зашифрованной информации о цели, и эта операция может быть реализована с использованием программируемой информационной МП РоМ, как показано на Рис. 12b. МП нагружена PIN-диодами, а ее амплитуда и фаза отражения в вертикальном и горизонтальном направлениях могут независимо контролироваться в режиме реального времени путем регулировки состояния PIN-диодов. Следовательно, когда на МП попадает падающая волна с 45-градусной поляризацией, угол поляризации линейно поляризованной отраженной волны может быть произвольно отредактирован. Кроме того, можно дополнительно модулировать амплитуду отраженной волны в каждом поляризационном канале. В пункте приема

две PDA, подключенные к осциллографу, используются для приема сигналов (т.е. модулированной отраженной волны), которые могут не только идентифицировать состояние поляризации отраженной волны, но и получить двоичную кодирующую последовательность на основе амплитудной манипуляции в каждый канал поляризации, как показано на Рис. 12c. Стоит отметить, что эти четыре кодирующие последовательности передаются с использованием различных поляризационных каналов, и двоичные коды метаключа скрыты в этих последовательностях. Таким образом, Алиса может декодировать полученный сигнал для получения метаключа в соответствии с согласованным протоколом шифрования, а затем использовать его для восстановления целевого изображения.

6.3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На Рис. 13a показан единичный элемент предлагаемой программируемой

информационной МП PoM [32], состоящей из трех металлических слоев, разделенных двумя диэлектрическими подложками. Пять металлических круглых накладок, нагруженных PIN-диодами в верхнем слое, подключены к фидерным линиям в нижнем слое через металлизированные сквозные отверстия, так что на PIN-диоды может подаваться напряжение смещения. Эквивалентная схема PIN-диода (Skyworks SMP1321-040LF) приведена в правом углу Рис. 13а. Это параллельная цепь из постоянного конденсатора ($C = 0.15$ пФ) и переменного резистора; резисторы вдоль

направлений x и y определены как Rdx и Rdy соответственно. Значения Rdx и Rdy контролируются напряжениями смещения V_x и V_y , регулируемые по строкам и столбцам соответственно, и изменяются в диапазоне 1-10 000 Ом.

Геометрические параметры, показанные на Рис. 13а, составляют $p = 14.2$ мм, $a = 4.4$ мм и $b = 3.6$ мм. На Рис. 13б показано расположение фидерных линий на нижнем слое, в котором диаметр круглого пятна и расстояние между двумя фидерными линиями равны $c = 4$ мм и $d = 5.8$ мм соответственно. Диэлектрические подложки

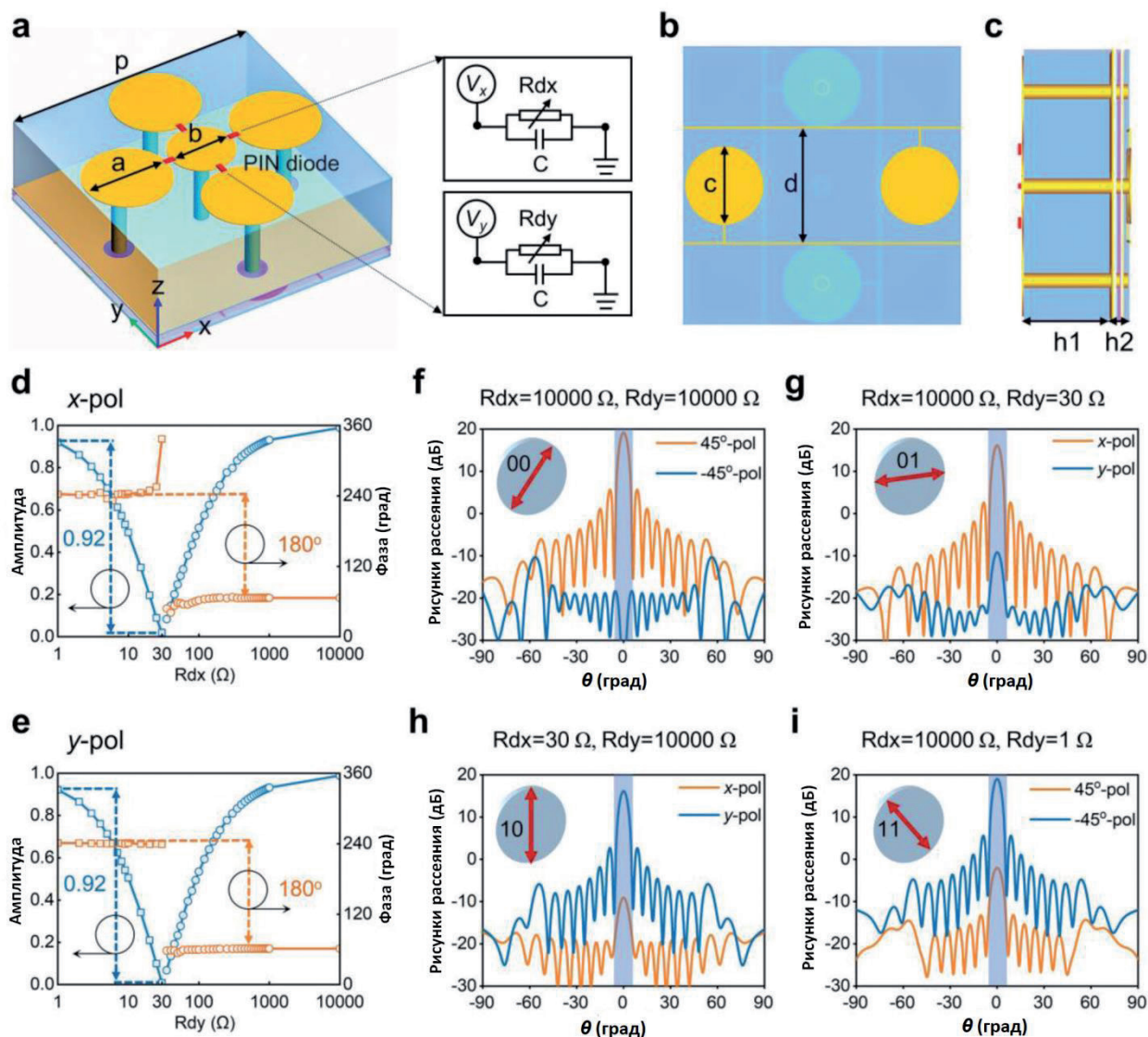


Рис. 13. Дизайн прототипа и результаты моделирования [32]: а-с) Единичный элемент метаповерхности PoM, нагруженный четырьмя PIN-диодами: а) вид спереди, б) вид снизу и с) вид сбоку. д, е) Моделируемые амплитуды и фазы отражения от МП, меняющиеся в зависимости от Rd на частоте 10 ГГц: д) x -поляризованная волна, е) y -поляризованная волна. ф-и) Смоделированные картины 2D отражения излучения в дальней зоне для четырех состояний линейной поляризации: ф) поляризация $+45^\circ$, г) поляризация x , б) поляризация y , и) поляризация -45° .

представляют собой F4B (политетрафторэтилен) с относительной диэлектрической проницаемостью 2.2 и тангенсом угла потерь 0.001, толщина которых составляет $b_1 = 4$ мм и $b_2 = 0.254$ мм, как показано на Рис. 13а. Согласно работе [33], в которой предложена и экспериментально продемонстрирована широкополосная программируемая МП, амплитудой и фазой отраженных электромагнитных волн можно независимо управлять путем регулировки напряжения смещения PIN-диода, интегрированного в метаатом, в режиме реального времени в широком диапазоне частот. На Рис. 13д и 13е показаны результаты моделирования амплитуды и фазы отражения единичного элемента с R_{dx} и R_{dy} на частоте 10 ГГц при x - и y -поляризованной волне соответственно. Результаты показывают, что нормированная амплитуда отраженной волны, поляризованной по оси x (или y), может непрерывно контролироваться от 1 до 0, когда R_{dx} (или R_{dy}) увеличивается от 1 до 30 Ом или уменьшается от 10000 до 30 Ом, разность фаз отраженных волн в этих двух областях держится около 180° . Кроме того, предлагаемый модульный элемент также имеет широкополосные характеристики и может работать в диапазоне частот 9-11 ГГц.

Когда волна с 45-градусной поляризацией освещает МП, угол поляризации отраженной волны можно произвольно настроить, контролируя амплитуду и фазу компонентов x - и y -поляризации. На Рис. 13f-i показаны результаты моделирования волн отражения с поляризацией 45° , x , y и -45° , где МП состоит из 20×20 элементов с общим размером 284×284 мм². Когда сопротивления PIN-диодов в направлениях x и y установлены равными $R_{dx} = R_{dy} = 10000$ Ом, обе компоненты поляризации x и y эффективно отражаются и имеют одинаковую амплитуду и фазу, поэтому отраженная волна имеет одинаковую с падающей волной поляризацию, то есть поляризацию 45° , как показано на Рис. 2f. Когда сопротивления PIN-диодов в направлениях x и y установлены равными $R_{dx} = 10000$ Ом и $R_{dy} = 30$ Ом соответственно, эффективно отражается только компонента поляризации x ; тогда как компонента поляризации y полностью поглощается, поэтому отраженная волна будет

с поляризацией x , как показано на Рис. 2g. Аналогично, когда сопротивления PIN-диодов в направлениях x и y установлены равными $R_{dx} = 30$ Ом и $R_{dy} = 10000$ Ом соответственно, эффективно отражается только компонента поляризации y , в то время как компонента поляризации x полностью поглощается, отраженные волны будут с y -поляризацией, как показано на Рис. 2h. Однако когда сопротивления PIN-диодов в направлениях x и y установлены равными $R_{dx} = 10000$ Ом и $R_{dy} = 1$ Ом соответственно, компоненты поляризации x и y эффективно отражаются с одинаковой амплитудой, но имеют разность фаз 180° , поэтому отраженная волна будет представлять собой кросс-поляризацию падающей волны, то есть поляризацию -45° , как показано на Рис. 2i. Стоит отметить, что хотя продемонстрированы только четыре частных случая, отраженная волна с произвольным углом поляризации может быть получена путем точного управления амплитудой и фазой x - и y -компонент отражения. В работе [32] для схемы шифрования используются каналы поляризации 45° , x , y и -45° , которые кодируются как поляризационные коды "00", "01", "10" и "11" соответственно. Кроме того, когда левосторонняя циркулярно поляризованная волна освещает МП, поляризационная эллиптичность ее отраженной волны также может быть произвольно настроена путем управления амплитудой и фазой компонентов x - и y -поляризации.

6.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Программируемая информационная МП RoM изготовлена и измерена в безэховой камере [32], как показано на Рис. 14, где метаповерхность состоит из 20×20 элементов общим размером 284×284 мм², а PIN-диоды вдоль горизонтального и вертикального направлений независимо управляются двумя напряжениями смещения. На Рис. 14а показана экспериментальная установка для измерения амплитуды и фазы отражения, в которой две прямоугольные рупорные антенны размещены на расстоянии 1.5 м от МП для излучения и приема сигналов соответственно. Фотография одного из блоков представлена на Рис. 14b, на котором сверху показан элемент блока, нагруженный PIN-диодами, а снизу показана структура фидерных линий. На Рис. 14d показаны результаты измерения амплитуды

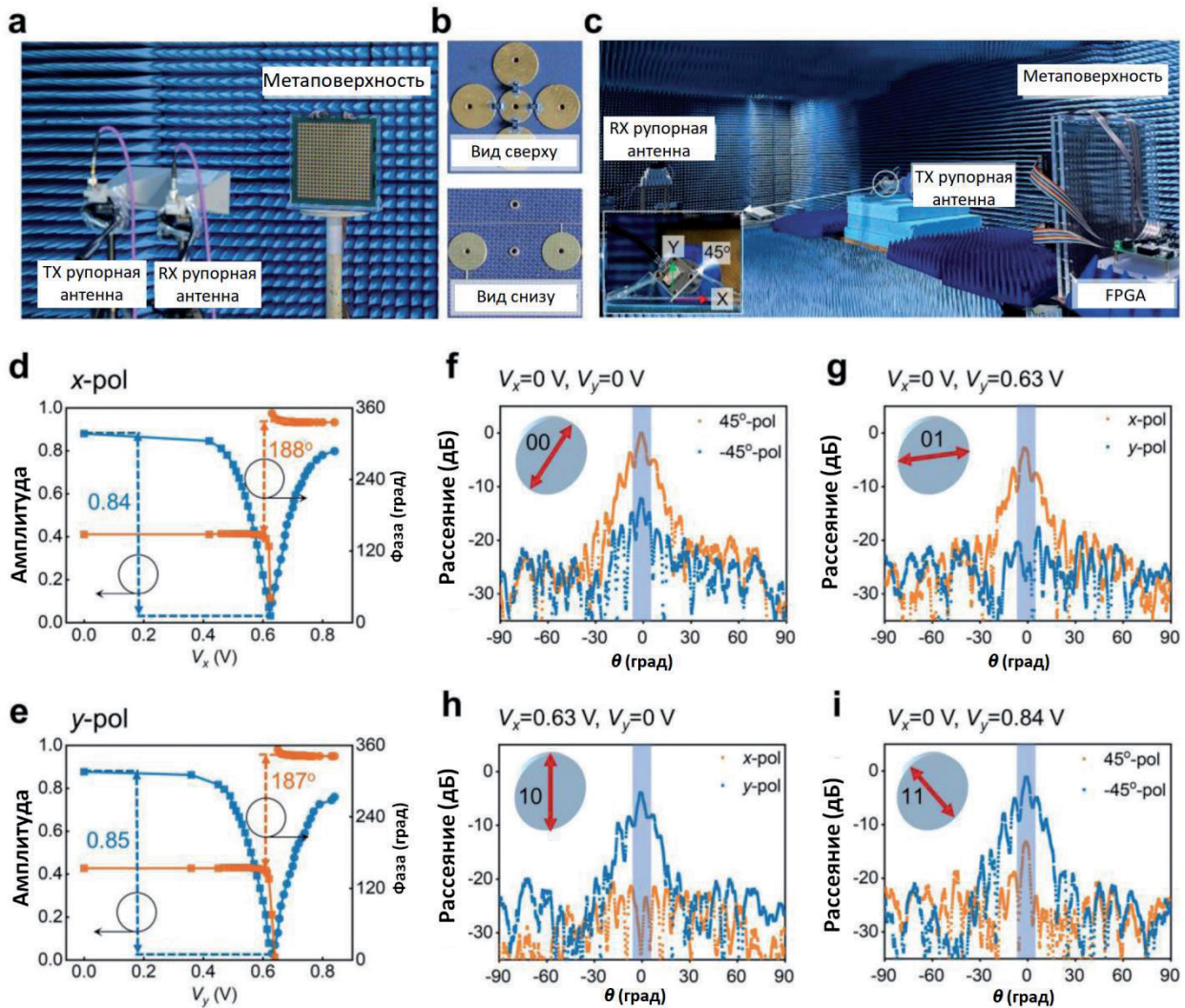


Рис. 14. Экспериментальные результаты МП PoM [32]: а) Экспериментальная установка для измерения коэффициентов отражения в безэховой камере. б) Вид сверху и снизу на один элемент блока. в) Измерение характеристик МП. d, e) Измеренные амплитуды и фазы отражения от МП при различных напряжениях смещения при зондировании d) x -поляризованными и e) y -поляризованными волнами на частоте 10 ГГц. f-i) Измеренные 2D диаграммы направленности для четырех состояний линейной поляризации: f) поляризация 45° , g) поляризация x , h) поляризация y и i) поляризация -45° .

и фазы x -поляризованной волны отражения на частоте 10 ГГц. Когда напряжение смещения V_x непрерывно изменяется от 0 до 0.84 В, амплитуда отраженной волны может плавно регулироваться от 0.02 до 0.87, при этом фаза может независимо переключаться между двумя фазами с разницей около 188° . Аналогичный результат можно получить и для y -поляризованной волны, как показано на Рис. 14e. Результаты измерений хорошо согласуются с результатами моделирования, показанными на Рис. 13c,d. Кроме того, широкополосные характеристики МП также были подтверждены измерениями.

Диаграммы направленности в дальней зоне программируемой информационной МП PoM

измеряются в стандартной микроволновой безэховой камере для проверки эффективности модуляции поляризации, как показано на Рис. 14c. МП помещается на вращающуюся платформу, а линзовая антенна из метаматериала x -диапазона размещается на расстоянии 80 см от МП, чтобы генерировать падающую плоскую волну с 45° -градусной поляризацией. Стандартная прямоугольная рупорная антенна X -диапазона закреплена на другой стороне безэховой камеры в качестве приемника, где расстояние между приемной рупорной антенной и вращающейся платформой составляет около 10 м. Измеренные диаграммы направленности различных линейно поляризованных отраженных волн в дальней

зоне при различных напряжениях смещения показаны на Рис. 14*f-i*. Когда напряжения смещения PIN-диодов в направлениях x и y установлены равными $V_x/V_y = 0/0, 0/0.63 \text{ В}, 0.63 \text{ В}/0$ и $0/0.84 \text{ В}$, отраженная волна будет иметь поляризацию $45^\circ, x, y$ и -45° соответственно.

6.5. Метаключ на основе МП РоМ

Блок-схема шифрования метаключа на основе МП РоМ показана на **Рис. 15** [32]. Метаключ состоит из двух 8-битных двоичных чисел P и S (Рис. 15*a*), в котором M -я строка и N -й элемент столбца матрицы метаключа достигаются

операцией исключающего ИЛИ (XOR) для M -го элемента S и N -го элемента P .

На Рис. 15*b* показано правило кодирования P и S . В этой схеме шифрования P кодируется как 00011011, представляя информацию о каналах поляризации, в которых коды "00", "01", "10" и "11" соответствуют каналам поляризации $45^\circ, x, y$ и -45° соответственно. S может быть любой двоичной последовательностью, которая в данном случае закодирована как 8-битное двоичное число 01110010. Чтобы избежать легкого перехвата информации S , в [32] вводится четыре других 8-битных двоичных числа $N1, N2, N3$ и $N4$, в которых $N1, N2$ и $N3$ могут быть

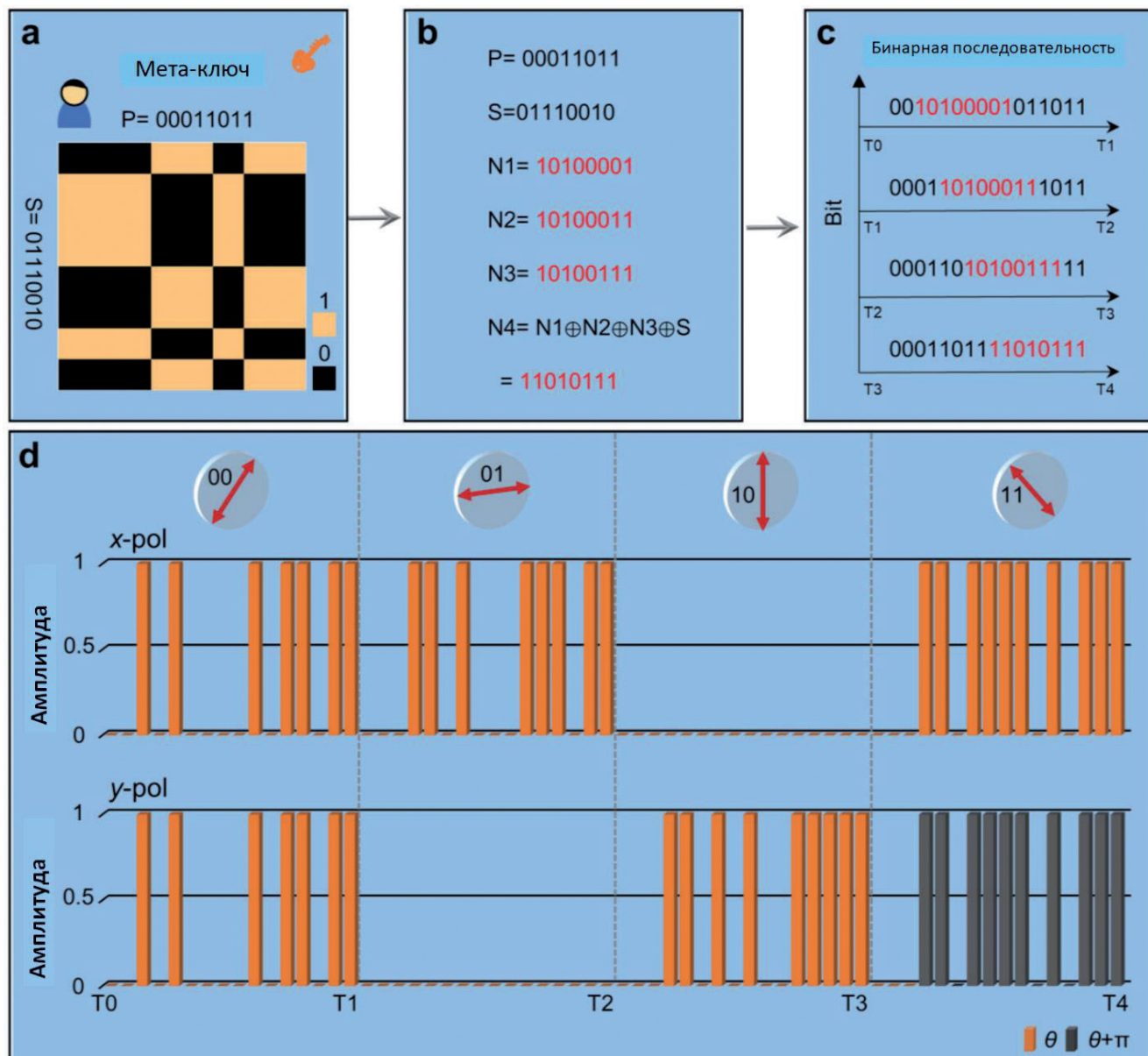


Рис. 15. Процесс шифрования схемы беспроводной связи с шифрованием РоМ [32]: а-с) Процесс шифрования с четырьмя двоичными последовательностями в качестве метаключа. д) Два ортогональных входных сигнала напряжения x - и y -поляризованных волн при разных каналах линейной поляризации соответственно.

случайными 8-битными двоичными числами, а $N_4 = S \oplus N_1 \oplus N_2 \oplus N_3$ ("⊕" – символ исключающего ИЛИ). Для дальнейшего повышения безопасности метаключа мы вставляем N_1, N_2, N_3 и N_4 в последовательность P соответственно, чтобы сгенерировать четыре 16-битные двоичные последовательности, в которые вставлены N_1, N_2, N_3 и N_4 после кодов канала поляризации "00", "01", "10" и "11" соответственно, а затем эти четыре 16-битных двоичных числа отправляются циклически по очереди с использованием соответствующего канала поляризации через МП РоМ, как показано на Рис. 15с. Взяв в качестве примера канал поляризации x , $N_2 = 10100011$ вставляется после кода "01" P для генерации нового 16-битного двоичного числа 0001101000111011, которое отправляется с использованием канала поляризации x в течение периода времени T_1 – T_2 . Для этого 16-битного двоичного числа мы переопределяем значения кодов "0" и "1", которые представляют сигналы низкого и высокого уровня, соответствующие амплитуде электромагнитной волны в каждом поляризационном канале, то есть низкое отражение представляет собой код "0" и высокое отражение – код "1".

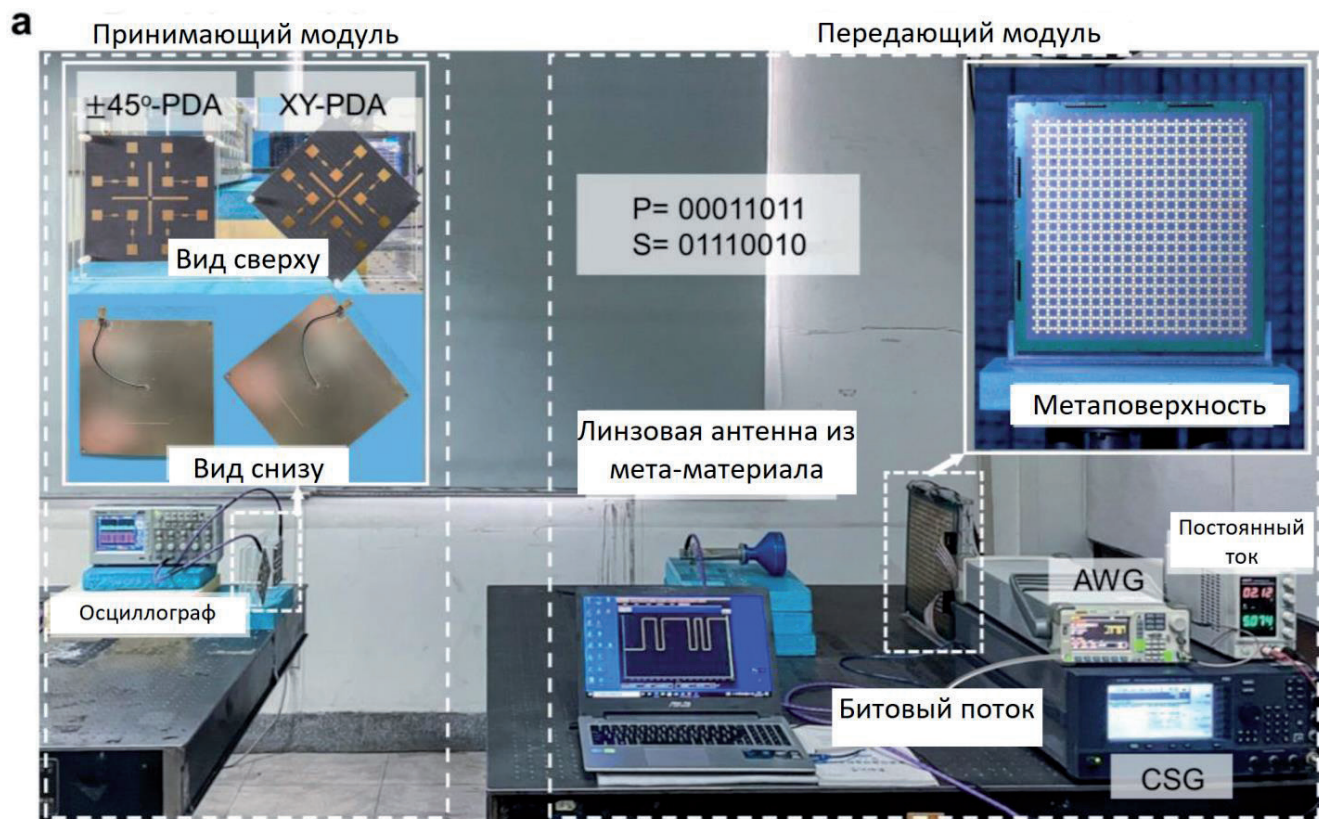
На Рис. 15d показаны требуемые распределения амплитуды и фазы x - и y -поляризованных волн относительно соответствующей кодирующей последовательности в каждом поляризационном канале в течение временного интервала T_0 – T_4 . Стоит отметить, что высота прямоугольного параллелепипеда представляет собой амплитуду электромагнитных волн, а оранжевый и черный цвета указывают на то, что их фазы равны θ и $\theta + \pi$ соответственно. Взяв в качестве примера канал с поляризацией 45° , амплитуда и фаза x - и y -поляризованных волн должны быть одинаковыми, чтобы обеспечить электромагнитную волну с поляризацией 45° , а затем амплитуда электромагнитной волны с поляризацией 45° дополнительно модулируется для изменения со временем, генерируя требуемую кодирующую последовательность 0010100001011011, как показано в периоде времени T_0 – T_1 на Рис. 15d. Кодирующие последовательности в других каналах

поляризации реализуются с использованием аналогичного метода, который также показан на Рис. 15d.

6.6. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ С РОМ-ШИФРОВАНИЕМ

Система беспроводной связи была создана на основе предложенной программируемой информационной МП РоМ для реализации вышеупомянутой схемы шифрования в сценарии внутри помещения, как показано на Рис. 16a [32]. Она состоит из передающего модуля и приемного модуля, в котором передающий модуль состоит из линзовой антенны из метаматериала, МП РоМ, генератора несущего сигнала (Keysight E8267D), анализатора спектра (Keysight N9040B), генератора сигналов произвольной формы (AWG) (Rigol DG5101) и стабилизированного источника питания постоянного тока, а приемный модуль состоит из осциллографа и пары поляризационных дискриминаторных антенн (PDA). В передающем модуле линзовая антенна из метаматериала размещается на расстоянии 35 см от МП для генерации падающей плоской волны с 45° -градусной поляризацией, которую можно рассматривать как несущую с рабочей частотой f_c ; стабилизированный источник питания AWG постоянного тока подключен к МП для подачи напряжения смещения на PIN-диоды. Стоит отметить, что два генератора сигналов произвольной формы потребовались для обеспечения регулируемых по строкам и столбцам регулируемых напряжений смещения для МП в реальном времени, соответственно, но, поскольку был только один генератор сигналов произвольной формы, в эксперименте вместо другого генератора сигналов произвольной формы используется стабилизированный источник питания постоянного тока. Изменяющееся во времени напряжение смещения подается на МП через AWG для реализации модуляции поляризации и амплитуды отраженной волны в реальном времени, чтобы получить желаемый поляризационный канал и соответствующую ему кодирующую последовательность.

В приемном модуле на расстоянии 160 см от МП РоМ размещается пара PDA для приема сигнала, которые подключаются к



±45°-КПК		XY-КПК	
	x- pol, $V_{mul} = 0$		x- pol, $V_{mul} < 0$
	y- pol, $V_{mul} = 0$		y- pol, $V_{mul} > 0$
	45°- pol, $V_{mul} < 0$		45°- pol, $V_{mul} = 0$
	-45°- pol, $V_{mul} > 0$		-45°- pol, $V_{mul} = 0$

Рис. 16. Экспериментальная установка системы беспроводной связи PoM [32]: а) Испытательный стенд системы, фотографии МП и фотографии вида сверху и снизу ±45°-PDA и XY-PDA, соответственно. б) Выходные напряжения двух PDA в разных состояниях линейной поляризации.

двухканальному осциллографу. Фотографии PDA отображаются в верхнем левом углу Рис. 16а, на котором два PDA размещены с относительным углом поворота 45°, названные как ±45°-PDA и XY-PDA соответственно. На задней панели PDA четыре диода Шоттки с нулевым смещением (SMS7621-040LF) загружены на целевое кольцо для реализации двойного балансного ВЧ-умножителя. Когда PDA принимают сигналы, состояние поляризации сигнала можно сначала определить по выходному напряжению двух PDA, как показано на Рис. 16б. В частности, если выходные напряжения ±45°-PDA и XY-PDA имеют

большое отрицательное (или положительное) значение и нуль соответственно, сигнал будет иметь поляризацию 45° (или -45°), а если выходные напряжения ±45°-PDA и XY-PDA равны нулю и большому отрицательному (или положительному) значению, соответственно сигнал будет иметь x- или y-поляризацию. Как только поляризационное состояние сигнала определено, соответствующая кодирующая последовательность "0" и "1" в каждом поляризационном канале может быть дополнительно получена с помощью выходных напряжений низкого и высокого уровня, обнаруженных осциллографом.

6.7. ОСОБЕННОСТИ ДЕКОДИРОВАНИЯ

На Рис. 17а показаны изменяющиеся во времени последовательности напряжения смещения AWG и стабилизированного источника питания постоянного тока в эксперименте по управлению МП PoM, в котором 0.63 В соответствует низкому отражению, а 0 и 0.84 В соответствуют высокому отражению, но их разность фаз составляет 180° . Временной интервал для каждого кода $T/M = 0.0625$ мс ($T = 4$ мс, $M = 64$), поэтому скорость передачи данных при передаче составляет 16 кГц, а максимальная скорость передачи данных в основном зависит от скорости модуляции AWG и скорости переключения PIN-диода. Следует отметить, что одно из напряжений смещения (V_x или V_y) остается

неизменным в каждом поляризованном канале, поскольку в эксперименте оно обеспечивается стабилизированным источником постоянного тока. На Рис. 17б показаны выходные напряжения $\pm 45^\circ$ -PDA и XY-PDA, измеренные осциллографом в четырех различных периодах времени. Поляризацию сигнала можно сначала идентифицировать по соотношению между выходными напряжениями $\pm 45^\circ$ -PDA и XY-PDA в соответствии с правилом, показанным на Рис. 16б. Таким образом, мы можем знать, что сигналы, показанные на Рис. 17б, имеют поляризацию 45° , x -, y - и -45° слева направо. Стоит отметить, что сигнал, принимаемый XY-PDA, намного больше нуля в каналах поляризации 45° ("00") и -45° ("11"), которые должны быть близки к нулю, как

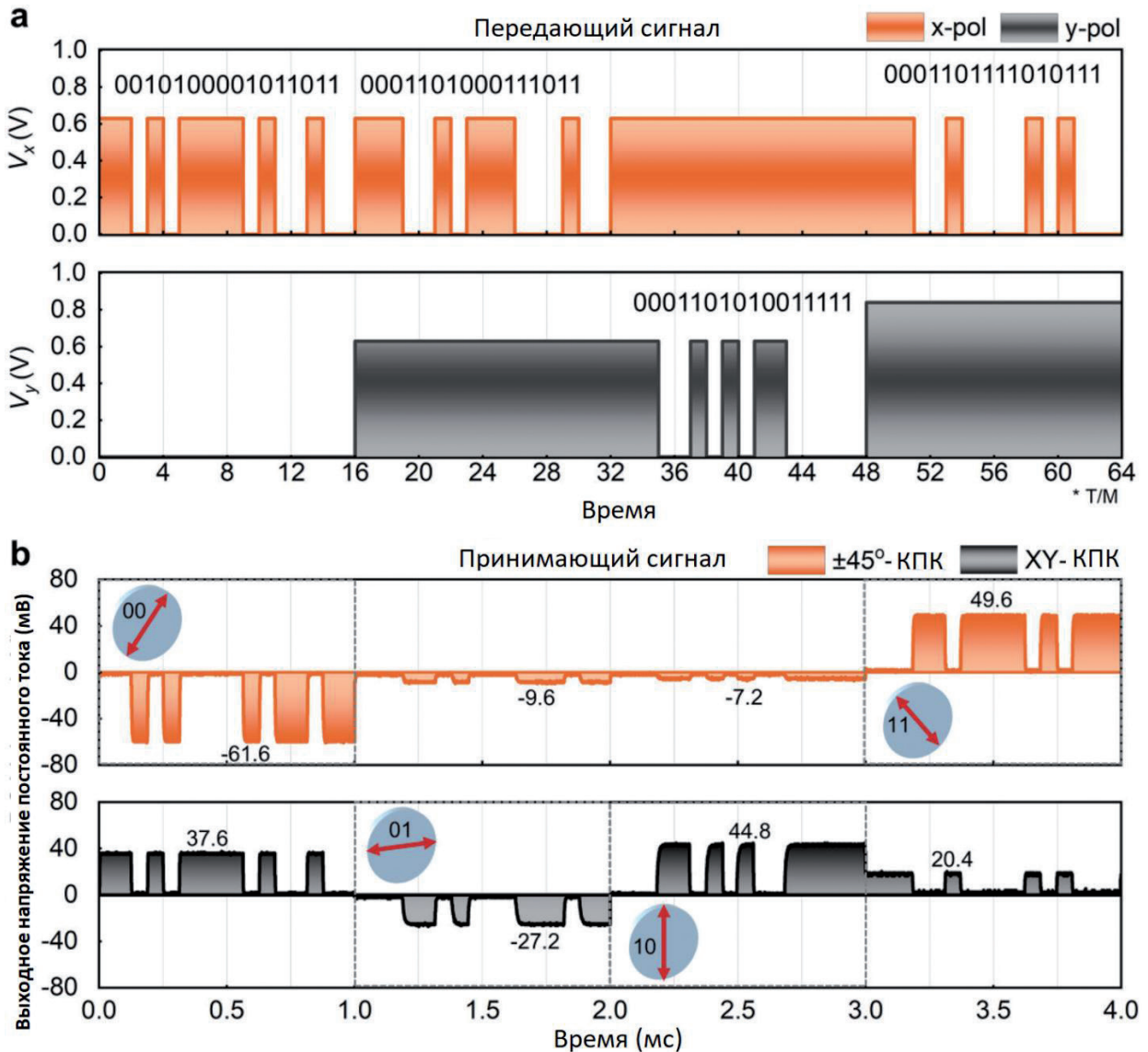


Рис. 17. Формы передающих и принимаемых сигналов [32]: а) Изменяющиеся во времени напряжения смещения модуля AWG для управления МП PoM. б) Измеренные выходные напряжения постоянного тока двух PDA под управлением AWG.

показано на Рис. 16*b*. Причина этого результата заключается в том, что напряжение смещения для управления u -поляризованной волной в этих двух случаях обеспечивается стабилизированным источником питания постоянного тока, который установлен на фиксированное напряжение 0 и 0.84 В, соответственно, поэтому компонента u -поляризации не может быть устранена. Эту проблему можно решить, используя другой генератор произвольной формы вместо стабилизированного источника питания постоянного тока. Зная каналы поляризации, в соответствии с протоколом шифрования, показанным на Рис. 15, мы можем извлечь N_1 , N_2 , N_3 и N_4 после кодов "00" в канале поляризации 45° , "01" в канале поляризации x , "10" в канале поляризации y и "11" в канале поляризации -45° , соответственно. Кроме того, мы можем определить, верны ли результаты извлечения, проверив, равны ли оставшиеся 8-битные двоичные числа во всех каналах $P = 00011011$. Затем S можно получить с помощью побитовой операции исключающего ИЛИ над N_1 , N_2 , N_3 и N_4 . Следовательно, согласно вышеуказанным правилам, потоки двоичного кодирования 0010100001011011, 0001101000111011, 0001101010011111 и 0001101111010111 в четырех различных поляризационных каналах могут быть сначала считаны из результатов измерений, показанных на Рис. 17*b*, соответственно, а затем $N_1 = 10100001$, $N_2 = 10100011$, $N_3 = 10100111$ и $N_4 = 11010111$ могут быть дополнительно извлечены для получения конечного $P = 00011011$ и $S = N_1 \oplus N_2 \oplus N_3 \oplus N_4 = 01110010$. Затем матрица метаключа может быть получена путем выполнения операции исключающего ИЛИ для P и S , как показано на Рис. 15*a*. Наконец, зашифрованный образ рыси можно восстановить с помощью метаключа.

Кроме того, в [32] дополнительно исследована отказоустойчивая производительность метаключа. Результаты показывают, что целевое изображение также можно приблизительно наблюдать, если в процессе приема $N_1 - N_4$ есть только одно- или двухбитовая ошибка, но разрешение изображения будет становиться все ниже и ниже по мере увеличения частоты битовых ошибок, и изображение становится полностью неузнаваемым, когда число кодов

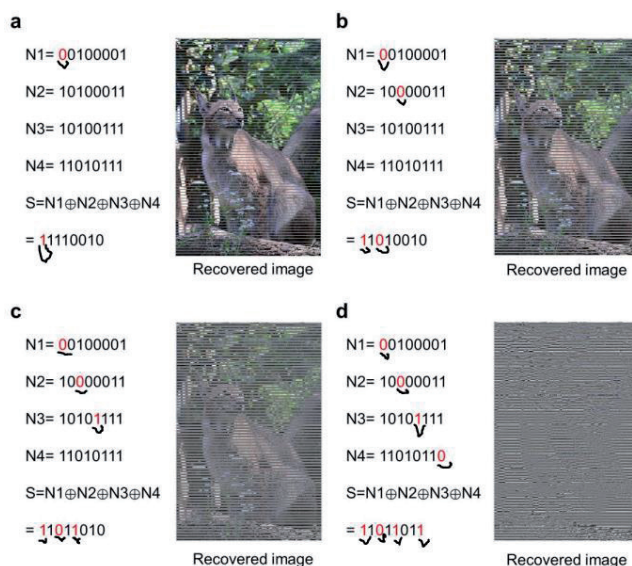


Рис. 18. Восстановленное изображение с неверным метаключом [32]: а) Однобитовая ошибка. б) Двухбитовая ошибка. в) Трехбитовая ошибка. г) Четырехбитовая ошибка.

ошибок достигает четырех – **Рис. 18**, где от руки выделены неправильные символы [32].

Таким образом, в [32] предложена программируемая информационная МП РоМ и показано ее применение для шифрования беспроводной связи с помощью метаключа. В этой схеме метаключ отправляется пользователю независимо в режиме реального времени, его можно динамически настраивать для различных сообщений для повышения безопасности. Система беспроводной связи, включающая передающий и принимающий модули, была также построена для демонстрации осуществимости схемы шифрования. Этот подход предлагает недорогое решение для реализации беспроводной сети связи с шифрованием РоМ, которая не нуждается в антенных решетках, фильтрах и смесителях. В работе [32] представлена новая концепция передачи информации на основе программируемой МП, которая может найти большой потенциал в следующем поколении шифрования информации.

7. ОПТИЧЕСКОЕ ШИФРОВАНИЕ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЧАСТОТАХ С ПОМОЩЬЮ МП

7.1. Вводная часть

В Разделе 4 данной работы уже шел разговор об оптическом шифровании информации

с использованием МП. Здесь можно только заметить, что для большинства методов шифрования, основанных на МП, информация шифруется в МП физических форм, что ограничивает обмен информацией и совместимость с технологией цифровой обработки информации. Однако, как пространство Фурье, так и реальное пространство могут одновременно использоваться в качестве каналов шифрования.

В работе [34] предложена и экспериментально продемонстрирована альтернативная схема оптического шифрования с МП, работающими как аналоговые оптические информационные процессоры для оптических изображений. Таким образом, информация может быть удобно передана, расшифрована и обработана с помощью изображений программным способом, в отличие от аппаратных МП. Это достигается путем модуляции пространственных частот оптических изображений МП. В [34] подтверждено, что как интенсивность, так и фаза пространственной частоты светового поля могут модулироваться МП для кодирования информации. Затем информация может быть получена путем проведения преобразования Фурье для зашифрованных изображений. Кроме того, было показано, что пространственные частоты оптических изображений могут обеспечить достаточные каналы для увеличения информационной емкости. Поскольку информация может быть просто и непосредственно привязана к МП, предлагаемая схема также может избежать тщательного проектирования МП с помощью сложного алгоритма в традиционной метаповерхностной голограмме. Самое главное, поскольку информация шифруется в изображениях, отличных от МП, обмен информацией является более гибким, даже совместимым с современными технологиями обработки информации. Поэтому предлагаемый способ может предложить еще одну перспективную платформу для оптического шифрования с МП.

7.2. РАБОЧИЕ ПРИНЦИПЫ

Как показано на **Рис. 19a** [34], рассматривая случай, когда объект освещается когерентным лазерным лучом, результирующая картина двумерного светового поля в виде оптического

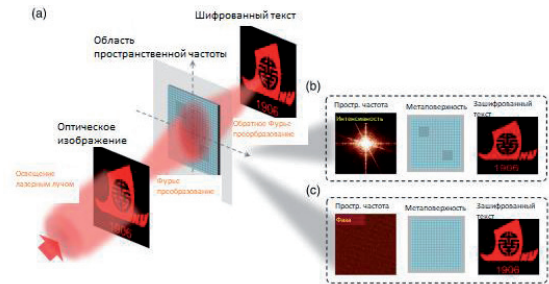


Рис. 19. Концепция пространственно-частотного шифрования [34]: (a) Схема процесса оптического шифрования. Оптическое изображение как носитель информации получается при лазерном освещении, и доступ к его пространственно-частотной области можно получить после преобразования Фурье. Информация, подлежащая шифрованию, загружается в пространственно-частотную область с помощью МП, а изображение зашифрованного текста получается с помощью обратного преобразования Фурье. (b) Шифрование интенсивностью для пространственной частоты. Различные компоненты пространственной частоты могут быть изменены путем настройки передачи различных субдоменов (светлых и темных цветов) МП. Выходной зашифрованный текст подобен входному оптическому изображению с небольшим отличием. (c) Фазовое шифрование для пространственной частоты. Информация шифруется путем введения разностей фаз в пространственную частоту с помощью МП.

изображения может быть выражена с помощью его поля $\tilde{E}(x, y)$.

Интуитивно, информация может быть зашифрована непосредственно на изображении, но ее можно легко расшифровать. Для повышения безопасности зашифруем информацию в пространственно-частотной области изображений, отличной от области реального изображения. Этого можно достичь, применяя операцию преобразования Фурье к входному оптическому изображению, затем шифруя информацию с помощью МП и, наконец, получая зашифрованное оптическое изображение обратным преобразованием Фурье. Этот процесс можно кратко выразить как:

$$\tilde{E}_{out}(x, y) = F^{-1}\{\tilde{h}(u, v) \cdot F[\tilde{E}_{in}(x, y)]\}, \quad (1)$$

где \tilde{E}_{out} – электрическое поле зашифрованного оптического изображения, F и F^{-1} – операторы прямого и обратного Фурье-преобразования, $\tilde{h}(u, v)$ – оптическая передаточная функция (OTF), построенная МП в области пространственных частот.

Информация, подлежащая шифрованию, может быть непосредственно представлена МП в виде ОТГ, а затем передана при модуляции пространственных частот оптического изображения. Таким образом, почти невозможно получить информацию, наблюдая только изображение зашифрованного текста. Напротив, только путем правильного анализа измененной пространственной частоты изображения можно получить информацию. Следует отметить, что световая природа пространственных частот оптических изображений обеспечивает различные каналы шифрования, которые могут быть удобно адаптированы МП, поддерживающими различные ОТГ $\tilde{h}(u, v)$. Например, комплексная функция, построенная МП $\tilde{h}(u, v)$, обеспечивает две модулирующие степени свободы, а именно, интенсивность и фазу для шифрования, как схематично показано на Рис. 19b и 19c. Модуляция интенсивности проста и удобна $\tilde{h}(u, v)$, фазовая модуляция $\tilde{h}(u, v)$ может повысить безопасность. Следует также отметить, что $\tilde{h}(u, v)$ является функцией пространственной частоты и, следовательно, предоставляет еще один канал шифрования, в котором различные пространственные частоты могут быть настроены отдельно с помощью МП, увеличивая информационную емкость.

7.3. ШИФРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СИГНАЛА В ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ

На практике интенсивность сигнала пространственной частоты можно модулировать, управляя пропусканием МП. С этой целью в [34] спроектировали и изготовили кремниевую МП с разным пропусканием в разных областях, которые обозначены как MS 1 и MS 2 на Рис. 20a. Пропускание можно регулировать, просто изменяя периоды и радиусы кремниевых наностолбиков на кремнеземной подложке.

Изображения изготовленной МП, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), представлены на Рис. 20b. Область MS 1 содержит 200×200 единиц размером около 75×75 мкм, а область MS 2 включает 50×50 единиц размером около 15×15 мкм. На Рис. 20c видно, что при заданной длине волны 633 нм можно получить большой контраст пропускания между различными

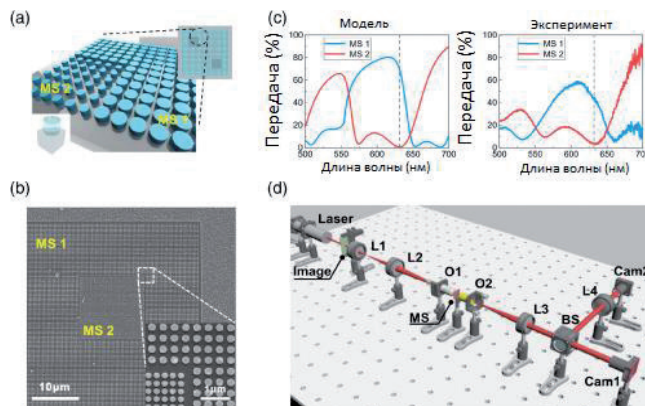


Рис. 20. МП для шифрования интенсивности и экспериментальная установка для шифрования [34]: (a) Схема МП с разным пропусканием в разных областях для MS 1 и MS 2. (b) SEM-изображение, показывающее часть изготовленной МП. (c) Смоделированные и экспериментальные спектры пропускания различных областей МП. Серая пунктирная линия указывает на целевую длину волны 633 нм. (d) Экспериментальная установка для реализации предлагаемого оптического шифрования. Здесь L1 - L4 - линзы; O1 и O2 - объективы; MS – метаповерхность МП; BS - светоделитель; Cam1 и Cam2 - фотоаппараты.

областями. Это означает, что МП может соответствующим образом модулировать интенсивности пространственных частот в отдельных областях, когда она помещена в область пространственных частот оптического изображения. Следовательно, информация может быть зашифрована в оптический образ с помощью МП. Например, информация о нулевом состоянии или квадратном шаблоне может быть представлена путем стирания пространственной частоты в области более низкой передачи. Для шифрования информации нами была разработана микроскопическая экспериментальная установка Фурье-оптики, как показано на Рис. 20d. С помощью этой настройки мы можем проецировать спектр пространственных частот оптического изображения на МП и захватывать как модулированную интенсивность пространственной частоты, так и выходное зашифрованное изображение, проверяя предложенный метод шифрования.

Результаты шифрования по интенсивности представлены на Рис. 21 [34]. В качестве изображения носителя информации выбираем логотип Jinan University, который показан на Рис. 21a [10,34]. Численно мы можем получить

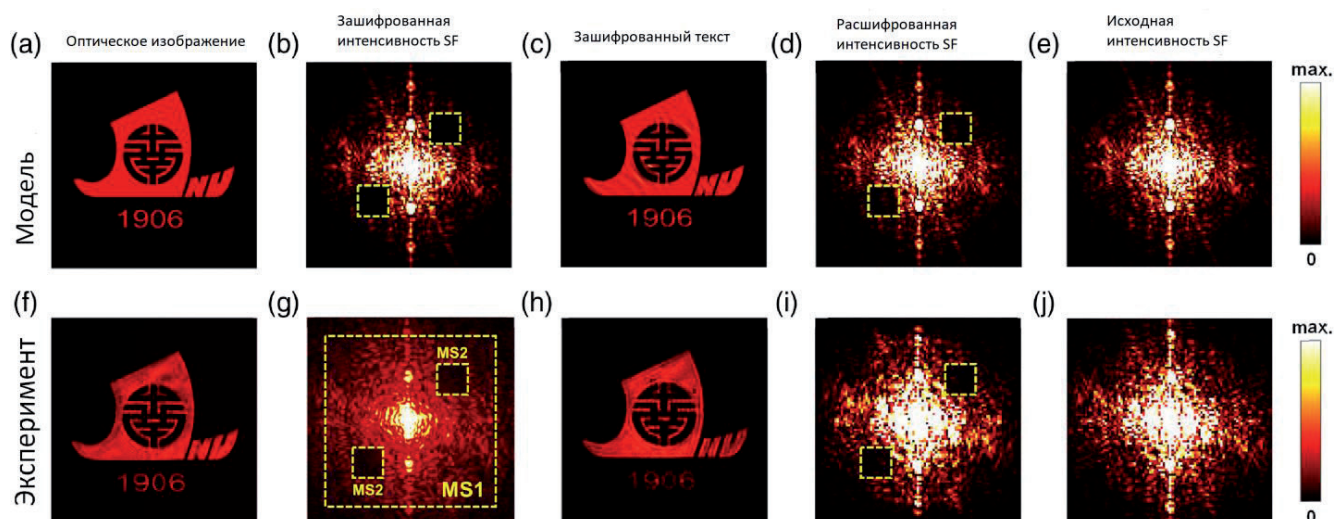


Рис. 21. Результаты моделирования и эксперимента по шифрованию и дешифрованию интенсивности пространственной частоты оптического изображения [34]: (а) Оптическое изображение как носитель информации. (б) Распределение интенсивности пространственной частоты после шифрования. Два желтых пунктирных прямоугольника обозначают зашифрованные области. (с) Выходное изображение зашифрованного текста после шифрования. (d) Распределение интенсивности пространственной частоты после расшифровки. Желтые пунктирные линии служат ориентиром для обозначения зашифрованных областей. (е) Распределение интенсивности пространственной частоты до расшифровки. (f)-(j) Соответствующие экспериментальные результаты.

картину интенсивности его пространственной частоты с помощью преобразования Фурье. Информация может быть зашифрована по пространственной частоте путем намеренной установки значения равным нулю в некоторых пространственных областях, как показано двумя желтыми пунктирными линиями на Рис. 21b. После этого мы можем получить изображение зашифрованного текста, представленное на Рис. 21c обратным преобразованием Фурье.

Хотя мы искусственно изменили пространственную частоту, зашифрованное изображение по-прежнему похоже на исходное, за исключением того, что появилась некоторая рябь. Найти зашифрованную информацию непосредственно из изображения затруднительно, если только не применить к нему преобразование Фурье, как в процессе расшифровки, результат которого показан на Рис. 21d. Для простоты сравнения мы представляем картину интенсивности пространственной частоты перед шифрованием на Рис. 21e. Две зашифрованные области легко идентифицировать, сравнивая шаблоны до и после шифрования, что указывает на осуществимость метода.

Для демонстрации предлагаемого метода оптического шифрования были проведены

соответствующие эксперименты. Входное оптическое изображение, представленное на Рис. 21f, получено путем освещения лазерным лучом вытравленного рисунка на золотой пленке. Пространственная частота изображения может быть сгенерирована с помощью линзы, выполняющей преобразование Фурье, а затем спроецирована на МП. Поскольку коэффициенты пропускания различны в разных областях МП, пространственная частота модулируется соответствующим образом, как показано на Рис. 21g. Большая часть света может пройти через область высокого пропускания MS 1, в то время как области низкого пропускания MS 2 будут заблокированы. Следовательно, информация может быть успешно зашифрована в пространственной частоте. Используя другую линзу для обратного преобразования Фурье, мы можем получить зашифрованное изображение, показанное на Рис. 21h. Зашифрованную информацию трудно найти непосредственно из зашифрованного изображения. Важно отметить, что зашифрованное изображение и зашифрованная информация могут быть гибко доставлены без аппаратного метаповерхностного носителя. Как только зашифрованное изображение будет получено, информацию можно расшифровать с помощью численного

преобразования Фурье на компьютере – Рис. 21*i*. Также показан экспериментальный результат картины интенсивности перед шифрованием на Рис. 21*j* для сравнения. Следует отметить, что расположение и площадь областей MS 2 строго не ограничены и могут быть изменены в соответствии с практическими потребностями.

7.4. ФАЗОВОЕ ШИФРОВАНИЕ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЧАСТОТЕ

На практике безопасность шифрования интенсивности недостаточно высока, потому что информацию можно напрямую расшифровать, применив преобразование Фурье, и тогда паттерн интенсивности легко идентифицировать. Напротив, фазовый паттерн пространственной частоты обычно имеет случайное распределение, и исходный фазовый паттерн перед шифрованием необходим в качестве ключа для дешифрования, что является многообещающей степенью свободы для шифрования с более высокой безопасностью по сравнению с шифрованием интенсивности. В [34] показано, что метод шифрования, рассмотренный выше

для интенсивности, также может применяться для фазы пространственной частоты, за исключением того, что в качестве альтернативы используется фазовая МП. Спроектированная фазовая МП схематично показана на Рис. 22*a*, которая состоит из идентичных кремниевых наностолбиков на кремнеземной подложке. Периоды и радиусы наностолбиков отличаются от таковых в МП, используемых при шифровании интенсивности. Фазовая МП также покрыта толстым слоем полиметилметакрилата (ПММА). Вся МП содержит 200×200 единиц размером около 75×75 мкм. На Рис. 22*b* показаны как смоделированные, так и экспериментальные спектры пропускания МП. Пропускание на длине волны 633 нм относительно высокое, что обеспечивает минимально возможное изменение интенсивности. Важно отметить, что разность фаз вводится МП относительно окружающей среды. Для проведения экспериментов с фазовым шифрованием использовали ту же экспериментальную установку, что и для шифрования интенсивности, за исключением замены МП. После шифрования входного оптического изображения фазовой МП мы захватили зашифрованное оптическое изображение, а затем численно применили к нему операцию преобразования Фурье. Таким образом, мы можем получить как интенсивность, так и фазовое распределение пространственной частоты для расшифровки.

Последующие результаты шифрования показаны на Рис. 22*c* и 22*d*. Выходное зашифрованное изображение и его распределение интенсивности по пространственной частоте после шифрования аналогичны входному оптическому изображению и распределению интенсивности перед шифрованием. Это означает, что зашифрованную информацию трудно идентифицировать напрямую или путем применения преобразования Фурье с последующим наблюдением паттерна интенсивности, в отличие от случая шифрования интенсивности. Кроме того, также трудно найти зашифрованную информацию путем изучения фазового распределения пространственной частоты из-за его случайности, как показано на Рис. 22*d*. Чтобы расшифровать скрытую

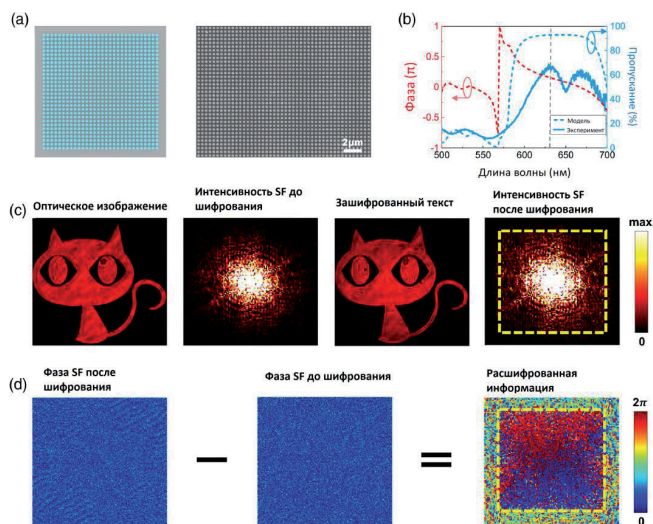


Рис. 22. Фазовая МП и экспериментальные результаты фазового шифрования и дешифрования [34]: (a) Схема и SEM-изображение фазовой МП. (b) Модельный (штриховая синяя линия) и экспериментальный (сплошная синяя линия) спектры пропускания, а также модельный фазовый спектр (штриховая красная линия) фазовой МП. (c) Оптические изображения и соответствующие распределения интенсивности пространственной частоты до и после шифрования. Желтая пунктирная рамка указывает на зашифрованную область. (d) Фазовое распределение пространственной частоты до и после шифрования. Расшифровка заключается в извлечении разности фаз между ними.

информацию, необходимо извлечь разность фаз между пространственными частотами до и после шифрования, поскольку МП вносит в основном разность фаз. Следовательно, без ключа исходного изображения расшифровка является огромной проблемой, что повышает безопасность по сравнению со случаем шифрования интенсивности.

7.5. ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕМКОСТИ ШИФРОВАНИЯ

Увеличение количества информационных каналов является важной темой изучения

оптического шифрования. В предлагаемом методе даже отдельное изображение может обеспечить множество каналов из-за обилия пространственных частот. В принципе, каждая пространственная частота может действовать как один канал, но это обычно ограничено полученным диапазоном пространственных частот и другими практическими условиями. Тем не менее, в [34] доказано, что определенный диапазон пространственных частот может использоваться как один информационный канал. На Рис. 23 показано одно из правил шифрования и соответствующие

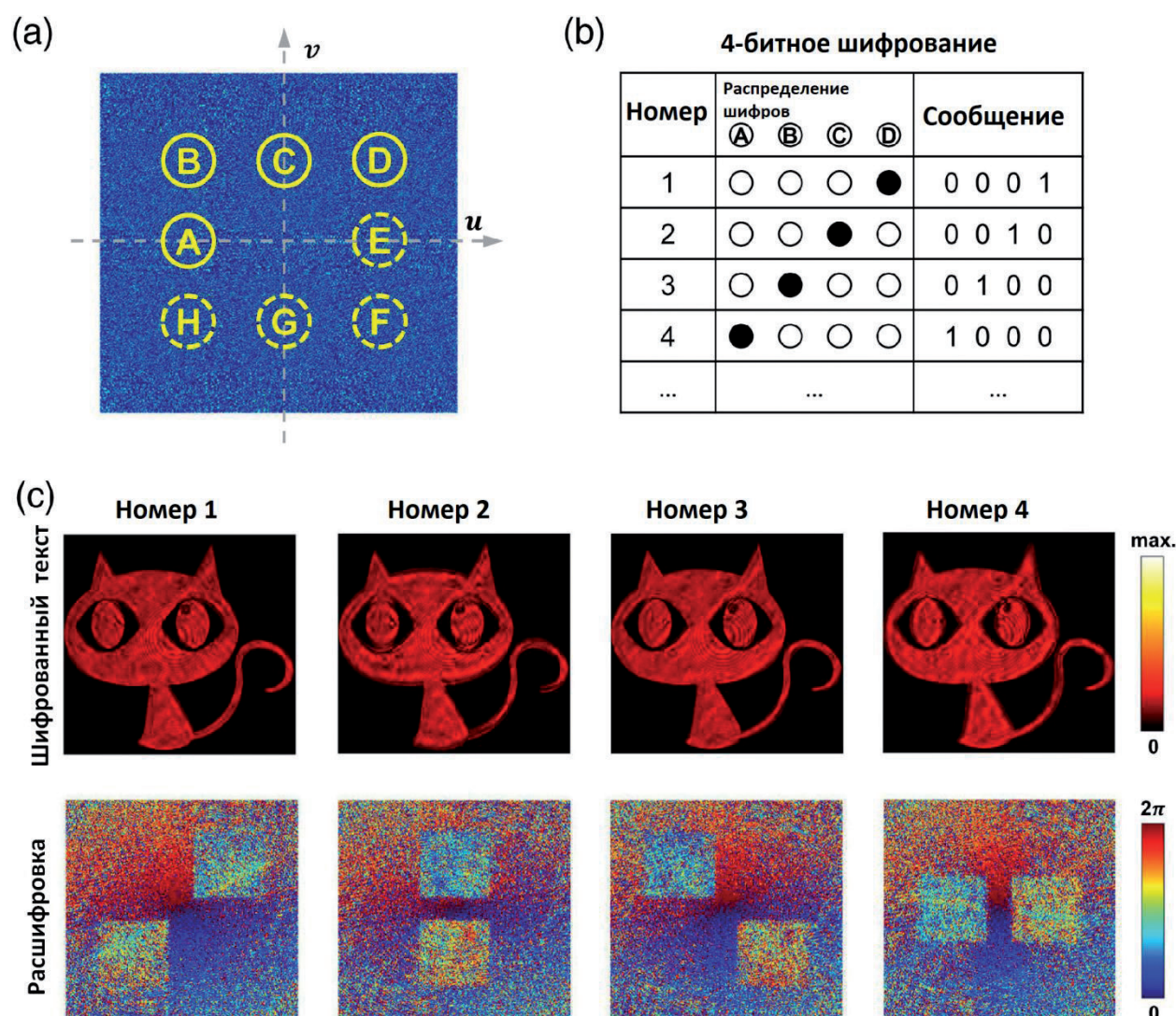


Рис. 23. Иллюстрация шифрования с пространственно-частотным мультиплексированием и экспериментальные результаты 4-битного шифрования [34]: (a) Области (желтые кружки) пространственной частоты для мультиплексирования. (b) 4-битный метод шифрования. Конкретные сообщения могут быть представлены в соответствии с таблицей кодов. Для кодовой диаграммы полный кружок указывает на активацию фазового шифрования, а пустой означает отсутствие изменения пространственной частоты. (c) Экспериментальные результаты изображения зашифрованного текста и соответствующие расшифрованные результаты для четырех сообщений.

экспериментальные результаты, основанные на продемонстрированном выше фазовом шифровании [34]. В пространственно-частотной области изображения конкретная область может действовать как канал, как показано желтыми кружками и заглавными буквами от A до H на Рис. 23а. На самом деле можно использовать и другие регионы. Мы выбираем четыре из этих областей, а именно от A до D , чтобы реализовать 4-битное шифрование, которое описано на Рис. 23б.

Например, если регион D имеет фазовую модуляцию, а другие нет, зашифрованное сообщение будет "0001". Точно так же другие сообщения, такие как "1000", "0100" и "0010", могут быть зашифрованы разными регионами, а также могут быть созданы дополнительные комбинации. Результаты эксперимента показаны на Рис. 23с [34]. Можно обнаружить, что четыре изображения зашифрованного текста похожи, и трудно различить, какое сообщение было зашифровано. Даже наблюдая за интенсивностью и фазой пространственной частоты, сообщение также невозможно идентифицировать. Однако сообщение можно получить, извлекая разность фаз и затем обращаясь к кодовой таблице. Следует отметить, что прямоугольные области на расшифрованной картине разности фаз, показанной на Рис. 23с, соответствуют всей площади МП. Шаблон также будет представлять сопряженные прямоугольные формы относительно зашифрованной области в результате операции преобразования Фурье, примененной к зашифрованному изображению. Мы выбрали несколько областей более низких пространственных частот вокруг центра пространственно-частотной области для демонстрации предлагаемого метода оптического шифрования. Тем не менее, более высокие пространственные частоты также могут использоваться для увеличения информационной емкости.

7.6. ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ШИФРОВАНИЯ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЧАСТОТАХ

В большинстве методов оптического шифрования с МП информация шифруется в аппаратных устройствах метаповерхностей, что, с одной стороны, усиливает безопасность, а с другой, ограничивает доставку и обработку

информации. Напротив, здесь информация зашифрована в оптических изображениях программным способом через МП, а не зашифрована в самих МП. Это позволяет избежать физической доставки МП, тем самым облегчая транспортировку и обмен информацией. В то время как безопасность в традиционных методах шифрования, в которых информация может быть эффективно скрыта в МП, становится все выше и выше, безопасность в предлагаемом методе также может быть обеспечена за счет использования сложных распределений пространственных частот и использования исходных оптических изображений в качестве ключей. Поскольку для шифрования важны как безопасность, так и пропускная способность, мультиплексирование различных каналов шифрования и использование гибких правил кодирования является многообещающей стратегией для увеличения пропускной способности предлагаемого метода. Поскольку МП напрямую модулируют пространственные частоты оптических изображений, можно дополнительно изучить другие степени свободы адаптации для световых полей и возможность параллельной обработки для повышения безопасности и возможностей шифрования информации. Кроме того, процесс расшифровки предлагаемого метода подходит для практических приложений, поскольку он устойчив к ухудшению качества изображения зашифрованного текста, даже когда зашифрованное изображение искажается на практике. Кроме того, анализ безопасности показывает, что зашифрованная информация не может быть правильно извлечена, если в качестве ключей используются неправильные изображения, что гарантирует безопасность предлагаемого метода (см. Приложение 1, раздел 8 в [34]). МП работают как аналоговые оптические процессоры в предлагаемом методе, который может способствовать сверхбыстрому шифрованию информации с низким энергопотреблением и высокой пропускной способностью, являясь хорошим дополнением к цифровому аналогу.

Таким образом, в [34] предложен и экспериментально продемонстрирован метод оптического шифрования, использующий пространственные частоты паттернов светового

поля. Интенсивность и фазовые распределения пространственных частот были зашифрованы МП для оптических изображений. Результаты показывают, что изображение зашифрованного текста практически совпадает с исходным и никакая информация не может быть идентифицирована напрямую, в то время как дешифрование возможно проводить с помощью преобразования Фурье и дальнейших операций. Кроме того, показано, что избытие пространственных частот оптических изображений обеспечивает многообещающую платформу для гибких правил кодирования, увеличивая количество информационных каналов, а затем и возможности шифрования. Данный метод может проложить путь для разработки новых методов шифрования информации, облегчая исследования в области хранения, передачи, отображения информации и т.д.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время метаоптика реализовала множество оптических приложений, которые могут управлять фазой, частотой, поляризацией, амплитудой и направлением распространения света. Но всегда ли нам нужны объемные 3D-метаматериалы для достижения полезной функциональности? Нет. Сила взаимодействия электромагнитных волн с одиночным субволновым слоем резонаторов может быть большой и достаточной для управления лучом, его фокусированием и подобных приложений с одним слоем метаматериала или МП. Сложность изготовления объемных метаматериалов на самом деле привела эту область к плодотворной деятельности, и желательность ультратонких оптических компонентов, часто называемых плоской оптикой, неоспорима.

Микроскопическая обработка изображений, квантовая обработка изображений, голографическая обработка изображений и полностью оптический сверточный чип обсуждаются в [18]. Метаоптика на основе ИИ демонстрирует возможности самоконтроля.

По сравнению с вычислениями с электронами в качестве среды, фотонные вычисления, естественно, имеют преимущества высокой размерности передачи информации и сильной

возможности параллельной передачи. Хотя цифровые технологии относительно зрелые, их энергопотребление велико, а скорость медленная. Полностью оптические вычисления являются альтернативной схемой. Ранние исследования объемных метаматериалов и экзотических свойств были вытеснены работой над тонкими метаповерхностями, созревшими для коммерциализации, как указано в выпуске "Метаповерхности становятся мейнстримом" 2023 г. [8].

Технология ИИ, применяемая в метаоптике, поможет конструировать сложные оптические конструкции и быстро получать оптимальное решение проблемы для удовлетворения потребностей новых функций. В настоящее время объем обработки данных резко увеличивается, и фотоны, несущие многомерную информацию, могут эффективно расширять пропускную способность информационных операций. Искусственный интеллект и метаповерхностная оптика в синергии помогут исследованиям и разработкам передовых оптических чипов [1], что будет способствовать внедрению следующего поколения оптических устройств и систем, и выведет человеческую цивилизацию на более высокий уровень в будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chen Mu Ku, Liu Xiaoyuan, Sun Yanni, and Tsai Din Ping. Artificial Intelligence in Meta-optics. *Chemical Reviews*, 2022, 122(19):15356-15413.
2. Su Vin-Cent, Chu Cheng Hung, Sun Greg, and Tsai Din Ping. Advances in optical metasurfaces: fabrication and applications. *Opt. Express*, 2018, 26(10):13148-13182.
3. Qiu Cheng-Wei, Zhang Tan, Hu Guangwei, and Kivshar Yuri. Quo Vadis, Metasurfaces? *Nano Letters*, 2021, 21(13):5461-5474.
4. Liu W, Li Z, Cheng H, Chen S. Dielectric Resonance-Based Optical Metasurfaces: From Fundamentals to Applications. *iScience*, 2020, 23(12). Article No. 101868.
5. Chen Mu Ku, Leng Borui, Fan Yubin, Yao Jin, Liang Yao, Zhang Jingcheng, Liu Xiaoyuan, Sun Linshan, and Tsai Din Ping. High dimensional optical meta-devices: classical to quantum. *Proc. SPIE*, 2022, 12231. ODS 2022: Industrial Optical Devices and Systems, Article No. 1223101.

6. Abdelraouf Omar AM, Wang Ziyu, Liu Hailong, Dong Zhaogang, Wang Qian, Ye Ming, Wang Xiao Renshaw, Wang Qi Jie, Liu Hong. Recent Advances in Tunable Metasurfaces: Materials, Design, and Applications. *ACS Nano*, 2022, 16(9):13339-13369.
7. Padilla WJ, Averitt RD. Imaging with metamaterials. *Nature Reviews Phys.*, 2022, 4(2):85-100.
8. Editorials. Metasurfaces go mainstream. *Nature Photonics*. 2023, 17(1):1. DOI: 10.1038/s41566-022-01137-1.
9. Потапов АА. Вычислительные диэлектрические метаповерхности в фотонных топологических устройствах обработки многомерных сигналов. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2024, 16(1):11-30. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.011.
10. Wan Lei, Pan Danping, Yang Shuaifeng, Zhang Wei, Potapov Alexander A., Wu Xia, Liu Weiping, Feng Tianhua, and Li Zhaohui. Optical analog computing of spatial differentiation and edge detection with dielectric metasurfaces. *Optics Letters*, 2020, 45(7):2070-2073.
11. Pan Danping, Wan Lei, Potapov Alexander A., and Feng Tianhua. Performing Spatial Differentiation and Edge Detection with Dielectric metasurfaces. *QELS_Fundamental Science "OSA Technical Digest Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. Washington: Optical Society of America, 2020. Paper FW4B.2.pdf, 2 pp. (From the session "Inverse Design and Computation (FW4B)").
12. Feng Tianhua, Potapov Alexander A., Liang Zixian, and Xu Yi. Huygens Metasurfaces Based on Congener Dipole Excitations. *Physical Review Applied.*, 2020, 13, 6 p. Article No. 021002.
13. Tianhua Feng, Shuaifeng Yang, Ning Lai, Weilian Chen, Danping Pan, Wei Zhang, Potapov Alexander A., Zixian Liang, and Yi Xu. Manipulating light scattering by nanoparticles with magnetoelectric coupling. *Phys. Rev. B.*, 2020, 102, 7p. Article No. 205428.
14. Wan Lei, Pan Danping, Ouyang Min, Zhang Wei, Potapov Alexander A., Liu Weiping, Liang Zixian, Feng Tianhua, Li Zhaohui. Laplace metasurfaces for optical analog computing based on quasi-bound states in the continuum. *Photonics Research*, 2021, 9(9):1758-1766.
15. Wan Lei, Pan Danping, Feng Tianhua, Liu Weiping, Potapov A.A. A review of dielectric optical metasurfaces for spatial differentiation and edge detection. *Frontiers of Optoelectronics*, 2021, 14(2):187-200.
16. Shuaifeng Yang, Lei Wan, Fugen Wang, Alexander A. Potapov, and Tianhua Feng. Strong optomechanical coupling in chain-like waveguides of silicon nanoparticles with quasi-bound states in the continuum. *Opt. Lett.*, 2021, 46(18):4466-4469.
17. Wang Fugen, Yuan Jin, Yang Shuaifeng, Potapov Alexander A., Zhang Xin, Liang Zixian, and Feng Tianhua. Compact ring resonators of silicon nanorods for strong optomechanical interaction. *Nanoscale*, 2023, 15(7), doi: 10.1039/D2NR06449A.
18. Xu Dingyu, Wen Shuangchun, and Luo Hailu. Metasurface-Based Optical Analog Computing: From Fundamentals to Applications. *Advanced Devices & Instrumentation*, 2022, Vol.2022. Article No. 0002;- doi: 10.34133/adi.0002.
19. Hail Claudio U, Foley Morgan, Sokhoyan Ruzan, Michaeli Lior, Atwater Harry A. High quality factor metasurfaces for two-dimensional wavefront manipulation. <https://arxiv.org/abs/2212.05647> (12 декабря 2022). 19 p.
20. Li Lianlin, Zhao Hanting, Liu Che, Li Long, and Cui Tie Jun. Intelligent metasurfaces: control, communication and computing. *eLight*, 2022, 2(7); doi: 10.1186/s43593-022-00013-3.
21. Zhao Xiaoguang, Sun Zhenci, Zhang Lingyun, Wang Zilun, Xie Rongbo, Zhao Jiahao, You Rui, and You Zheng. Review on Metasurfaces: An Alternative Approach to Advanced Devices and Instruments. *Advanced Devices & Instrumentation*, 2022, vol. 2022. Article No. 9765089; doi: 10.34133/2022/9765089.
22. Badloe T, Lee S, Rho J. Computation at the speed of light: metamaterials for all-optical calculations and neural networks. *Advanced Photonics*, 2022, 4(6), 21 p. Article No. 064002; doi: 10.1117/1.AP.4.6.064002.
23. Saifullah Yasir, He Yejun, Boag Amir, Yang Guo-Min, and Xu Feng. Recent Progress in Reconfigurable and Intelligent Metasurfaces: A Comprehensive Review of Tuning Mechanisms, Hardware Designs, and Applications. *Advanced Science*, 2022, 9(33), 35 p. Article No. 2203747.

24. Johnson William B, Lindenstrauss Joram. Extensions of Lipschitz mappings into a Hilbert space. *Proc. Conf. in Modern Analysis and Probability* (New Haven, Conn., June 8-11, 1982), P. 189-206, Contemporary Mathematics, V. 26, Amer. Math. Soc., Providence, RI, 1984.
25. Li Lianlin, Ruan Hengxin, Liu Che, Li Ying, Shuang Ya, Alù Andrea, Qiu Cheng-Wei, and Cui Tie Jun. Machine-learning reprogrammable metasurface imager. *Nature Communications*, 2019, 10. Article No.1082.
26. Zheng Peixia, Dai Qi, Li Zile, Ye Zhiyuan, Xiong Jun, Liu Hong-Chao, Zheng Guoxing, Zhang Shuang. Metasurface-based key for computational imaging encryption. *Science Advances*, 2021, 7(21). DOI: 10.1126/sciadv.abg0363.
27. Xiao Qiang, Ma Qian, Yan Tao, Wu Liang Wei, Liu Che, Wang Zheng Xing, Wan Xiang, Cheng Qiang, Cui Tie Jun. Orbital-Angular-Momentum-Encrypted Holography Based on Coding Information Metasurface. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(11), doi: 10.1002/adom.202002155.
28. Wu Liang Wei, Xiao Qiang, Gou Yue, Wu Rui Yuan, Xu Peng, Qing Ye Ming, Wang Zheng Xing, Bao Lei, Ma Hui Feng, Cui Tie Jun. Electromagnetic Diffusion and Encryption Holography Integration Based on Reflection-Transmission Reconfigurable Digital Coding Metasurface. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(10), doi: 10.1002/adom.202102657.
29. Xuqian Jiang, Ye Fujun, Tan Hongrui, Luo Sisi, Cui Haoyang, and Chen Lei. Digital Programmable Metasurface with Element-Independent Visible-Light Sensing. *Electronics*, 2023, 12(1). 9 p., doi: 10.3390/electronics12010241.
30. Cui Tie Jun, Qi Mei Qing, Wan Xiang, Zhao Jie, Cheng Qiang. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(e218), 9 p. doi: 10.1038/lssa.2014.99.
31. Ma Qian, Gao Wei, Xiao, Qiang, Ding Lingsong, Gao Tianyi, Zhou Yajun, Gao Xinxin, Yan Tao, Liu Che, Gu Ze, Kong Xianghong, Abbasi Qammer H., Li Lianlin, Qiu Cheng-Wei, Li Yuanqing, and Cui Tie Jun. Directly wireless communication of human minds via non-invasive brain-computer-metasurface platform. *eLight*, 2022, 2(1). doi: 10.1186/s43593-022-00019-x.
32. Wang Hai Lin, Ma Hui Feng, Cui Tie Jun. A Polarization-Modulated Information Metasurface for Encryption Wireless Communications. *Advanced Science*, 2022, 9(34). 9 p., doi: 10.1002/advs.202204333.
33. Wang Hai Lin, Zhang Yan Kai, Zhang Tai Yi, Ma Hui Feng, and Cui Tie Jun. Broadband and Programmable Amplitude-Phase-Joint-Coding Information Metasurface. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(25):29431-29440.
34. Ouyang Min, Yu Haoyang, Pan Danping, Wan Lei, Zhang Cheng, Gao Shecheng, Feng Tianhua, and Li Zhaohui. Optical encryption in spatial frequencies of light fields with metasurfaces. *Optica*, 2022, 9(9):1022-1028.

ПОТАПОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ
д.ф.-м.н.
 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
Москва 125009, Россия
E-mail: potapov@cplire.ru.