**29. Lưu trữ dữ liệu kỹ thuật số trong hệ thống bộ nhớ ba chiều được mã hóa theo pha: chất lượng và bảo mật dữ liệu**

                                       G. Berger*a*, K.-O. Mu ̈ller a, C. Denz*a*, I. F ̈oldv'ari b, A. P'eter' *b*

*một*Viện Vật lý Ứng dụng, Westf ̈alische Wilhelms-Universita ̈t Mu ̈nster, Corrensstr. 2/4,

D-48149 Mu ̈nster, Đức

*b* Viện nghiên cứu vật lý và quang học trạng thái rắn, Viện Hàn lâm Khoa học Hungary, Konkoly-Thege u. 29-33, H-1121 Budapest, Hungary

**TRỪU TƯỢNG**

Chúng tôi xem xét các thuộc tính quan trọng của hệ thống lưu trữ ba chiều ổ đĩa được mã hóa theo pha về chất lượng và bảo mật dữ liệu, đây là những vấn đề chính của bất kỳ hệ thống bộ nhớ số lượng lớn nào. Hai vấn đề lớn cần được giải quyết trong các hệ thống lưu trữ ba chiều về chất lượng dữ liệu là xóa hình ba chiều trong quá trình đọc và các sơ đồ mã hóa dữ liệu để tái tạo không có lỗi. Chúng tôi trình bày một vật liệu lưu trữ mới (tinh thể bismuth tellurite Bi2TeO5) có khả năng khắc phục vấn đề biến động và tránh phải sửa chữa thêm. Về sơ đồ mã hóa dữ liệu, chúng tôi trình bày một cách tiếp cận chung về mã hóa điều chế thang độ xám để cải thiện dung lượng dữ liệu so với mã hóa điều chế thông thường, trong khi tỷ lệ lỗi bit duy trì ở mức thấp. Bảo mật dữ liệu trong một hệ thống mã hóa pha có thể được thực hiện bằng cách khai thác các đặc tính ghép kênh đặc biệt của nó. Chúng tôi trình bày các kỹ thuật mã hóa khác nhau và điều tra xác suất giải mã của chúng.

**Từ khoá:**Hình ba chiều khối lượng, ghép kênh mã pha, lưu trữ ba chiều không bay hơi, mã hóa điều chế, mã hóa dữ liệu, mã hóa pha ngẫu nhiên

**1. GIỚI THIỆU**

Trong những năm qua, các hệ thống lưu trữ ba chiều khối lượng lớn đã chứng minh một cách ấn tượng khả năng của chúng về dung lượng lưu trữ đạt 1 TByte / cm3, tốc độ truyền dữ liệu nhanh có thể vượt quá 10 GBit / s và thời gian truy cập ngẫu nhiên ngắn dưới 100 *µ* s.1,2Các tính năng này đạt được theo nguyên tắc lưu trữ hướng trang và sử dụng các kỹ thuật ghép kênh như góc, Ghép kênh bước sóng và không gian hoặc bất kỳ biến thể và kết hợp nào của chúng (ví dụ: 3–7). Trong số các kỹ thuật ghép kênh khác nhau, ghép kênh mã pha trực giao cung cấp một số lợi thế. Hấp dẫn nhất có lẽ là tính năng hoạt động với bước sóng cố định và đồng thời tránh các thành phần chuyển động cơ học. Hơn nữa, tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu nằm trong phạm vi hai bậc cường độ cao hơn so với ghép kênh góc trải rộng rãi. 8,9Ngoài ra, các đặc tính đặc biệt của ghép kênh mã pha trực giao cho phép thực hiện các phép toán số học quang học dưới dạng cộng, trừ hoặc đảo ngược trực tiếp trong quá trình đọc và cho phép các kỹ thuật mã hóa dữ liệu rất tiềm năng. 10,11Tuy nhiên, các hệ thống lưu trữ ba chiều khối lượng vẫn bị thiếu vật liệu bộ nhớ phải đáp ứng một loạt các thuộc tính, ví dụ: nó phải có độ nhạy cao, chất lượng quang học tuyệt vời và dải động lớn trong khi nó rẻ, mạnh mẽ và ngăn ngừa mất dữ liệu do biến động ba chiều. Trong bài báo này, chúng tôi trình bày một vật liệu lưu trữ mới kết hợp các ưu điểm của tinh thể niobate lithium vô cơ, nhưng khắc phục được lỗ hổng của hình ba chiều. Một chủ đề khác của các cuộc điều tra vĩnh viễn về chất lượng dữ liệu trong các hệ thống quang học hướng trang là các sơ đồ mã hóa dữ liệu, sẽ nâng cao tỷ lệ lỗi bit (BER) ở mức tổn thất dung lượng tối thiểu. 12Trong bối cảnh này, chúng tôi thảo luận về một cách tiếp cận chung về việc thực hiện các giá trị màu xám trong kỹ thuật mã hóa điều chế mạnh mẽ.

Trong phần 5, chúng tôi tập trung vào tiềm năng cao để bảo mật dữ liệu trong các hệ thống lưu trữ được mã hóa theo pha, điều này đã được tiết lộ trong một số tác phẩm. 13–17Rõ ràng là thành công gần đây của chúng tôi trong việc thực hiện thu hồi liên kết cũng trong một hệ thống mã hóa pha,18trong đó chúng tôi quản lý để khắc phục sự cần thiết của các phép đo pha, có những hậu quả sâu rộng đối với các kỹ thuật mã hóa dựa trên địa chỉ. Do đó, chúng tôi xem xét ngắn gọn các nguyên tắc của các kỹ thuật mã hóa hiệu quả nhất khai thác các đặc điểm đặc biệt của mã hóa pha và thảo luận về mức độ bảo mật của chúng theo quan điểm của các cuộc điều tra gần đây này.

Thư điện tử: gberger@uni-muenster.de

bộ điều biến pha

                                                                                            f

**Hình 1.**Nguyên tắc của hệ thống lưu trữ mã hóa pha: a) quy trình lưu trữ, b) thu hồi dựa trên địa chỉ, tức là tái tạo trang dữ liệu, c) thu hồi địa chỉ nội dung.

**2. KHÁI NIỆM CƠ BẢN VỀ GHÉP KÊNH MÃ PHA**

Quá trình lưu trữ trong một hệ thống mã hóa pha về nguyên tắc được phác thảo trong hình 1a. Trong nhánh tín hiệu, dữ liệu được lưu trữ được ấn vào sóng tín hiệu bằng bộ điều biến ánh sáng không gian (ví dụ: màn hình LCD). Sau đó, sóng được tập trung vào vật liệu lưu trữ, nơi nó can thiệp vào một tập hợp rời rạc của N chùm tham chiếu được phân tách theo góc. Như trong ghép kênh góc, mỗi chùm tham chiếu này tuân theo điều kiện Bragg. Sự khác biệt của ghép kênh mã pha là tất cả các chùm tham chiếu này giao thoa đồng thời với sóng tín hiệu. Để lưu trữ thêm các trang dữ liệu ở cùng một vị trí, tất cả các chùm tham chiếu này được sử dụng lại, nhưng đối với mỗi trang, các pha của chúng được điều chỉnh riêng bằng bộ điều biến pha (thường là màn hình LCD sắt điện hoặc nematic). Sự dịch chuyển một pha là 0 hoặc *π*và toàn bộ tập hợp các ca tương ứng với một trang dữ liệu nhất định được gọi là mã pha hoặc địa chỉ của nó trong môi trường lưu trữ. Để nhớ lại một trong các trang được lưu trữ, mã pha thích hợp phải được điều chỉnh lại và phương tiện lưu trữ được chiếu sáng lại bằng tất cả các chùm tham chiếu. Trong bước này, thực sự tất cả các hình ba chiều bằng văn bản đều được xây dựng lại, nhưng do sử dụng mã pha trực giao, các trang dữ liệu không được giải quyết sẽ can thiệp một cách phá hoại và trang được giải quyết có thể được phát hiện mà không cần bất kỳ cuộc nói chuyện chéo nào như được phác thảo trong hình 1b. Nguyên tắc nhiễu phá hủy này làm phát sinh tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu của phương pháp này cao hơn đáng kể so với các kỹ thuật ghép kênh khác. 8Để đạt được tính năng này, độ chính xác của sự dịch pha được điều chỉnh phải gần với các giá trị lý thuyết trong khoảng 1%. 13

Để thực hiện thu hồi kết hợp, như được phác thảo trong hình 1c, phương tiện lưu trữ được giải quyết bằng bất kỳ trang dữ liệu nào. Điều này dẫn đến việc tái tạo các chùm tham chiếu thích hợp, được điều chế pha với cùng một mẫu được sử dụng để lưu trữ trang đó. Nếu thông tin được sử dụng để giải quyết được chứa trên một số trang dữ liệu được lưu trữ, mỗi chùm tham chiếu được tái tạo thực sự là một hỗn hợp của một số chùm được tái tạo can thiệp một cách xây dựng và phá hủy. Địa chỉ nội dung có chủ ý được thúc đẩy bởi mục đích cho phép tìm kiếm đồng thời trong toàn bộ cơ sở dữ liệu bằng cách thực hiện mối tương quan của các trang dữ liệu được lưu trữ với một trang được sử dụng để giải quyết (ví dụ: 19). Tính năng này của bộ nhớ ba chiều khối lượng lần đầu tiên được chứng minh trong các hệ thống dựa trên ghép kênh góc. 20–22Trong các hệ thống mã hóa pha, mẫu pha đặc trưng của chùm tham chiếu, cung cấp thông tin về địa chỉ của một trang dữ liệu nhất định, không hiển thị trực tiếp. Vấn đề này gần đây đã được giải quyết bằng cách phá vỡ đối xứng cụ thể của sự giao thoa phá hủy và xây dựng của các mã pha trực giao mang lại sự phân bố cường độ đặc trưng của các chùm tham chiếu được tái tạo. 18Trong phần 5.2, nó được mô tả cách khai thác địa chỉ nội dung để tăng xác suất bẻ khóa mã hóa pha ngẫu nhiên. Với mục đích này, người ta đặc biệt quan tâm đến các pha của chùm tham chiếu hơn là phân phối cường độ được tạo ra, vì trong trường hợp này thành phần của chúng không thể hiểu được.

                                                    Bi2TeO5LiNbO3:Fe

           5 phút 10 phút 30 phút 4 giờ 5 phút 10 phút 30 phút

**Hình 2**. Đọc vĩnh viễn trong Bi2TeO5và LiNbO3: Fe.

**3. HÌNH BA CHIỀU BỀN TRONG BISMUTH TELLURITE**

Một trong những hạn chế lớn cho sự đột phá của hệ thống lưu trữ dữ liệu ba chiều khối lượng là thiếu tài liệu bộ nhớ thích hợp. Nhiều loại vật liệu khác nhau như tinh thể vô cơ, polyme và thủy tinh đã được đề xuất. Trong số các vật liệu này, sắt pha tạp LiNbO3vẫn là tốt nhất về chất lượng quang học. Tuy nhiên, các loại tinh thể khúc xạ quang vô cơ này thường chịu sự biến động bất tiện của hình ba chiều bằng văn bản. Các tinh thể bismuth tellurite phi tuyến quang học, Bi2TeO5, có khả năng khắc phục vấn đề biến động này. Các nghiên cứu ban đầu về Bi2TeO5cho thấy một thành phần tín hiệu khúc xạ quang phát triển trong quá trình trộn hai sóng kéo dài trong vài năm mà không cần bất kỳ sự cố định cụ thể nào. 23–25Các tinh thể được điều tra trong các thí nghiệm của chúng tôi được phát triển bằng kỹ thuật Czochralski kiểm soát đường kính. Các chi tiết kỹ thuật của việc chuẩn bị nguyên liệu thô và tăng trưởng tinh thể được mô tả trong [26]. Là một vật liệu tham khảo pha tạp sắt, lithium niobate một miền đã được sử dụng. Các tinh thể LiNbO3đồng dạng được phát triển bằng kỹ thuật Czochralski trong môi trường không khí. Fe được điều chỉnh thành 10−3mol*/*mol.

Sự phân rã tín hiệu của hình ba chiều trong Bi2TeO5trải qua ba giai đoạn khác nhau. Trong giai đoạn đầu tiên, kéo dài khoảng 10 giây, có thể thấy rõ sự phân rã tín hiệu mạnh. Sau đó, trong vài phút, sự phân rã tín hiệu chậm hơn nhiều diễn ra. Trong giai đoạn thứ ba, tín hiệu duy trì chủ yếu không thay đổi và hình ba chiều có thể được đọc vĩnh viễn mà không có thêm bất kỳ tổn thất nào. Hiệu suất nhiễu xạ của thành phần tuổi thọ dài là khoảng 10% hiệu suất nhiễu xạ ban đầu. Hình 2 mô tả một cách định tính quá trình xóa dưới việc đọc vĩnh viễn trong Bi2TeO5và LiNbO3, trong đó độ sâu điều chế của hình ba chiều sau khi viết, hiệu quả nhiễu xạ ban đầu và cường độ đọc được điều chỉnh bằng nhau trong cả hai trường hợp.

Nguồn gốc của sự ổn định lâu dài của các hình ba chiều được viết trong Bi2TeO5chưa được xác định rõ ràng. Hai lời giải thích hiện đang được thảo luận. Một cách tiếp cận giả định rằng hiệu ứng có liên quan đến mức bẫy sâu. Nhưng do vị trí của cạnh hấp thụ 3,1 eV, sự hiện diện của chúng không có nhiều khả năng. Lời giải thích thứ hai cho thấy hiệu ứng này có liên quan đến sự thiếu hụt oxy cấu trúc lớn (17%) của các tinh thể Bi2TeO5. Sự truyền ion oxy được điều khiển bởi trường điện tích không gian khúc xạ quang có thể dẫn đến "tự cố định" tín hiệu. Do đó, sự thay đổi chỉ số khúc xạ cảm ứng điện quang được chuyển đổi thành một điều chế trung hòa điện của sự phân bố oxy không gian. 24Sự tăng cường nhẹ có thể quan sát được bằng thực nghiệm của độ tương phản ba chiều trong quá trình phân rã tối hỗ trợ mô hình này.

**4. MÃ HÓA ĐIỀU CHẾ THANG ĐỘ XÁM**

Phần này được dành cho mã hóa điều chế và tiềm năng của việc thực hiện giá trị xám. Các loại mã hóa điều chế khác nhau đã được thảo luận trong một số ấn phẩm và sự kết hợp với tỷ lệ màu xám cũng đã được nghiên cứu. 12,27–29Ở đây chúng tôi trình bày một cách tiếp cận chung để mã hóa điều chế thang độ xám, trong đó chúng tôi nhấn mạnh tính năng độ sáng không đổi của các trang dữ liệu được mã hóa. Tính năng này đảm bảo hiệu quả nhiễu xạ liên tục của mỗi hình ba chiều được viết, đây là mối quan tâm lớn vì nó là điều kiện tiên quyết cho tỷ lệ nhiễu xuyên âm thấp và tín hiệu trên nhiễu cao. Cuối cùng, chúng tôi trình bày một quy tắc xây dựng chung cho các mã này.

**4.1. Khái niệm cơ bản về mã hóa điều chế trọng lượng không đổi**

Sơ đồ phát hiện bit đơn giản nhất là phát hiện ngưỡng toàn cầu, nhưng chủ yếu là do sự thay đổi cường độ không gian, kỹ thuật này mang lại tỷ lệ lỗi bit thường thấp. Một số sơ đồ phát hiện bit phức tạp hơn đã được đề xuất. Trong các hệ thống quang học song song, đặc biệt là mã hóa điều chế và lọc nghịch đảo là những công cụ mạnh mẽ cho

                                 từ người dùng (1,2,1)-mã người dùng word (2,4,1)-code (2,4,3)-code

**Bảng 1**. Có thể gán mã điều chế (1,2,1), (2,4,1) và (2,4,3)

**Bảng 2**. Có thể gán mã điều chế (2,3,1.5) sử dụng 3 giá trị màu xám

giảm tỷ lệ lỗi bit (BER), vì chúng tính đến tính song song của quá trình lưu trữ. Những kỹ thuật này tất nhiên có thể được kết hợp với mã hóa sửa lỗi phổ biến (ví dụ: mã Reed-Solomon). Một thước đo quan trọng cho bất kỳ kỹ thuật giảm lỗi nào là tốc độ mã của nó, được đưa ra dưới dạng tỷ lệ bit của người dùng trên tổng số bit của luồng dữ liệu, tức là phần nhỏ của dung lượng lưu trữ lý thuyết thực sự được sử dụng để mã hóa dữ liệu người dùng. Lọc nghịch đảo cân bằng hiệu suất nhiễu xạ dự kiến của mỗi bit ON của trang dữ liệu bằng cách điều chỉnh thời gian phơi sáng của các bit. 29Do đó, kỹ thuật này không làm giảm dung lượng lưu trữ và do đó tốc độ mã của nó bằng 1.

Mã hóa điều chế tách trang dữ liệu thành các khối số bit không đổi có kích thước bằng nhau *b*. Mỗi khối này bao gồm số lượng bằng nhau của 1s (bit ON) và 0s (bit OFF) và có khả năng mã hóa *d*bit người dùng. Do số *w*không đổi của 1, các mã như vậy còn được gọi là mã trọng lượng không đổi. 27Dữ liệu người dùng được phát hiện bằng cách tìm kiếm các bit sáng nhất của khối và xác định chúng là 1. Do đó, một mã điều chế nhất định có thể được đặc trưng bởi bộ ba (*d, b, w*). Bảng 1 cho thấy mã điều chế đơn giản nhất (1,2,1) thường được gọi là mã vi phân và mã (2,4,1) và mã nghịch đảo của nó.

Quy tắc xây dựng chung cho loại mã điều chế đó có thể được viết như sau:

*.*(1)

Ví dụ: để mã hóa bất kỳ từ người dùng nào có kích thước *d*= 4, mã điều chế phải có khả năng phân biệt giữa ít nhất 2,4= 16 từ khác nhau. Trong trường hợp *d*= 4, yêu cầu này được đáp ứng bằng mã có kích thước khối *b*= 6 và trọng lượng *w*= 3, vì (6 *chọn*3) = 20 *>*16.

Do đó, kỹ thuật này nhận ra phát hiện ngưỡng cục bộ và do đó làm giảm lỗi bit do sự thay đổi cường độ không gian. Hơn nữa, kỹ thuật này đảm bảo độ sáng *không đổi w / b*của tất cả các trang dữ liệu. Về mặt lưu trữ dữ liệu ba chiều khối lượng, điều này rất mong muốn để kiểm soát thời gian phơi sáng trong quá trình ghi theo cách mà bất cứ lúc nào hiệu quả nhiễu xạ của mỗi hình ba chiều là như nhau. Tỷ lệ mã của mã điều chế được đưa ra bởi *d / b*. Do đó, tỷ lệ mã cao hơn có thể đạt được bằng kích thước khối lớn hơn với chi phí của BER cao hơn. 27

**4.2. Thực hiện các giá trị màu xám**

Ý tưởng cơ bản của mã hóa điều chế thang màu xám là tăng tốc độ mã trong khi BER vẫn ở mức thấp bằng cách cho phép nhiều hơn hai (1s và 0) giá trị màu xám rời rạc trong một trang dữ liệu. Mỗi bit khối có thể hiển thị bất kỳ giá trị xám nào trong *số*n giá trị màu xám khác nhau của trọng lượng w 1*,...,n*, trong đó *w* i² [*,*] là độ sáng tương đối của giá trị xám thứ *i*. Ngoài ra, tần số tuyệt đối của các giá trị màu xám khác nhau trên mỗi khối được cho là không đổi để đảm bảo độ sáng bằng nhau của mỗi trang dữ liệu. Mã đơn giản nhất sử dụng 3 giá trị màu xám (ví dụ: w 1 = *1,w*2= 0 *.*5 und *w* 3 = 0) là mã (2,3,1.5) trong đó 2 bit người dùng được biểu diễn bằng 3bit khối. Một bài tập có thể được mô tả trong bảng 2. Tỷ lệ mã của mã này là 0,67 và độ sáng là 0,50. Khi sử dụng hai giá trị màu xám (chỉ 1s và 0s), cần ít nhất kích thước khối 6 bit để đạt được cùng tốc độ mã. Nếu 4 giá trị màu xám được sử dụng, mã (4,4,2) là mã đơn giản nhất. Tỷ lệ mã của nó là 1,00 và độ sáng của nó là 0,50. Quy tắc xây dựng chung cho bất kỳ mã trọng lượng không đổi nào sử dụng các giá trị *i*xám có thể được viết là

*,*(2)

trong đó *b*là số bit trên mỗi khối và m i là tần số tuyệt đối của giá trị xám thứ *i*. Ví dụ: một từ người dùng bao gồm 6 bit có thể là bất kỳ từ nào trong bộ 26= 64 từ. Do đó, khi sử dụng 3 giá trị màu xám, mỗi khối phải bao gồm ít nhất *b*= 6 bit. Trong trường hợp này, số lượng từ mã có thể biểu diễn tối đa là 120. Sự phong phú như vậy là một tính năng điển hình của các mã điều chế này và nó cho thấy việc thực hiện mã hóa sửa lỗi mềm hoặc tăng khoảng cách Hamming. Nói chung, rõ ràng từ điều kiện được đưa ra trong 2 rằng bất kỳ mã nào cũng mang lại nhiều từ mã nhất nếu tần số tuyệt đối của các giá trị màu xám khác nhau trên mỗi khối được cân bằng càng nhiều càng tốt. Một số mã ví dụ được đưa ra trong bảng 3.

Rõ ràng là kích thước khối nhỏ nhấn mạnh BER tốt nhất dẫn đến tỷ lệ mã thấp. Do đó, mong muốn thực hiện các mã điều chế có kích thước lớn hơn. Để giảm thiểu các lỗi ngày càng tăng do sự thay đổi cường độ, một bộ lọc nghịch đảo đã sửa đổi hiện đang được nghiên cứu trong thử nghiệm của chúng tôi. Việc lọc nghịch đảo này không ảnh hưởng đến tính năng độ sáng tổng thể không đổi của các trang dữ liệu có tỷ lệ xám.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| bit người dùng | Kích thước khối | trọng lượng | ABS. tần số | Tỷ lệ mã | Độ sáng |
| *d* | *b* | P  *w*= i *m i*· *wtôi* | *mi* |  |  |

N = 2 (w 1 = 1, *w*2 = 0)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 |  | 1 | 1,1 | 0.5 | 0.5 |
| 2 | 4 |  | 1 | 1,3 | 0.5 | 0.25 |
| 6 | 8 |  | 4 | 4,4 | 0.5 | 0.25 |
| 8 | 12 |  | 4 | 4,8 | 0.67 | 0.33 |
| 12 | 15 |  | 6 | 6,9 | 0.80 | 0.40 |

N = 3 (w 1 = 1, w 2 = 0,50, *w*3 = 0)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 3 | 4 | 1.5 | 1,1,2 | 0.75 | 0.38 |
| 4 | 5 | 2 | 1,2,2 | 0.80 | 0.40 |
| 6 | 6 | 3 | 2,2,2 | 1.00 | 0.50 |
| 15 | 12 | 6 | 4,4,4 | 1.25 | 0.50 |

N = 4 (w 1 = 1, w 2 = 0,67, w 3 = 0,33, *w*4 = 0)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 4 |  | 4 |  | 2 | 1,1,1,1 | 1.00 | 0.50 |
| 7 |  | 6 |  | 2.33 | 1,1,2,2 | 1.17 | 0.39 |
| 14 |  | 10 |  | 4.33 | 2,2,3,3 | 1.40 | 0.43 |
| 18 |  | 12 |  | 6 | 3,3,3,3 | 1.50 | 0.50 |

**Bảng 3**. Mã điều chế mẫu sử dụng 2, 3 và 4 giá trị màu xám

**5. MÃ HÓA DỮ LIỆU TRONG CÁC HỆ THỐNG MÃ HÓA PHA**

Đây là mục tiêu chính của hệ thống bộ nhớ số lượng lớn để cung cấp một lượng bảo mật dữ liệu cao. Kỹ thuật mã hóa đơn giản trong hệ thống lưu trữ ba chiều khối lượng là chồng dữ liệu được lưu trữ bởi các mẫu pha ngẫu nhiên, ví dụ: một tấm pha ngẫu nhiên. Trong quá trình đọc, trang dữ liệu được giải mã bằng cách truyền lại qua tấm pha đó. Kỹ thuật này tương ứng với các phương pháp mã hóa dữ liệu phổ biến dựa trên các hoạt động XOR kỹ thuật số. Giống như trong Vernam cổ điển, mật mã thông tin gốc được mã hóa bằng cách áp dụng luồng dữ liệu ngẫu nhiên và được giải mã bằng cách áp dụng nó lần thứ hai.

Tuy nhiên, một hệ thống ba chiều được mã hóa pha cho phép các sơ đồ mã hóa dữ liệu hiệu quả hơn nhiều bằng cách khai thác các đặc điểm ghép kênh cụ thể của nó. Một phương pháp là phân phối thông tin trên một số trang dữ liệu bằng cách sử dụng các phép toán hình ảnh số học quang học. Phương pháp thứ hai dựa trên sự kết hợp của ghép kênh mã pha ngẫu nhiên và trực giao. Hai phương pháp này khác với các kỹ thuật mã hóa khác vì chúng không mã hóa thông tin mà là địa chỉ của nó trong phương tiện lưu trữ. 17Trong các phần sau, các nguyên tắc của các phương pháp này được trình bày và mức độ bảo mật có thể đạt được được nghiên cứu.

**5.1. Nguyên tắc mã hóa dữ liệu dựa trên địa chỉ**

**5.1.1. Mã hóa bằng các thao tác ảnh số học**

Ý tưởng cơ bản của phương pháp mã hóa này có hạt giống trong cơ hội của các hệ thống lưu trữ được mã hóa pha để cho phép các hoạt động số học quang học. Bằng cách giảm tính chọn lọc của mã pha của sóng tham chiếu trong quá trình đọc, có thể thực hiện cộng, trừ hoặc đảo ngược quang học của bất kỳ trang dữ liệu nào và bất kỳ số lượng trang dữ liệu nào được lưu trữ ở một vị trí. Đó là, các hoạt động OR, XOR và NOT có thể được thực hiện khi sử dụng các trang dữ liệu kỹ thuật số.

Tính năng đặc biệt này có thể được khai thác về mặt mã hóa dữ liệu bằng cách phân phối thông tin gốc trên một số trang dữ liệu trước khi lưu trữ. Các trang này sau đó được lưu trữ bằng cách sử dụng các mã pha trực giao xác định. Để tái tạo lại thông tin thực tế, sự kết hợp thích hợp của các trang dữ liệu phải được giải quyết. Giải quyết bằng một mã pha trực giao đơn giản tái tạo lại chỉ là một hỗn hợp thông tin vô nghĩa. Hiệu quả của phương pháp này phụ thuộc vào số lượng trang dữ liệu có thể được lưu trữ độc lập ở một vị trí lưu trữ, tức là nó phụ thuộc vào số lượng kết hợp tuyến tính độc lập của các mã pha được sử dụng. Do đó, khả năng giải mã được đưa ra bởi

*,*(3)

trong đó *N*= 2*n*là số trang dữ liệu. Bảng sau đây cho thấy một số giá trị của *Pa*(*N*)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *N* | 64 | 256 | 512 |
| *Pa*(*N*) | 1*.*7 · 10−20 | 1*.*4 · 10−78 | 8*.*3 · 10−156 |

.

**5.1.2. Mã hóa bằng cách kết hợp ghép kênh mã pha ngẫu nhiên và trực giao**

Phương pháp này khai thác vấn đề thực tế là chỉ có sự dịch pha tương đối trong nhánh tham chiếu mới có ý nghĩa đối với quá trình lưu trữ. Đó là, sự biến dạng của mã pha trực giao bởi một mẫu pha ngẫu nhiên bổ sung không ảnh hưởng đến tính chọn lọc của các mã nếu sự biến dạng đó không đổi trong quá trình ghi và tái tạo. Mô hình pha có thể được giới thiệu bởi một tấm pha ngẫu nhiên trong cánh tay tham chiếu hoặc trực tiếp bởi chính bộ điều biến pha. Đọc ra với các mã pha trực giao đơn giản dẫn đến hỗn hợp vô nghĩa của nhiều trang dữ liệu thực tế. Phương pháp đơn giản để bẻ khóa pha ngẫu nhiên như vậy là thêm các dịch pha ngẫu nhiên bổ sung bằng bộ điều biến pha vào mỗi chùm tham chiếu đơn trong quá trình đọc. Xác suất giải mã cho phương pháp bẻ khóa này được đưa ra bởi

*,*(4)

trong đó *N*là số trang dữ liệu được lưu trữ và *k*là thước đo độ chính xác cần thiết của các dịch chuyển ngẫu nhiên được đoán. Ví dụ, nếu *k*= 5, người ta giả định rằng đoán một pha trong khoảng ±(*π*/5)*/*2 xung quanh giá trị chính xác là đủ để tái tạo thích hợp. Bảng sau đây đưa ra một số giá trị của *Pr* (*N*) trong đó *k*được cho là 5

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *N* | 64 | 256 | 512 |
| *Pr*(*N*) | 2*.*8 · 10−41 | 2*.*7 · 10−174 | 1*.*2 · 10−352 |

.

**5.2. Bảo mật dữ liệu**

Xác suất giải mã thấp của các công nghệ mã hóa dựa trên địa chỉ này chứng tỏ tiềm năng bảo mật dữ liệu cao của chúng. Tuy nhiên, các hệ thống ghép kênh góc và mã pha cũng cho phép thu hồi địa chỉ nội dung mang lại địa chỉ lưu trữ của một trang dữ liệu như được phác thảo trong hình 1c. Tính năng đặc biệt này có thể được khai thác để tăng đáng kể xác suất giải mã của phương pháp mã pha ngẫu nhiên và trực giao kết hợp được mô tả trong phần 5.1.2. Ý tưởng là giải quyết phương tiện lưu trữ bằng các trang dữ liệu chỉ chứa một hoặc một vài bit ON. Sau đó, trong một thiết lập phức tạp, các pha của chùm tham chiếu được tái tạo có thể được đo. Mỗi pha này xuất hiện từ sự can thiệp mang tính xây dựng và phá hủy của sự dịch pha 0 và *π*của bất kỳ mã pha trực giao nào và sự dịch pha ngẫu nhiên bổ sung. Điều này có nghĩa là một tập hợp các pha thích hợp để xây dựng lại một trang dữ liệu thực tế có thể được xây dựng bởi các pha đo và các pha đo được cộng với sự dịch pha *π*. Do đó, xác suất đoán bất kỳ tập pha thích hợp nào được cho bởi

*,*(5)

trong đó N là số chùm tham chiếu tương đương với số trang dữ liệu được lưu trữ. Bảng sau đây cho thấy một số giá trị của hàm xác suất đã sửa đổi

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *N* | 64 | 256 | 512 |
| *Pr,m*(*N*) | 1*.*4 · 10−17 | 8*.*8 · 10−75 | 1*.*5 · 10−151 |

.

So với xác suất giải mã *Pa* (*N*) được đưa ra trong phần 5.1.1, các giá trị này tiết lộ rằng phương pháp mã hóa bằng các phép toán số học hiệu quả hơn. Nhưng để tăng xác suất giải mã của mã hóa pha ngẫu nhiên theo cách đó, cần phải có một thiết lập rất tinh vi. Nó cần phải có khả năng đo pha chính xác của các chùm tham chiếu được tái tạo trong quá trình thu hồi nội dung được giải quyết.

**6. KẾT LUẬN**

Trong bài báo này, chúng tôi đã thảo luận về một số khía cạnh của hệ thống lưu trữ ba chiều khối lượng về chất lượng dữ liệu. Đầu tiên chúng tôi trình bày bismuth tellurite như một vật liệu lưu trữ thay thế. So với lithium niobate lan rộng rãi, nó có lợi thế lớn để khắc phục sự biến động hình ba chiều do hiệu ứng tự cố định, mặc dù cần phải đạt được những cải tiến hơn nữa về chất lượng quang học và độ nhạy vật liệu. Thứ hai, chúng tôi đã xem xét một cách tiếp cận chung để mã hóa điều chế thang màu xám và chỉ ra quy tắc xây dựng chung cho các mã trọng lượng không đổi phổ biến. Cuối cùng, chúng tôi đã điều tra số lượng bảo mật dữ liệu được cung cấp bởi mã hóa mã pha ngẫu nhiên, trước đây được phát âm là rất hiệu quả. Hóa ra nó kém hiệu quả hơn mã hóa dựa trên các hoạt động của trang dữ liệu số học khi lạm dụng khả năng đánh địa chỉ nội dung trong hệ thống lưu trữ ba chiều ổ đĩa được mã hóa theo pha.

**ACKNOWLEDGMENTS**

This work was partially supported by the Volkswagenstiftung under contract no. I 75/504. The present work on storage materials was supported by the Hungarian - German intergovernmental R & T cooperation program, No. D2/99, the Hungarian Science Found OTKA Project No. T-029756, the CMRC European Center of Excellence No. ICAI-1999-75002, and the COST Action P2.

**REFERENCES**

1. J. Heanue, M. Bashaw, and L. Hesselink, “Volume holographic storage and retrieval of digital data,” *Science***265**, pp. 749–752, 1994.

2. D. Psaltis and F. Mok, “Holographic memories,” *Sci. Am.***273**, pp. 70–76, 1995.

3. F. Mok, “Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate,” *Opt. Lett.***18**, pp. 915–917, 1993.

4. G. Burr, F. Mok, and D. Psaltis, “Angle and space multiplexed holographic storage using the 90◦geometry,” *Opt. Commun.***117**, pp. 49–55, 1995.

5. G. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv, “Optical data storage by using orthogonal wavelength-multiplexed volume holograms,” *Opt. Lett.***17**, pp. 1471–1473, 1992.

6. C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, and T. Tschudi, “Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method,” *Opt. Commun.***85**, pp. 171–176, 1991.

7. Y. Taketomi, J. Ford, H. Sasaki, J. Ma, Y. Fainman, and S. Lee, “Incremental recording for photorefractive hologram multiplexing,” *Opt. Lett.***16**, pp. 1774–1776, 1991.

8. K. Curtis and D. Psaltis, “Cross talk in phase-coded holographic memories,” *J. Opt. Soc. Am. A***10**, p. 2547, 1993.

9. M. Bashaw, A. Aharoni, J. Walkup, and L. Hesselink, “Cross-talk considerations for angular and phaseencoded multiplexing in volume holography,” *J. Opt. Soc. Am. B***11**, pp. 1820–1836, 1994.

10. J. Heanue, M. Bashaw, and L. Hesselink, “Recall of linear combinations of stored data pages based on phase-code multiplexing in volume holography,” *Opt. Lett.***19**, pp. 1079–1081, 1994.

11. C. Denz, T. Dellwig, J. Lembcke, and T. Tschudi, “Parallel optical image addition and subtraction in a dynamic photorefractive memory by phase-code multiplexing,” *Opt. Lett.***21**, pp. 278–280, 1996.

12. M. Neifeld and W.-C. Chou, “Interleaving and error correction for holographic storage,” in *Holographic Data Storage*, G. S. H.J. Coufal, D. Psaltis, ed., pp. 293–307, Springer, 2000.

13. C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, and T. Tschudi, “Potentialities and limitations of hologram multiplexing by using the phase-encoding technique,” *Appl. Opt.***31**, pp. 5700–5705, 1992.

14. E. Tajahuerce and B. Javidi, “Encrypting three dimensional information with digital holography,” *Appl. Opt.***39**, pp. 6595–6601, 2000.

15. X. Tan, O. Matoba, T. Shimura, K. Kuroda, and B. Javidi, “Secure optical data storage that uses full phase encryption,” *Appl. Opt.***39**, pp. 6689–6694, 2000.

16. G. Unnikrishnan and K. Singh, “Double random fractional fourier domain encoding for optical security,” *Opt. Eng.***29**, pp. 2853–2859, 2000.

17. C. Denz, K.-O. Mu¨ller, F. Visinka, G. Berger, and T. Tschudi, “Beyond volume holographic storage applications of phase-encoded multiplexing to image processing and encryption,” *Photorefractive Fiber and Crystal Devices: Materials, Optical Properties, and Applications VI, Proceedings of SPIE***4110**, pp. 254–261, 2000.

18. G. Berger, C. Denz, S. S. Orlov, B. Phillips, and L. Hesselink, “Associative recall in a volume holographic storage system based on phase-code multiplexing,” *Appl. Phys. B***73**, pp. 839–845, 2001.

19. Y. Owechko, “Nonlinear holographic associative memories,” *IEEE J. Quantum Electron.***25**, pp. 619–634, 1989.

20. P. D. Henshaw and S. A. Lis, “Content addressable optical data storage system,” *US patent***5,319,629**, 1994.

21. B. Goertzen and P. Mitkas, “Volume holographic storage for large relational databases,” *Opt. Eng.***35**, pp. 1847–1853, 1995.

22. G. Burr, S. Kobras, H. Hanssen, and H. Coufal, “Content-addressable data storage by use of volume holograms,” *Appl. Opt.***38**, pp. 6779–6784, 1999.

23. I. F¨oldv´ari, M. Scripsick, L. Halliburton, and A. P´eter, “Photorefractive effect in Bi´ 2TeO5single crystals,” *Phys. Lett. A***154**, pp. 84–86, 1991.

24. I. F¨oldv´ari, H. Liu, R. Powell, and A. P´eter, “Investigation of the photorefractive effect in Bi´ 2TeO5,”

*J. Appl. Phys.***71**, pp. 5465–5473, 1992.

25. A. P´eter, O. Szak´acs, I. F¨oldv´ari, L. Bencs, and A. Munoz, “Dopants in photorefractive bismuth tellurite -´ Bi2TeO5crystals,” *Mater. Res. Bull.***31**, pp. 1067–1073, 1996.

26. I. F¨oldv´ari, A. P´eter, O. Szak´acs, and A. Munoz, “Improvement in quality and performance of photorefrac-´ tive Bi2TeO5,” *J. Cryst. Growth***198-199**, pp. 482–486, 1999.

27. B. Marcus, “Modulation coding for holographic recording,” in *Holographic Data Storage*, G. S. H.J. Coufal,

D. Psaltis, ed., pp. 283–291, Springer, 2000.

28. G. Burr, J. Ashley, H. Coufal, R. Grygier, J. Hoffnagle, C. Jefferson, and B. Marcus, “Modulation coding for pixel-matched holographic data storage,” *Opt. Lett.***22**, pp. 639–641, 1997.

29. G. Burr, H. Coufal, R. Grygier, J. Hoffnagle, and C. Jefferson, “Noise reduction of page-oriented data storage by inverse filtering during recording,” *Opt. Lett.***23**, pp. 289–291, 1998.