

Theo yêu cầu của khách hàng, trong một năm qua, chúng tôi đã dịch qua 16 môn học, 34 cuốn sách, 43 bài báo, 5 sổ tay (chưa tính các tài liệu từ năm 2010 trở về trước) Xem ở đây

**DỊCH VỤ
DỊCH
TIẾNG
ANH
CHUYÊN
NGÀNH
NHANH
NHẤT VÀ
CHÍNH
XÁC
NHẤT**

Chỉ sau một lần liên lạc, việc dịch được tiến hành

Giá cả: có thể giảm đến 10 nghìn/1 trang

Chất lượng: Tao dựng niềm tin cho khách hàng bằng công nghệ 1. Bạn thấy được toàn bộ bản dịch; 2. Bạn đánh giá chất lượng. 3. Bạn quyết định thanh toán.

Tài liệu này được dịch sang tiếng việt bởi:

www.mientayvn.com

Từ bản gốc:

https://docs.google.com/document/d/1ellwHaj2fA3iyHoflz2N3ktgRxn_c-jV25sqgEJFvo/edit

Liên hệ:

thanhlam1910_2006@yahoo.com hoặc frbwrthes@gmail.com

Dịch tài liệu của bạn:

http://www.mientayvn.com/dich_tieng_anh_chuyen_nghanh.html

Protection of Cables by Open-Metal Conduits

Bảo vệ dây cáp bằng các ống kim loại hở

Abstract—The performance of metal conduits for protection of cables is investigated. An open U-shaped conduit is chosen as a basic configuration. A number of wires inside represents the actual cables with their shields. This configuration is subjected to a plane-wave excitation to determine the induced currents and voltages, which represent the common-mode signals in the cable shield. The simulated and tested object is 1.5 m long, with a cross section of $9 \times 9 \text{ cm}^2$. Results are presented for frequencies up to 1 GHz, some up to 5 GHz. Measurement and simulation results agree to within 6 dB.

Tóm tắt – Tính năng bảo vệ dây cáp của các ống kim loại được khảo sát. Một ống dạng chữ U hở được chọn làm cấu hình cơ bản. Một số lượng dây bên trong biểu diễn các dây cáp thực và vỏ của chúng. Chúng tôi sử dụng kích thích sóng phẳng cho cấu hình này để xác định dòng và điện áp cảm ứng biểu diễn tín hiệu ở chế độ bình thường trong vỏ cáp. Đối tượng kiểm tra và mô phỏng dài 1.5 m, với tiết diện $9 \times 9 \text{ cm}^2$. Các kết quả được biểu diễn cho các tần số lên đến 1 GHz, một số lên đến 5 GHz. Các kết quả đo và mô phỏng phù hợp trong 6 dB.

I. GIỚI THIỆU

CABLES interconnecting different parts of electronic equipment and systems, are widely regarded as being one of the main sources of electromagnetic compatibility (EMC) issues.

Dây cáp liên kết các phần khác nhau của thiết bị và hệ thống điện được xem là một trong những nguồn chính của vấn đề tương thích điện từ (EMC).

For example, inside the office buildings and large industrial installations, the cables extend over large distances, sometimes hundreds of meters, and act as efficient antennas for electromagnetic (EM) fields. The remarkable growth of wireless communications in recent years has resulted in harsh EM environments to which such interconnects are exposed. This may lead to equipment malfunction, and possibly to critical failures.

Ví dụ, bên trong các cao ốc văn phòng và các hệ thống máy móc công nghiệp lớn, các dây cáp trải dài trên khoảng cách lớn, có khi hàng trăm mét, và đóng vai trò như các ăng ten cho các trường điện từ. Sự phát triển đáng kể của truyền thông không dây trong những năm gần đây đã làm nảy sinh các môi trường điện từ khắc nghiệt mà các liên kết như thế phải phơi ra với nó. Điều này có thể dẫn đến các sự cố thiết bị, và các hư hỏng trầm trọng.

Signal and power cables inside buildings are often routed on metal trays or in conduits. In addition to mechanical support, such structures provide adequate protection against EM interference if properly designed and (inter)connected. The research on the grounding structures performed in [1] contributed to the development of International Electrotechnical Commissions guidelines [2].

Các dây cáp tín hiệu và công suất thường được định tuyến trên các khay kim loại hoặc trong các ống. Cùng với sự hỗ trợ cơ học, các cấu trúc như thế giúp ngăn chặn hiện tượng giao thoa sóng điện từ nếu được thiết kế và kết nối thích hợp. Nghiên cứu về các cấu trúc nối đất được thực hiện trong [1] đã đóng góp vào sự hình thành sổ tay tổ chức kỹ thuật điện quốc tế [2].

Such grounding structures are introduced in [2] as parallel-earthing conductor (PEC); here we use the word “conduit” as generic name. With a PEC, the induced common-mode (CM) current flows through the conduit rather than the cables, or their shields if present. The smaller interference currents in the cable shields induce lower undesired differential-mode (DM) signals coupled via the cable transfer impedance Z_t . The amount of protection of open and closed conduits at the frequencies, where the wavelength is much larger compared to conduit dimensions (below 1 MHz) has been studied in [3] and [4]. A recent study [5] dealt with a U-conduit up to 30 MHz. The measurements and simulation results presented here extend the frequency range up to over 1 GHz, where the resonances on the conduit occur.

Các cấu trúc nối đất như thế được giới thiệu trong tài liệu tham khảo [2] dưới dạng các dây tiếp đất song song (PEC); ở đây chúng ta dùng từ “ống” như là tên chung. Với PEC, dòng chế độ thông thường (CM) cảm ứng chảy qua ống chứ không phải dây cáp, hoặc vỏ của chúng nếu có. Các dòng giao thoa nhỏ hơn trong vỏ dây cáp cảm ứng các tín hiệu chế độ vi sai (DM) không mong đợi được ghép qua trở kháng

truyền đạt của cáp Zt. Mức độ bảo vệ của các ống mở và đóng tại các tần số, ở đó bước sóng lớn hơn nhiều so với kích thước ống (dưới 1 MHz) đã được nghiên cứu trong [3] và [4]. Một nghiên cứu gần đây đã thực hiện đối với ống dạng chữ U lên đến 30 MHz. Các kết quả đo và mô phỏng được đưa vào ở đây mở rộng trong khoảng tần số lên đến trên 1 GHz, lúc này cộng hưởng trên ống xuất hiện.

A full 3-D EM model of a complete, real-life installation is viable nowadays [6]–[8], although the required computational effort remains high. The complete system is split into several simple typical parts, which are then modeled by a faster 2-D method.

Hiện nay, mô hình điện từ ba chiều đầy đủ của hệ thống thực, hoàn chỉnh đã có [6]–[8], mặc dù đòi hỏi công việc tính toán rất phức tạp. Hệ thống hoàn chỉnh được chia thành vài phần điển hình đơn giản, được mô hình hóa bởi các phương pháp hai chiều nhanh hơn.

This paper focuses on one step in the large system analysis and presents the results for a 1.5-m long U-shaped conduit with wires inside it, illuminated by a plane wave.

Bài báo này tập trung vào một bước trong phân tích hệ thống lớn và đưa vào các kết quả cho ống dạng chữ U dài 1.5 m với các dây bên trong nó, được chiếu sáng bởi sóng phẳng.

The conduit length is much larger than the lateral dimensions of 9 cm and end effects do not play a dominant role. The setup also allows a full 3-D analysis of conduit and wires, which can be compared with a simplified model, where the conduit current is calculated in full 3-D, but the wire coupling is derived in a 2-D transmission-line (TL) model. In our model, the wires represent actual cables and the currents in the wires and voltages at the end of the wires can, in principle, be converted into the signals induced in real-life cables via the transfer parameters of the cables. The coupling of incident waves and external fields to TLs has also been extensively studied in the literature—see e.g., [9]–[12]—in both time and frequency domain.

Chiều dài ống lớn hơn nhiều so với kích thước bên 9 cm và các hiệu ứng đầu không đóng vai trò ưu thế. Cách bố trí cũng cho phép phân tích 3 chiều đầy đủ ống và các

dây, nó có thể được so sánh với mô hình đơn giản hóa, ở đây dòng của ống được tính trong chế độ 3 chiều đầy đủ, nhưng sự ghép dây không được rút ra trong mô hình đường truyền (TL) hai chiều. Trong mô hình của chúng tôi, các dây biểu diễn các dây cáp thực và về nguyên tắc, các dòng điện trong các dây và điện áp ở các đầu dây có thể được chuyển thành tín hiệu được cảm ứng trong các dây cáp thực qua hệ số chuyển đổi của dây cáp. Sự ghép các sóng tới và các trường ngoài của các TL đã được nghiên cứu rộng rãi trong các tài liệu –Xem chẳng hạn [9]-[12] trong cả hai miền thời gian và tần số.

This paper extends earlier work [13]. In Section II, we describe the conduits and the configurations studied. The calculations assume a plane wave incident on the open conduit; the results are presented in Section III with a brief excursion to 5 GHz, where the conduit width becomes comparable to wavelength. The calculations are compared with measurements in a fully anechoic room in Section IV. Some effects of a conducting cover are presented as well. The concluding remarks are given in Section V.

Bài báo này mở rộng công trình [13] trước đây. Trong phần II, chúng tôi mô tả các ống và các cấu hình được nghiên cứu. Tính toán giả sử rằng sóng phẳng đến trên một ống hở; các kết quả được đưa vào trong phần III với tần số 5 GHz. Các tính toán được so sánh với các phép đo trong phòng hoàn toàn không có tiếng vọng trong phần IV. Một số ảnh hưởng của lớp phủ dẫn cũng được đưa vào. Kết luận được đưa ra trong phần V.

II. CẤU HÌNH

Since the U-shaped tray is common in practical installations, it has been chosen as a basic configuration for both numerical and experimental study. However, also construction elements, such as beams with H-, T-, and L-profile may serve for protection, as shown by the quasi-static magnetic field lines in Fig. 1.

Bởi vì khay dạng chữ U thường phổ biến trong các hệ thống thực tế, nó đã được chọn làm một cấu hình cơ bản cho nghiên cứu số và thực nghiệm. Tuy nhiên, tương tự như các yếu tố cấu trúc, chẳng hạn như các chùm với biên dạng H-, T-, và L- có thể đóng vai trò bảo vệ, như được biểu diễn bởi các đường sức từ gần tĩnh trong hình 1.

A crease in a metal plate acts as an extended L-shape. The field lines indicate constant mutual inductance M for a wire or cable shield, with respect to a CM current through the conduit [4]. The M is defined between the CM circuit and the loop formed by wire and the conduit. A far away CM return does not appreciably change the magnetic field in and near the conduit; M is then determined by the conduit shape and the wire position only.

Một nếp trên tấm kim loại đóng vai trò như một dạng L mở rộng. Các đường sức trường cho biết hệ số hỗ cảm không đổi M đối với dây và vỏ cáp, đối với dòng điện CM qua ống [4]. M được xác định giữa mạch CM và vòng được hình thành giữa dây và ống. Sự khur hồi CM ở xa không thay đổi đáng kể trường từ trong và gần ống; thế thì M được xác định bởi hình dạng ống và vị trí dây.

The test conduit was folded from a 1-mm-thick brass plate to form a U-shape with $h = 2w = 90$ mm. The conduit length is $l_z = 1.5$ m. Four wires of $d = 2$ mm diameter are placed at the positions shown in Fig. 2.

Ống kiểm tra được gấp từ một miếng đồng dày 1 mm để hình thành dạng chữ U với $h = 2w = 90$ mm. Chiều dài ống là $l_z = 1.5$ m. Bốn dây đường kính $d = 2$ mm được đặt ở các vị trí được biểu diễn trong hình 2.

these will be referred to as “top,” “middle,” “bottom,” and “corner.” Square brass plates are soldered to both ends of the conduit. All wires are directly connected to one end plate, and to BNC connectors at the other plate, where we installed 50 Ω terminations or short-circuits. Six insulating supports maintain the mechanical stability and keep the wires in position over the conduit length. In order to minimize their influence, most of the insulator material has been removed.

Dây được gọi là “đỉnh”, “giữa”, “đáy”, và “góc”. Các miếng đồng thau vuông được hàn vào cả hai đầu của ống. Tất cả các dây được nối trực tiếp với một đầu tấm đồng, và vào bộ phận nối BNC ở tấm còn lại, ở đây chúng tôi đã cài đặt chụp đầu cáp 50 Ω hoặc ngắn mạch. Sáu hỗ trợ cách điện để giữ ổn định cơ học và giữ cho các dây ở đúng vị trí trên chiều dài ống. Để cực tiểu hóa ảnh hưởng của chúng, đa số các vật liệu cách điện được loại bỏ.

In the model, we determine either the induced current at midlength in the wire or the induced voltage over 50 Ω at the end of the wire. As current probes 1 m Ω ideal

resistors are placed at the center of the wires [see Fig. 3(a)] and all wires are short-circuited to the conduit at both ends. The induced voltages are studied over 50 Ω terminations [see Fig. 3(b)].

Trong mô hình, chúng tôi xác định dòng cảm ứng ở giữa dây hoặc điện áp cảm ứng trên 50 Ω ở cuối dây. Khi các đầu dò dòng điện trở lý tưởng 1 m Ω được đặt ở tâm dây [xem hình 3(a)] và tất cả các dây ngắn mạch với ống ở cả hai đầu. Các điện áp cảm ứng được nghiên cứu trên chụp đầu cáp 50 Ω [xem hình 3(b)]

In the measurements, the 50 Ω resistors are either the input impedance of the test receiver or actual resistors for wires that are not connected to the receiver. In calculations, the conduit and wires are illuminated by a plane wave with an electric field of 1 V/m strength and linear polarization. The measurement results were normalized to 1 V/m field strength, as explained in Section IV. In most configurations, the electric field vector is parallel to the wires, when the coupling is most effective. Three main possible directions of wave incidence/conduit orientations (“front,” “side,” and “back”) are shown in Fig. 4. The “front” orientation results in the largest coupling, and therefore, it is studied in more detail.

Trong các phép đo, các điện trở 50 Ω hoặc là trở kháng đầu vào của bộ thu kiểm tra hoặc các điện trở thực đối với các dây không được kết nối với bộ thu. Trong tính toán, các ống và các dây được chiếu sáng bằng sóng phẳng với điện trường có cường độ 1 V/m và phân cực tuyến tính. Các kết quả đo được chuẩn hóa theo cường độ trường 1 V/m như được giải thích trong phần IV. Trong đa số các cấu hình, vector điện trường song song với dây, khi sự ghép hiệu quả nhất. Ba hướng khả dĩ chính của sự định hướng sóng tới/ống (“trước”, “bên” và “sau”) được biểu diễn trong hình 4. Sự định hướng “trước” dẫn đến sự ghép lớn nhất, và do đó, nó được nghiên cứu chi tiết hơn.

II. MÔ PHỎNG

In order to calculate the induced currents and voltages in the conduit wires, we employed two different calculation techniques: first, the method of moments (MoM) implemented in CONCEPT software by Technical University of Hamburg-Harburg [14] and FEKO software by EMSS [15], and second, the finite-integration technique (FIT) of Microwave Studio by CST GmbH [16], [17].

Để tính toán dòng và điện áp cảm ứng trong các dây trong ống, chúng tôi sử dụng hai kỹ thuật tính toán khác nhau: thứ nhất, phương pháp moment (MoM) được thực hiện bằng phần mềm CONCEPT bởi đại học kỹ thuật Hamburg-Harburg [14] và phần mềm FEKO bởi EMSS [15], và thứ hai, kỹ thuật tích phân xác định (FIT) của Microwave Studio do CST GmbH [16], [17].

The MoM is a frequency-domain approach and discretizes the conductor surfaces only. FIT meshes the full 3-D computational space; it is a time-domain approach, eventually followed by discrete Fourier transform (DFT) to generate frequency domain results. In all calculations, we model the conduit and the wires as perfect electric conductors. The actual dimensions have been taken into account in FIT, including the brass thickness. In the MoM calculations, we neglect the thickness of the conduit walls and regard them as surfaces. Symmetry planes (magnetic and electric conducting walls) reduce the calculation domain by 50% or 75%, depending on the configuration. Special attention has to be paid to the meshing of the conduit surfaces. The mesh has to be refined near the “bottom” and “corner” wires because the standard $\lambda/10$ rule is not sufficient for accurate determination of the small currents in these wires. Still, the large currents of the upper two wires are quite accurately predicted even with a coarse mesh.

MoM là một cách tiếp cận miền tần số và phân lập chỉ các bề mặt dẫn điện. FIT tô lưới không gian tính toán ba chiều đầy đủ; nó là cách tiếp cận miền thời gian, và được tiếp nối bằng biến đổi Fourier rời rạc (DFT) để tạo ra các kết quả miền tần số. Trong tất cả các tính toán, chúng ta mô hình hóa ống và các dây như các vật hoàn toàn dẫn điện. Kích thước thực sự được tính đến trong FIT, bao gồm chiều dày miếng đồng. Trong tính toán MoM, chúng ta bỏ qua chiều dày của thành ống và xem chúng như các bề mặt. Các mặt phẳng đối xứng (các thành dẫn điện và từ) giảm vùng tính toán 50% hoặc 75% phụ thuộc vào cấu hình. Sự tô lưới các bề mặt ống làm nảy sinh sự tắt dần đặc biệt. Lưới phải được lọc gần các dây “đáy” và “góc” bởi vì quy tắc $\lambda/10$ tiêu chuẩn không đủ để xác định chính xác các dòng nhỏ trong các dây. Tuy nhiên, các dòng lớn của hai dây ở trên có thể được tiên đoán hoàn toàn chính xác với một lưới thô.

In the FIT method, we use as excitation a Gaussian-shape pulse of the width corresponding to the frequency range of simulations (0.8 ns for 1 GHz and 0.16 ns for 5 GHz). The resulting currents and voltages in the lumped elements (1 m Ω and

50 Ω resistors, respectively) are calculated in the time domain as well. The total energy in the calculation domain is used as a stop criterion; it has been set at -60 dB with respect to initial value.

Trong phương pháp FIT, chúng ta sử dụng kích thích là một xung dạng Gauss với độ rộng tương ứng với khoảng tần số mô phỏng (0.8 nano giây đối với 1 GHz và 0.16 nano giây đối với 5 GHz). Dòng và điện áp cuối cùng trong các yếu tố nguyên khối (các điện trở 1 m Ω và 50 Ω) cũng được tính toán trong miền thời gian. Năng lượng toàn phần trong vùng tính toán được sử dụng như tiêu chuẩn dừng; nó được thiết lập là -60 dB đối với giá trị ban đầu.

A. Các dòng cảm ứng

First, we determine the induced currents when wires are short-circuited to the conduit at both ends. Such a configuration re-sembles the typical middle section of the real-world conduit with the cable shields connected to it. The induced currents are monitored in 1 m Ω resistors shown in Fig. 3(a). The “front” excitation indicated in Fig. 4(a) is used. Fig. 5 shows the re-sults calculated by FIT with all four wires present. As could be expected, the largest values are observed for the “top” wire, and the lowest for the wire in the corner. The resonant features around 0.2 and 0.4 GHz relate to multiple wavelength effects in the 1.5-m-long TL.

Trước hết, chúng ta xác định các dòng cảm ứng khi các dây bị ngắn mạch với ống ở cả hai đầu. Một cấu hình như thế giống với phần giữa điển hình của ống thực với vỏ cáp được nối với nó. Các dòng cảm ứng được điều khiển bằng các điện trở 1 m Ω trong hình 3(a). Kích thích “trước” được chỉ ra trong hình 4(a) được sử dụng. Hình 5 biểu diễn các kết quả được tính toán bằng FIT khi có mặt bốn dây. Như mong đợi, giá trị lớn nhất được quan sát đối với dây “trên”, và thấp nhất đối với dây trong góc. Các đặc trưng cộng hưởng quanh 0.2 và 0.4 GHz liên quan đến nhiều hiệu ứng bước sóng trong đường trường dài 1.5 m.

To estimate the level of protection offered by the conduit, the induced currents are recalculated in the similar configuration with the “front” excitation and all four 1.5 m long wires short-circuited at both ends to a pair of square plates, but with the conduit removed from the model. In the absence of conduit and at the frequency of 150 MHz, the currents in all wires are about the same value of -60 dBA (see Table I). Without conduit, the “top” wire apparently “shields” the other wires slightly.

The U-shaped conduit strongly reduces the coupling, even for the most exposed “top” wire. The “corner” wire is best protected, by more than 60 dB.

Đề ước tính mức độ bảo vệ của ống, dòng điện cảm ứng được tính toán lại trong cấu hình tương tự với kích thích “trước” và tất cả bốn dây dài 1.5 m ngắn mạch ở cả hai đầu với một cặp bản vuông, nhưng ống đã được loại bỏ khỏi mô hình. Khi có ống và ở tần số 150 MHz, các dòng điện trong tất cả các dây ở xung quanh giá trị -60 dBA (xem bảng 1). Nếu không có ống, nhìn từ bên ngoài, dây ở trên bọc các dây còn lại yếu. Ống hình chữ U giảm ghép mạnh, thậm chí khi đa số các dây “trên” được phô ra. Dây “góc” được bảo vệ tốt nhất với hơn 60 dB.

The same configuration for the induced currents was also modeled in the frequency domain by a different approach. The CONCEPT II MoM software was used for the benchmarking purpose. Fig. 5 includes the results for the “top” and “middle” wires. Good agreement along the whole frequency range is apparent. Deviations occur near the resonance frequencies, where the current amplitudes are more sensitive to the environment, which is free space in MoM or absorbing boundaries in FIT. Both methods are limited by the finite discretization of space (FIT) or conduit (MoM). Minor ripples in the FIT current near the resonances are caused by the -60 dB stop criterion.

Cấu hình tương tự đối với các dòng cảm ứng cũng được mô hình hóa trong miền tần số bằng một cách tiếp cận khác. Phần mềm CONCEPT II MoM được sử dụng cho mục đích làm chuẩn. Hình 5 đề cập đến các kết quả của các dây “trên” và “giữa”. Sự phù hợp tốt trên toàn bộ khoảng tần số khá rõ ràng. Sự sai lệch xuất hiện gần các tần số cộng hưởng, ở đây độ lớn dòng nhạy hơn với môi trường, nó là không gian tự do trong MoM hoặc các biên hấp thụ trong FIT. Cả hai phương pháp bị giới hạn bởi sự rời rạc hóa xác định của không gian (FIT) hoặc ống (MoM). Một ít gợn trong dòng FIT gần cộng hưởng do tiêu chuẩn dừng -60 dB.

B. Điện áp cảm ứng

The voltages can be calculated about 20 times faster than the currents in FIT. The four 50 Ω wire terminations absorb the excitation energy faster than the 1 m Ω resistors, and the -60 dB energy criterium is met earlier. Nevertheless, the terminations should not be regarded as an approximate open circuit because the characteristic impedance of the wires in the conduit is larger than 100 Ω (see

Section III-C). Again, we consider the “front” excitation. The results are presented in Fig. 6. The differences with respect to the top wire voltage are the same as in the current configuration: -19 , -42 , and -54 dB at off-resonance frequencies. Thus, the protection by the conduit is also well demonstrated by the voltages. The resonant dips at the multiples of 0.1 GHz correspond to the half-wavelength resonances in 1.5 m long TL. Apart from the dips, the voltages are remarkably independent of frequency; the variation as function of frequency is certainly less than for the current, in particular, near the resonances.

Điện áp có thể được tính nhanh hơn dòng 20 lần trong FIT. Bốn chụp đầu dây 50Ω hấp thu năng lượng kích thích nhanh hơn các điện trở $1 \text{ m}\Omega$, và tiêu chí năng lượng -60 được thỏa mãn từ trước. Tuy thế, chụp đầu cáp không nên được xem gần đúng là mạch hở bởi vì trở kháng riêng của các dây trong ống lớn hơn 100Ω (xem phần III-C). Chúng ta lại xét kích thích “trước”. Các kết quả được đưa vào trong hình 6. Hiệu điện thế dây trên tương tự như trong cấu hình dòng: -19 , -42 , và -54 dB tại các tần số lệch hưởng. Vì thế, chức năng bảo vệ của ống cũng được minh chứng tốt qua điện áp. Các dốc cộng hưởng là một số nguyên lần của 0.1 GHz tương ứng với cộng hưởng nửa sóng trong đường truyền dài 1.5 m. Ngoại trừ các dốc, điện áp không phụ thuộc đáng kể vào tần số; sự thay đổi như một hàm theo tần số tất nhiên nhỏ hơn dòng, đặc biệt khi gần cộng hưởng.

In most practical applications, as well as in the conduit, we used for measurements, there will be more than one cable (wire) present. To investigate how these additional conductors influence the coupling, the calculations were repeated four times with only one wire present, for comparison with the setup with four wires. The results are summarized in Table II. While the voltage at the “top” wire remains the same, the voltages at the lower wires are significantly smaller when all wires are present. Due to the coupling between the wires or cable shields in practical situations, the wires located at the top of the conduit act as an additional protection for the wires placed deeply inside the conduit.

Trong đa số các ứng dụng thực tế, cũng như trong ống mà chúng ta sử dụng sẽ luôn có nhiều hơn một dây cáp. Để khảo sát các vật dẫn phụ này ảnh hưởng như thế nào đến sự ghép, tính toán được lặp lại bốn lần chỉ khi có một dây, để so sánh với bố trí có bốn dây. Các kết quả được tóm tắt trong bảng II. Trong khi điện áp ở dây “trên” vẫn còn giống nhau, các điện áp ở dây thấp hơn nhỏ hơn đáng kể khi có mặt tất cả

các dây. Do sự ghép giữa các dây và vỏ cáp trong các trường hợp thực tế, các dây đặt phía trên ống đóng vai trò bảo vệ phụ cho các dây được đặt sâu bên trong ống.

C. Tiếp cận TL

We also used the TL approach to calculate the induced signals in the conduit wires. This method has several advantages. If the position of a wire changes, both FIT and MoM require the whole configuration to be recalculated, which takes a few hours of computer time. In the TL approach, the field distribution inside the empty conduit has to be calculated only once per conduit geometry and excitation. The field inside the conduit is regarded as excitation source for the TL formed by the wires and conduit. The TL parameters for the bare wires considered here can be accurately and quickly calculated by a 2-D method, for example, by MoM [18], [19] or Schwarz–Christoffel (SC) transformation (see Appendix). In case of 2-D MoM [20], the round wires were approximated by 16-sided polygons. In the numerical SC [21], the conduit is mapped onto the unit circle and the flux per ampere is determined between that circle and the mapped-wire surface. The self-inductance and impedance values for the four wires obtained by both methods are compared in Table III. Good agreement between both methods is apparent; the deviation is less than 0.5%.

Chúng ta cũng đã sử dụng các tiếp cận TL để tính toán các tín hiệu cảm ứng trong các dây trong ống. Phương pháp này có vài ưu điểm. Nếu vị trí của dây thay đổi, cả FIT và MoM đòi hỏi toàn bộ cấu hình phải được tính toán lại, và phải mất vài giờ để tính toán. Trong cách tiếp cận TL, phân bố trường bên trong ống rỗng được tính toán một lần trên cấu hình ống và kích thích. Trường bên trong ống được xem như nguồn kích thích đối với TL được hình thành bởi các dây và ống. Các tham số TL đối với dây trần được xét ở đây có thể được tính nhanh và chính xác bằng phương pháp hai chiều, chẳng hạn, bằng MoM [18], [19] hoặc chuyển đổi Schwarz–Christoffel (SC) (xem phụ lục). Trong trường hợp MoM hai chiều [20], các dây tròn được xem gần đúng là các đa giác 16 mặt. Trong SC số [21], ống được ánh xạ trên đường tròn đơn vị và thông lượng trên ampe được xác định giữa đường tròn đó và bề mặt dây được ánh xạ. Giá trị độ tự cảm và trở kháng đối với bốn dây thu được qua cả hai phương pháp được so sánh trong bảng III. Rõ ràng có sự phù hợp tốt giữa hai phương pháp; độ lệch nhỏ hơn 0.5%.

The required field distribution inside the empty conduit as a function of both frequency and position can be calculated by either MoM or FIT. For the TL formulation, we use the Vance's approach for the coupling of the external field to the TL. The details are presented in [10, Ch. 3]. We assume only one wire at a time inside the conduit. Since the incident wave is perpendicularly oriented with respect to the conduit, only the E_z -component needs to be considered as excitation source. With the "front" excitation, the z -component of the electric field does not vary much along the conduit length, except near the ends (see Fig. 7). In the first approximation, these end effects can be neglected. As a result, the field needs to be determined only in the central cross section of the conduit, and ultimately, 2-D method should suffice. Fig. 8 presents the voltages calculated by the TL approach (dashed lines) plotted against the full 3-D results (solid). For the sake of clarity, only the results for "top" and "bottom" wires are presented. Good agreement over most of the frequency range is observed. Above 0.1 GHz and at off-resonance frequencies, the difference in the signal level between both methods remains within a few decibels. The largest deviation of 6 dB is observed for the "bottom" wire.

Phân bố trường đòi hỏi bên trong ống rỗng là một hàm theo cả tần số và vị trí có thể được tính bằng cả MoM và FIT. Đối với phương pháp TL, chúng ta dùng cách tiếp cận Vance để ghép trường ngoài với TL. Chi tiết được đưa vào trong [10, Ch.3]. Chúng ta giả sử một lần chỉ có một dây bên trong ống. Bởi vì sóng tới định hướng vuông góc với ống, chỉ thành phần E_z được xem là nguồn kích thích. Với kích thích "trước", thành phần z của điện trường không biến đổi nhiều dọc theo chiều dài ống, ngoại trừ gần các đầu (xem hình 7). Trong phép gần đúng bậc nhất, các hiệu ứng hai đầu này có thể được bỏ qua. Do đó, trường cần được xác định chỉ ở tiết diện trung tâm của ống, và cuối cùng phương pháp hai chiều cần được sử dụng. Hình 8 biểu diễn điện áp được tính bằng phương pháp TL (các đường nét đứt) được vẽ theo kết quả ba chiều đầy đủ (liền nét). Để cho rõ ràng, chỉ các kết quả đối với các dây "trên" và "dưới" được đưa vào. Chúng ta thấy có sự phù hợp tốt trên hầu hết các khoảng tần số. Trên 0.1 GHz và tại các tần số lệch hưởng, sự khác nhau của mức tín hiệu giữa cả hai phương pháp vẫn nằm trong khoảng vài decibel. Độ lệch lớn nhất là 6dB được quan sát đối với dây "dưới".

Second, we consider all wires present. Again, the conduit is mapped onto a unit disk and the wire positions are mapped to the inside of the disk (see Appendix).

The full L-matrix is calculated under the assumption that the field generated by each wire is negligibly perturbed by the others because of their small diameter compared to the distances:

Thứ hai, chúng ta xét sự hiện diện của tất cả các dây. Ống lại được ánh xạ trên đĩa đơn vị và vị trí dây được ánh xạ vào trong đĩa (xem phụ lục). Ma trận L đầy đủ được tính với giả thuyết rằng trường được tạo ra bởi mỗi dây bị nhiễu không đáng kể bởi các dây khác do đường kính của chúng nhỏ so với các khoảng cách:

.....

with values in nanohenry per meter. For the bare wires, the corresponding capacitance matrix follows from the inversion of L:

với các giá trị nano Henry trên mét. Đối với các dây trần, ma trận điện dung tương ứng được suy ra từ nghịch đảo của L:

$C = L^{-1} / c_0^2$, with c_0 , the free-space velocity of light. Such a TL configuration is then placed in an otherwise homogeneous magnetic field $H_{0,x}$ corresponding to the 1 V/m “front” excitation. The induced wire currents are obtained from the requirement of zero flux between the images of each wire and the unit disk. The current amplitudes are given in Table IV. The close-to-exact SC approach demonstrates the accuracy of the FIT and MoM results at low frequency. The SC markers on the left scale of Fig. 5 agree within 2 dB with the extrapolated FIT and MoM values.

....., với ..., vận tốc ánh sáng trong chân không. Sau đó cấu hình TL được đặt trong một trường từ đồng nhất ngược lại ..., x tương ứng với kích thích “trước” 1 V/m. Các dòng điện trong dây cảm ứng thu được từ điều kiện thông lượng bằng không giữa các ảnh của mỗi dây và đĩa đơn vị. Độ lớn dòng điện được cho trong bảng IV. Cách tiếp cận SC gần chính xác cho thấy sự chính xác của các kết quả FIT và MoM tại tần số thấp. Các bộ đánh dấu SC ở phần bên trái của hình 5 phù hợp trong 2 dB với các giá trị FIT và MoM được ngoại suy.

The ratio of the wire currents does not depend strongly on the type of excitation. For instance, one may assume a ICM =1 A CM current through the conduit as an alternative excitation. The calculated results for the various excitations are summarized in the Table IV. As can be seen, the simple, and therefore, fast 2-D

approaches quite accurately predict the ratios of the induced currents. The full 3-D calculations again deviate less than 2 dB.

Tỉ số các dòng điện trong dây không phụ thuộc mạnh vào loại kích thích. Chẳng hạn, chúng ta có thể giả sử ICM=1 A dòng CM qua ống như một kích thích tùy chọn. Các kết quả được tính toán đối với các kích thích khác nhau được tóm tắt trong bảng IV. Như chúng ta thấy, cách tiếp cận hai chiều nhanh và đơn giản tiên đoán khá chính xác tỉ số của các dòng điện cảm ứng. Tính toán ba chiều đầy đủ lại lệch ít hơn 2 dB.

For other incident field directions, the variation in the E_z along the conduit length should be incorporated into the TL model. The analysis of systems containing multiple cables, including those with dielectrics, has been reported earlier in the literature, e.g., [22]–[24].

Đối với các trường tới có sự định hướng khác, sự thay đổi của E_z dọc theo chiều dài ống cần được gộp vào mô hình TL. Việc phân tích hệ thống chứa nhiều dây cáp, kể cả các hệ thống có điện môi, đã được báo cáo trước đây trong các tài liệu, chẳng hạn [22]-[24].

D. Các hình dạng khác

To investigate the influence of the conduit shape on the provided protection, we repeated the “voltage” calculations for two additional configurations with one or both sidewalls removed to form an L-shape or flat plate, respectively. T- and H-shapes shown in Fig. 1 were not analyzed. The results for the “middle” wire calculated in presence of all four wires are shown in Fig. 9. As anticipated, the more open conduit results in larger induced voltages for the fixed wire position. The same dependence on frequency is valid for the other three wires. For example, in case of the “bottom” wire, the difference between the U-shape and a flat plate is more than factor 35 (31 dB) at 0.15 GHz.

Để khảo sát ảnh hưởng của hình dạng ống đến chức năng bảo vệ, chúng tôi đã lặp lại tính toán điện áp đối với hai cấu hình phụ với một hoặc cả hai vách được loại bỏ để hình thành tấm dạng chữ L hoặc phẳng. Các hình dạng T và H được biểu diễn trong hình 1 không được phân tích. Các kết quả đối với dây giữa được tính khi có

mặt bốn dây được biểu diễn trong hình 9. Như đã biết, ống hở nhiều hơn sẽ cho các điện áp cảm ứng lớn hơn đối với vị trí dây cố định. Sự phụ thuộc tương tự vào tần số cũng đúng đối với ba dây còn lại. Ví dụ, trong trường hợp dây “dưới”, sự khác nhau giữa các tấm dạng chữ U hoặc phẳng là hệ số lớn hơn 35 (31 dB) ở 0.15 GHz.

E. Sự định hướng và sự phân cực khác nhau

It is expected that the “front” orientation, as in Fig. 4(a) with the electric field polarization parallel to the wires and the conduit results in the largest coupling. For the U-shaped conduit, other possible situations were also modeled by FIT in the frequency range up to 1 GHz. If we rotate the “front” orientation polarization over 90° , now with the H-field of the incident wave parallel to the wires and E-field normal to them, the magnetic flux between the conduit and wires is strongly reduced. The voltages in all wires lay below the -100 dBV ($10 \mu\text{V}$) level; for the “middle” wire, the reduction is of the order of 60 dB.

Người ta hi vọng rằng định hướng “trước”, như trong hình 4(a) với sự phân cực điện trường song song với các dây và ống dẫn đến sự ghép lớn nhất. Đối với ống dạng chữ U, các trường hợp khả dĩ khác cũng được mô hình hóa bởi FIT trong khoảng tần số lên đến 1 GHz. Nếu chúng ta quay phân cực định hướng “trước” đến 90° , bây giờ với trường H của sóng tới song song với các dây và trường E vuông góc với chúng, thông lượng từ giữa ống và các dây giảm mạnh. Điện áp trong tất cả các dây nằm dưới mức -100 dBV ($10 \mu\text{V}$); đối với dây “giữa”, giảm vào bậc 60 dB.

Another brief comparison was made for all three orientations shown in Fig. 4. The results for the “middle” wire are shown in Fig. 10. The largest difference between the “front” and the “side” orientations for this wire is about 10 dB. The same holds for the other three wires. For the “side” orientation, the magnetic field component of the incident field is oriented in the y-direction (see Fig. 1), perpendicular to the bottom and parallel to the plane of the wires. Again, the magnetic flux between the wires and the conduit is strongly reduced.

Một so sánh vắn tắt khác được thực hiện đối với cả ba loại định hướng được biểu diễn trong hình 4. Các kết quả đối với dây “giữa” được biểu diễn trong hình 10. Sự khác nhau lớn nhất giữa định hướng “trước” và “cạnh” đối với dây này khoảng 10

dB. Điều tương tự đúng đối với ba dây còn lại. Đối với định hướng “cạnh”, thành phần từ của trường tới được định hướng theo hướng y (xem hình 1), vuông góc với đáy và song song với mặt phẳng dây. Một lần nữa, thông lượng từ giữa các dây và ống bị giảm mạnh.

F. Các tần số cao hơn

The results of the previous sections for induced currents and voltages as a position of the wire are valid up to 1 GHz. At higher frequencies, the wavelength approaches the cross-sectional dimensions of the conduit (9 cm), and other modes than TEM will also be excited inside the conduit. The simulation results are indicated in Fig. 11 for the frequencies up to 5 GHz. The most notable feature is the reduced protection for the “bottom” and “corner” wires above 2 GHz, the frequency, where the half wavelength and lateral dimension of the conduit become comparable.

Các kết quả dòng điện và điện áp cảm ứng ở phần trước theo vị trí của dây đúng đến 1 GHz. Tại các tần số cao hơn, bước sóng tiến đến kích thước tiết diện của ống (9 cm), và các mode khác trừ TEM cũng sẽ bị kích thích bên trong ống. Các kết quả mô phỏng được chỉ ra trong hình 11 đối với các tần số lên đến 5 GHz. Đặc tính đáng chú ý nhất là tính năng bảo vệ bị giảm đối với các dây “đáy” và “góc” trên 2 GHz, tần số, nơi mà nửa bước sóng và kích thước bên của ống xấp xỉ bằng nhau.

IV. ĐO ĐẠC

In order to validate the simulation results, measurements have been carried out in the 3-m fully anechoic room (FAR) at Philips EMC Center [25]. The FAR floor was covered by the same absorbing ferrite tiles as the wall and the ceiling. This provides a reflection-free environment up to 1 GHz. The conduit is placed at 1 m above the floor. A significant length of the measuring cable from the conduit wires to the test receiver is exposed to the field generated by the antenna. This may lead to a large induced CM current in the cable shield. To minimize the effect, the cable was loaded with ferrite rings over the whole length inside the FAR. In order to determine the cable influence, two different orientation of conduit were considered. They are referred to as “vertical” and “horizontal” and schematically shown in Fig. 12.

Để xác nhận các kết quả mô phỏng, các phép đo được thực hiện trong phòng hoàn toàn không có tiếng vọng 3 m (FAR) tại trung tâm Philips EMC [25]. Sàn nhà, trần nhà và vách tường FAR được phủ bằng các viên ngói ferrite hấp thụ. Điều này làm cho môi trường này không phản xạ ở tần số lên đến 1 GHz. Ống được đặt trên sàn 1m. Chiều dài đáng kể của cáp đo từ các dây trong ống đến bộ thu kiểm tra được phô ra với trường được tạo bởi anten. Điều này có thể dẫn đến dòng CM cảm ứng lớn trong vỏ cáp. Để cực tiểu hóa ảnh hưởng, dây cáp được tải với các vòng ferrite trên toàn bộ chiều dài bên trong FAR. Để xác định ảnh hưởng cáp, chúng ta xét hai sự định hướng khác nhau của ống. Chúng được gọi là dọc và ngang và được biểu diễn trong hình 12.

Under otherwise equal circumstances, the horizontal orientation is preferable, since in this case, the incident electric field is perpendicular to the cable and the coupling is up to -6 dB less. The conduit was placed at 3 m distance from the antenna. A minor wavefront curvature at the conduit could have been expected, but was not taken into account. The signals were measured with HP 8546A EMI Receiver. The 0 dBm output of the tracking generator was connected to the CBL 6112B antenna, which was used as excitation source. The frequency range of 30 MHz– 1 GHz is split in several subranges to obtain a higher resolution.

Trong những trường hợp tương đương khác, sự định hướng ngang được ưa thích hơn, bởi vì trong trường hợp này, trường điện tới vuông góc với cáp và sự ghép lên đến -6 dB hoặc nhỏ hơn nữa. Ống được đặt cách 3 m từ ăng ten. Có thể có một sự cong mặt đầu sóng nhỏ ở ống, nhưng không cần tính đến. Các tín hiệu được đo với bộ thu HP 8546A EMI. Đầu ra 0 dBm của máy tạo sóng đồng chỉnh được kết nối với ăng ten CBL 6112B, được sử dụng như nguồn kích thích. Khoảng tần số 30 MHz – 1 GHz được tách thành vài khoảng nhỏ để thu được độ phân giải cao hơn.

A second log-periodic antenna with known antenna factor re-placed the conduit in introductory measurements to determine the incident electric field at the conduit. Fig. 13 shows the results for the “top” and the “middle” results for the “top” and the “middle” wires and their comparison with FIT calculations in case of the 50 Ω load. The measured voltages are scaled to the 1 V/m electric field in the calculations.

Ăng ten log chu kì với hệ số ăng ten đã biết được đặt trong ống trong các phép đo giới thiệu để xác định trường tới tại ống. Hình 13 biểu diễn các kết quả đối với các dây “đỉnh” và “giữa” và sự so sánh của chúng với tính toán FIT trong trường hợp tải 50 Ω. Điện áp đo được được lấy tỉ lệ đến điện trường 1 V/m trong tính toán.

Good agreement over the whole frequency range is observed. The ripples in the measured results were caused by minor reflections in the signal cable. Similar measurements with an FCCF-2000 current probe on the wire currents compare less well with the calculations, mostly because the coupled inductance of the probe loads the wire and the probe metal shield introduces additional local capacitance. Because of the protection, is equally well demonstrated in the voltage measurements, we limit the presentation to these.

Chúng ta thấy có sự phù hợp tốt trên toàn bộ khoảng tần số. Các gợn sóng trong các kết quả đo là do các phản xạ nhỏ trong cáp tín hiệu. Các phép đo tương tự với đầu dò dòng FCCF-2000 trên các dòng điện của dây không chính xác bằng tính toán, chủ yếu là do độ cảm được ghép của đầu dò tải dây và vỏ kim loại của đầu dò tạo ra thêm điện dung cục bộ. Bởi vì tính năng bảo vệ được chứng minh tương đương trong phép đo điện áp, do đó chúng ta không xét những phép đo đó nữa.

It has been shown in [3] for frequencies below 1 MHz that even a nonconnected brass cover reduces the coupling from the outside world by factor of six, as compared with an open U-shaped conduit. The slit between cover and conduit was 1 mm wide and the overlap was 20 mm. Four bolts at the corners connect the cover and conduit, and reduce the coupling further by an order of magnitude. Here, we extend these results. As is well known, at higher frequencies, where conduit becomes electrically large, a floating cover is not effective. As a rule of thumb, the bolts should be placed not further than $\lambda_s / 10$ apart, where λ_s is the smallest wavelength of interest. The 1.5-m long conduit becomes electrically large ($l_z = \lambda / 10$) at 20 MHz, which is below the 30 MHz lower limit of the antenna in the FAR. To increase the critical frequency up to 100 MHz, additional bolts were placed along the whole length at distances of 24.5 cm apart. Measurements show that a configuration with a floating (not galvanically connected to the conduit) cover does not provide the desired positive effect.

Trong [3], người ta chứng tỏ rằng đối với các tần số dưới 1 MHz, cho dù nắp đồng không được kết nối giảm ghép với bên ngoài một hệ số bằng sáu, khi so sánh với ống dạng chữ U hở. Khe giữa lớp phủ và ống rộng 1 mm và xen phủ 20 mm. Bốn bu lông ở tại các góc kết nối nắp và ống, và giảm ghép thêm một bậc về độ lớn nữa. Ở đây chúng ta mở rộng những kết quả này. Như đã biết, tại các tần số cao, ống dẫn điện mạnh, nắp di động không hiệu quả. Theo lệ thường, các bu lông nên được đặt không cách nhau quá $\lambda_s/10$ ở đây λ_s là bước sóng nhỏ nhất mà chúng ta xét. Ống dài 1.5 m trở nên dẫn điện mạnh ($l_z = \lambda/10$) tại 20 MHz, tần số này nằm dưới giới hạn thấp 30 MHz của ăng ten trong FAR. Để tăng tần số tới hạn lên 100 MHz, các bu lông phụ được đặt dọc theo toàn bộ chiều dài cách nhau 24.5 cm. Các phép đo cho thấy rằng cấu hình với nắp nâng (không được kết nối điện với ống) không làm nảy sinh hiệu ứng dương đáng quan tâm.

On the average, the voltage is slightly reduced, but more importantly, additional large resonance peaks appear over the whole frequency range. Fig. 14 compares the induced voltage at the end of the “top” wire for the open U-shaped conduit (thick solid line), the conduit with all screws are put in place (dashed line) and the conduit connected to the cover by copper tape (diamond pattern type) over the full length (thin solid line). The bolted cover indeed reduces the coupling by up to 30 dB, but only below 300 MHz. The copper tape reduces the signal level by 30 dB over the full-frequency range, most likely limited by the random contact between cover, tape, and conduit.

Tính trung bình, điện áp hơi giảm, nhưng quan trọng hơn, các peak cộng hưởng phụ xuất hiện trên toàn bộ khoảng tần số. Hình 14 so sánh điện áp cảm ứng ở đầu của dây “trên” đối với ống dạng chữ U hở (đường liền nét dày), ống và tất cả ốc vít được đặt một nơi (đường nét đứt) và ống được nối với nắp bằng dải đồng (loại vân kim cương) trên toàn bộ chiều dài (đường liền nét mỏng). Thực sự, các nắp được chốt giảm ghép đến 30 dB, nhưng chỉ dưới 300 MHz. Dây đồng giảm mức tín hiệu 30 dB trên toàn bộ khoảng tần số, chủ yếu bị giới hạn bởi tiếp xúc ngẫu nhiên giữa nắp, dây, và ống.

V. NHẬN XÉT KẾT LUẬN

The protection offered by an open U-shaped cable conduit has been analyzed. Previous studies of similar configurations concerned mainly low frequencies

(below 1 or 30 MHz); this study extends the frequency range up to a few gigahertz. The induced currents and voltages over a 50 Ω load on wires inside the conduit have been exposed to plane-wave excitation.

Tính năng bảo vệ của ống cáp chữ U hở đã được phân tích. Các nghiên cứu trước đây về các cấu hình tương tự chỉ dừng lại ở các tần số thấp (dưới 1 hoặc 30 MHz); nghiên cứu này mở rộng khoảng tần số lên đến vài giga Hz. Dòng và điện áp cảm ứng trên 50 Ω tải các dây bên trong ống đã được kích thích bằng sóng phẳng.

A good agreement between measurements and simulations was observed. Both showed a significant protection for the inside wires, especially when the wires are located near the conduit walls. This is valid for frequencies until a half wavelength becomes comparable to the lateral dimensions. Some practical aspects of the measurement setups have been discussed as well.

Có sự phù hợp tốt giữa thực nghiệm và mô phỏng. Cả hai chứng tỏ rằng các dây bên trong được bảo vệ nhiều nhất, đặc biệt khi các dây được đặt gần vách ống. Điều này đúng đối với các tần số cho đến khi kích thước bên cỡ nửa bước sóng. Một số khía cạnh thực tế của bố trí phép đo cũng đã được thảo luận.

Ideally, the variations in electric field along the conduit length should be incorporated into the TL model of Section III-C to account for the effects near the end plates. When several wires are present, the mutual coupling between them must be also included in the model. The off-diagonal elements (mutual inductances) of L-matrix can be calculated by a SC approach. The corresponding capacitance matrix is then obtained by the inversion of this inductance matrix. The analysis of systems containing multiple cables have been earlier reported in the literature [22]–[24].

Một cách lý tưởng, sự biến đổi của điện trường dọc theo chiều dài ống cần được tích hợp vào trong mô hình TL của phần III-C để tính đến các hiệu ứng gần đầu của tấm. Khi có mặt vài dây, sự ghép lẫn nhau giữa chúng phải được kể đến trong mô hình. Các yếu tố không chéo (hỗ cảm) của ma trận L có thể được tính bằng phương pháp SC. Sau đó, ma trận điện dung tương ứng có thể thu được bằng cách nghịch đảo ma trận cảm ứng. Phân tích hệ thống chứa nhiều dây cáp đã được báo cáo trước đây trong tài liệu [22]-[24].

The conduit considered in this paper contains only four sparsely placed parallel wires. The real-world conduits are normally more densely filled with cables in randomly interweaved bundles. The sharp resonances in the currents of Fig. 5 may cause an increased coupling to the cables in the conduit. For calculations, the actual wave velocities outside and inside the cable, as well as the amplitude and the phase of transfer parameters Z_t and Y_t have to be known. The theory has been already formulated by Vance [10, p. 147].

Ống được xét trong bài báo này chỉ chứa bốn dây song song được đặt rải rác. Các ống thực thường có dây dày đặc được gộp thành từng bó. Cộng hưởng rõ nét trong các dòng điện của hình 5 có thể làm cho sự ghép tăng với các dây cáp trong ống. Để tính toán, chúng ta cần phải biết vận tốc sóng thực sự bên ngoài và bên trong cáp, cũng như độ lớn và pha của các tham số chuyển đổi Z_t và Y_t . Lí thuyết đã được xây dựng bởi Vance [10, trang 147]

PHỤ LỤC

PHƯƠNG PHÁP SCHWARZ-CHRISTOFFEL

Hình dạng ống ($h = 9 \text{ cm}$, $2\omega = 9 \text{ cm}$, và $d = 1 \text{ mm}$) thu được bằng phép biến đổi T_1 từ đĩa đơn vị (xem hình 15). Để xác định các tham số TL, các tham số T_1 [21, phương trình (4.6)] thỏa mãn.

$$\mathbf{T}_1 : f_1(w) = A + C \int^w \zeta^{-2} \prod_{k=1}^8 \left(1 - \frac{\zeta}{w_k}\right)^{1-\alpha_k} d\zeta \quad (2)$$

$$\mathbf{T}_2 : f_2(w) = e^{i\varphi} / w \quad (3)$$

$$\mathbf{T}_3 : f_3(t) = t + \sqrt{t-1} \cdot \sqrt{t+1}. \quad (4)$$

In (2), A and C are constants, w_k are the prevertices on the unit circle, and the α_k are given by the turning angles. Values for the conduit are given in Table V. As shown, the w_k are truncated to five digits. Far more accurate values have been used in the calculations; the lengths of the conduit edges were accurate to within 10– 12 cm. The procedure toward the L-matrix using the unit circle image has been described in Section III-C and [4,Appendix] and is not repeated here.

Trong (2), A và C là các hằng số, ω_k là các prevertice trên đường tròn đơn vị, và α_k được cho bởi các góc quay. Giá trị đối với ống được cho trong bảng V. Như đã thấy, ω_k bị chặt cụt đến 5 số. Giá trị chính xác thêm nữa đã được sử dụng trong tính toán; chiều dài của các cạnh ống chính xác đến 10 – 12 cm. Quy trình tiến đến ma trận L dùng ảnh đường tròn đơn vị đã được mô tả trong phần III-C và [4, phụ lục] và không được lặp lại ở đây.

The transformation T2 maps the complex plane outside the unit circle onto the disk and rotates the w-plane over $\phi = \pi/2 + (\arg w_1 + \arg w_8)/2$ to have the correct orientation for magnetic field in t. The transformation T3 maps the full complex t-plane onto the w-plane. A homogeneous magnetic field H0 oriented along the real axis in t is described by the complex potential $H_0 \cdot t$. The complex conjugate of the magnetic field in the z-plane [26, p. 58] is $H^*(z) = H_0 \times \partial T / \partial t$ with $T(t) = T_1(T_2(T_3(t)))$. At large distances z from the conduit, or w near the origin, T1 behaves as C/w and T3 as 2t. The homogeneous field at large distance in z is then $H_0 \cdot |2C|$. The flux between the wire images in the t-plane and the conduit has been corrected with this factor. Note [21, p. 53] that |C| is logarithmic capacity of transformation T1 ; here we have

Chuyển đổi T_2 ánh xạ mặt phẳng phức bên ngoài đường tròn đơn vị lên đĩa và quay mặt phẳng ω trên $\phi = \pi/2 + (\arg \omega_1 + \arg \omega_8)/2$ có sự định hướng chính xác đối với trường từ theo thời gian t. Chuyển đổi T_3 ánh xạ toàn bộ mặt phẳng phức lên mặt phẳng ω . Trường từ đồng nhất H_0 được định hướng dọc theo trục thực theo thời gian t được mô tả bởi thế phức $H_0 \cdot t$. Liên hợp phức của trường từ trong mặt phẳng z [26, trang 58] là $H^*(z) = H_0 \times \partial T / \partial t$ với $T(t) = T_1(T_2(T_3(t)))$. Tại các khoảng cách z lớn từ ống, hoặc ω gần gốc tọa độ, T_1 giống như C/ω và T_3 theo 2t. Trường đồng nhất ở khoảng cách lớn z là $H_0 \cdot |2C|$. Thông lượng giữa các ảnh dây trong mặt phẳng t và ống được chính xác hóa với hệ số này. Chú ý rằng [21, trang 53] là dung lượng logarit của chuyển đổi T_1 ; ở đây chúng ta có $C = 0.14366555 - 5.1424224i$.